



Arifin Fahmi et al.

# Sifat dan Pengelolaan Tanah Sulfat Masam dan Gambut



# Sifat dan Pengelolaan Tanah Sulfat Masam dan Gambut

Diterbitkan pertama pada 2024 oleh Penerbit BRIN

Tersedia untuk diunduh secara gratis: [penerbit.brin.go.id](http://penerbit.brin.go.id)



Buku ini di bawah lisensi Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0).

Lisensi ini mengizinkan Anda untuk berbagi, mengopi, mendistribusikan, dan mentransmisi karya untuk penggunaan personal dan bukan tujuan komersial, dengan memberikan atribusi sesuai ketentuan. Karya turunan dan modifikasi harus menggunakan lisensi yang sama.

Informasi detail terkait lisensi CC BY-NC-SA 4.0 tersedia melalui tautan: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



Arifin Fahmi et al.

# Sifat dan Pengelolaan Tanah Sulfat Masam dan Gambut

Penerbit BRIN

© 2024 Arifin Fahmi, Muhammad Noor, Dedi Nursyamsi, Ani Susilawati, Izhar Khairullah, Muhrizal Sarwani, & Muhammad Saleh

Katalog dalam Terbitan (KDT)

Sifat dan Pengelolaan Tanah Sulfat Masam dan Gambut/Arifin Fahmi et al.–Jakarta: Penerbit BRIN, 2024.

xxv + 430 hlm.; 14,8 × 21 cm

ISBN 978-602-6303-47-9 (*e-book*)

- |                 |                       |
|-----------------|-----------------------|
| 1. Ilmu tanah   | 2. Tanah sulfat masam |
| 3. Tanah gambut | 4. Lahan rawa         |

631.4

Editor Akuisisi	: Prapti Sasiwi
Copy Editor	: Sarah Fairuz
Proofreader	: Donna Ayu Savanti & Martinus Helmiawan
Penata Isi	: Meita Safitri & Donna Ayu Savanti
Desainer Sampul	: Meita Safitri

Edisi Pertama : Desember 2024



Diterbitkan oleh:

Penerbit BRIN, Anggota Ikapi  
Direktorat Repositori, Multimedia, dan Penerbitan Ilmiah  
Gedung B.J. Habibie, Jl. M.H. Thamrin No. 8,  
Kb. Sirih, Kec. Menteng, Kota Jakarta Pusat,  
Daerah Khusus Ibukota Jakarta 10340

Whatsapp: +62 811-1064-6770

E-mail: [penerbit@brin.go.id](mailto:penerbit@brin.go.id)

Website: [penerbit.brin.go.id](http://penerbit.brin.go.id)

 PenerbitBRIN

 @Penerbit\_BRIN

 @penerbit.brin

# Daftar Isi

Daftar Gambar .....	vii
Daftar Tabel .....	xiii
Pengantar Penerbit .....	xvii
Kata Pengantar .....	xix
Prakata .....	xxiii
<b>Bab 1</b> <b>Pendahuluan</b> .....	1
A. Pengertian Lahan Rawa .....	1
B. Potensi dan Sebaran Lahan Rawa .....	5
C. Pentingnya Lahan Rawa .....	11
<b>Bab 2</b> <b>Tipologi Lahan Rawa</b> .....	15
A. Zonasi Lahan Rawa .....	16
B. <i>Landform</i> Lahan Rawa .....	25
<b>Bab 3</b> <b>Tanah Sulfat Masam</b> .....	45
A. Pencirian dan Pembentukan Tanah Sulfat Masam .....	47
B. Klasifikasi Tanah Sulfat Masam .....	70
C. Sifat Tanah Sulfat Masam .....	73

<b>Bab 4</b>	<b>Tanah Gambut</b> .....	131
	A. Pencirian dan Pembentukan Tanah Gambut .....	135
	B. Klasifikasi Tanah Gambut.....	141
	C. Sifat Tanah Gambut.....	147
<b>Bab 5</b>	<b>Pengelolaan Tanah Sulfat Masam</b> .....	177
	A. Pengelolaan Air .....	182
	B. Penataan Lahan .....	198
	C. Ameliorasi .....	203
	D. Pemupukan Anorganik .....	216
	E. <i>Permeable Reactive Barrier</i> .....	220
<b>Bab 6</b>	<b>Pengelolaan Tanah Gambut</b> .....	223
	A. Sistem Pengelolaan Air .....	226
	B. Penataan Lahan .....	232
	C. Ameliorasi .....	237
	D. Pemupukan Anorganik .....	242
<b>Bab 7</b>	<b>Budi Daya Tanaman di Tanah Sulfat Masam</b> .....	245
	A. Kendala Budi Daya Tanaman di Tanah Sulfat Masam.....	245
	B. Budi Daya Tanaman di Tanah Sulfat Masam .....	248
<b>Bab 8</b>	<b>Budi Daya Tanaman di Tanah Gambut</b> .....	279
	A. Kendala Budi Daya Tanaman di Tanah Gambut .....	280
	B. Budi Daya Tanaman Pangan .....	281
	C. Budi Daya Tanaman Hortikultura .....	298
	D. Budi Daya Tanaman Perkebunan.....	310
<b>Bab 9</b>	<b>Perspektif Pengelolaan Lahan</b> .....	323
	A. Sumber Pertumbuhan Produksi Pangan ke Depan .....	327
	B. Kesenjangan Hasil Antara Penelitian dan Petani .....	327
	C. Saran Pengelolaan Lahan Rawa Masa Depan .....	329
	<b>Glosarium</b> .....	333
	<b>Daftar Pustaka</b> .....	341
	<b>Tentang Penulis</b> .....	411
	<b>Indeks</b> .....	421

# Daftar Gambar

Gambar 2.1	Zonasi Lahan Rawa di Sepanjang Daerah Aliran Sungai (DAS) Bagian Bawah dan Tengah.....	21
Gambar 2.2	Klasifikasi Lahan Rawa Berdasarkan pada Jenis Bahan Induk serta Tingkat Kendala Menurut Potensi Pengembangannya .....	24
Gambar 2.3	Ilustrasi Batas Wilayah Lahan Lebak dan Pasang Surut .....	26
Gambar 2.4	Ilustrasi Klasifikasi Lahan Pasang Surut Berdasarkan Tipe Luapan .....	28
Gambar 2.5	Tinggi Muka Air dan pH Air Sungai pada Daerah Pasang Surut Tipe Luapan A, B, dan C yang Diukur Selama 24 Jam .....	31
Gambar 2.6	Arah Aliran Air Saat Terjadi Pasang Besar dan Pasang Kecil pada Tiga Zona.....	33
Gambar 2.7	Penampang Skematis Daerah Lahan Lebak pada Satu Sungai .....	38
Gambar 2.8	Penampang Skematis Daerah Lahan Lebak di Antara Dua Sungai Besar .....	38

Gambar 2.9	Penampang Skematis Daerah Lahan Lebak Peralihan Antara Lahan Lebak dan Lahan Pasang Surut (Marine) .....	38
Gambar 2.10	Ilustrasi Klasifikasi Tipe Lahan Lebak .....	40
Gambar 2.11	Dinamika Kemasaman Air pada Lahan Lebak .....	42
Gambar 3.1	Contoh Profil dan Monolit Beberapa Sub-Grup Tanah Sulfat Masam .....	47
Gambar 3.2	Lapisan Tanah yang Mengandung Bahan Sulfidik pada Profil dan Hasil Pengeboran Tanah Sulfat Masam.....	49
Gambar 3.3	Bentuk mineral pirit framboidal menggunakan (a) <i>scanning eletron microscopy</i> (SEM) dan (b) <i>thin section</i> framboidal pirit. ....	50
Gambar 3.4	(a) Stabilitas SO <sub>4</sub> berdasarkan hubungan Eh dan pH; (b) penampakan mineral pirit yang terbentuk dan teroksidasi di dalam serat organik.....	53
Gambar 3.5	Struktur Pirit Sebelum Teroksidasi dan Sesudah Teroksidasi Menggunakan Sem-Edx ( <i>Energy Dispersive X-Ray</i> ) .....	54
Gambar 3.6	Horizon Sulfurik dalam Profil Tanah Sulfat Masam .....	57
Gambar 3.7	Mineral Jarosit dalam Profil Tanah yang Terbentuk Akibat Retakan dan pada Permukaan Tanah Sulfat Masam yang Telah Teroksidasi.....	58
Gambar 3.8	Pola <i>X-ray Diffraction</i> (XRD) dan <i>Spektrum Fourier- Transform Infrared</i> (FTIR) Jarosit .....	60
Gambar 3.9	Morfologi Kristal Jarosit .....	61
Gambar 3.10	Diagram (a) hubungan Eh/pH yang menunjukkan kondisi stabilitas mineral jarosit, dan (b) stabilitas beberapa mineral hasil pelarutan jarosit berdasarkan pH lingkungannya.....	63
Gambar 3.11	Gelembung dan Asap Putih yang Muncul Setelah Ditetesi Peroksida (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 30%) pada Lapisan Tanah yang Mengandung Bahan Sulfidik.....	70
Gambar 3.12	Produksi Asam Akibat Oksidasi Pirit .....	78
Gambar 3.13	Perbandingan laju konstanta sebagai fungsi pH untuk oksidasi pirit oleh Fe <sup>3+</sup> (Persamaan 3.31), oksidasi pirit oleh O <sub>2</sub> (Persamaan 3.25), dan oksidasi Fe <sup>2+</sup> oleh O <sub>2</sub> (Persamaan 3.29).....	80

Gambar 3.14	Laju Oksidasi Pirit Berdasarkan Tinggi Muka Air dalam Tanah .....	86
Gambar 3.15	Pola Dinamika Ph dan Eh Tanah Musiman di Tanah Sulfat Masam .....	87
Gambar 3.16	Warna air yang jernih di tanah sulfat masam menunjukkan kondisi yang sangat masam dan warna kemerahan menunjukkan tingginya kandungan Fe.....	88
Gambar 3.17	Morfologi (a) Mineral Schwertmannit dan (b) Jarosit Menggunakan SEM.....	90
Gambar 3.18	Diagram Stabilitas Beberapa Mineral Fe Berdasarkan Nilai pH dan Eh.....	91
Gambar 3.19	Proses Transformasi Pirit menjadi Mineral Fe Sekunder .....	93
Gambar 3.20	Ilustrasi Proses Oksidasi Pirit Saat Tergenang dan Kering.....	94
Gambar 3.21	Konsep Model Zonasi Geokimia Fe di Tanah Sulfat Masam Lahan Pasang Surut.....	97
Gambar 3.22	Pengaruh Redoks Terhadap Konsentrasi Fe <sup>2+</sup> .....	102
Gambar 3.23	Ilustrasi peranan senyawa organik sebagai <i>shuttle electron</i> dalam reaksi redoks Fe; reduksi Fe <sup>3+</sup> melalui (A) <i>shuttle electron</i> asam humat dan (B) reduksi Fe <sup>3+</sup> melalui <i>shuttle electron</i> senyawa organik hasil ekskresi mikroorganism.....	103
Gambar 3.24	Skematis Kategori Kondisi Eh Tanah di Lahan Rawa dan Batasan Nilai Redoks Potensial untuk Reaksi Reduksi Beberapa Unsur Penerima Elektron .....	105
Gambar 3.25	Klas Redoks; Masam-Oksidatif, Basa-Oksidatif, Masam-Reduktif, dan Basa-Reduktif Berdasarkan Kisaran Eh-pH.....	106
Gambar 3.26	Mineral Siderit yang Terdapat Pada Permukaan Hematit .....	112
Gambar. 3.27	Reduksi Fe <sup>3+</sup> , Produksi CH <sub>4</sub> , Produksi CO <sub>2</sub> , dan Akumulasi Fe <sup>2+</sup> di Lahan Rawa .....	113
Gambar 3.28	Variasi (a) jumlah karbon terlarut (DOC) yang diikat oleh Fe dan (b) rasio C/Fe yang terendapkan sebagai fungsi waktu.....	114

Gambar 3.29	Ilustrasi Model Hubungan Antara Tingkat Redoks Fe dan Siklus Unsur Hara C, N, S, dan P di Dalam Tanah.....	116
Gambar 3.30	Ilustrasi Skematis Siklus C, N, P, dan Fe yang Terjadi secara Bersamaan pada Sekitar Daerah Perakaran Tanaman Padi .....	117
Gambar 3.31	Ilustrasi Model Hubungan Antara Redoks Fe dengan Siklus N di Dalam Tanah yang Anaerob.....	118
Gambar 3.32	Hubungan Kelarutan Fe dan Konsentrasi P di Tanah Sulfat Masam .....	121
Gambar 3.33	Nodul vivianit yang terlihat dengan (A) mikroskop dan (B) SEM. ....	121
Gambar 3.34	Nilai Kerapatan Massa Tanah Sulfat Masam Aktual (SMA) dan Tanah Sulfat Masam Potensial (SMP) pada Kondisi Tergenang dan Macak-Macak.....	125
Gambar 3.35	Nilai Kemantapan Agregat Tanah Sulfat Masam Aktual (SMA) dan Tanah Sulfat Masam Potensial (SMP) pada Kondisi Tergenang dan Macak-Macak .....	126
Gambar 4.1	Tanah Gambut yang Digunakan untuk Tanaman Palawija dan Tanaman Perkebunan .....	133
Gambar 4.2	Ilustrasi Proses Pembentukan Gambut di Daerah Tropika dengan Substratum Bahan Endapan Marine ..	139
Gambar 4.3	Stratigrafi dan Variasi Derajat Dekomposisi Gambut dari Tasek Bera, Malaysia .....	141
Gambar 4.4	Ilustrasi Proses Pembentukan Gambut Topogen yang Kemudian Membentuk Gambut Ombrogen .....	143
Gambar 4.5	Ilustrasi Fisiografi Lahan Bog (Berbentuk <i>Dome</i> ) dan <i>Fen</i> .....	144
Gambar 4.6	Ilustrasi Pola Aliran Air di Lahan Gambut di Daerah Sekitar Sungai pada Musim Hujan dan Musim Kemarau.....	150
Gambar 4.7	Pola Konsentrasi N dan P di Lahan Gambut Dangkal, Gambut Sedang, dan Gambut Tebal dengan Substratum Mineral Bahan Sulfidik.....	158
Gambar 4.8	Hubungan P dan Fe di Tanah Gambut .....	160
Gambar 4.9	Konsep Interaksi antara Fe dan P Berdasarkan Topografi Gambut .....	161

Gambar 4.10	Pohon Kelapa Sawit yang Tidak Mampu Berdiri Tegak karena Rendahnya Daya Dukung Tanah Gambut .....	172
Gambar 5.1	Ilustrasi Oksidasi Bahan Sulfidik Menghasilkan Kemasaman (Ion H <sup>+</sup> ) Akibat Pembuatan Saluran Drainase dan Cara Pengolahan Tanah yang Tidak Tepat .....	179
Gambar 5.2	Ilustrasi Sistem Handil pada Lahan Pasang Surut di Kalimantan dan Sumatra .....	187
Gambar 5.3	Ilustrasi Sistem Anjir di Lahan Pasang Surut .....	188
Gambar 5.4	Ilustrasi Sistem Garpu di Lahan Pasang Surut .....	189
Gambar 5.5	Ilustrasi Sistem Sisir di Lahan Pasang Surut .....	190
Gambar 5.6	Ilustrasi daerah yang berpotensi mengalami penurunan kualitas lahan yang disebut “titik mati” (dalam lingkaran) pada sistem sisir dan garpu di lahan pasang surut (tanda panah adalah arah aliran air).....	191
Gambar 5.7	Ilustrasi Penempatan Tabat .....	193
Gambar 5.8	Beberapa bentuk bangunan tabat (a dan b) dan model bangunan pintu air model satu arah ( <i>one way flapgate</i> ) di saluran sekunder lahan pasang surut tipe luapan B, (c) menunjukkan pintu <i>inlet</i> atau air masuk dan (d) menunjukkan pintu <i>outlet</i> atau keluar.....	195
Gambar 5.9	Ilustrasi Sistem Tata Air Satu Arah dari Tampak Atas dan Tampak Samping.....	196
Gambar 5.10	Ilustrasi Bentuk Penataan Lahan Sistem Surjan untuk Usaha Tani Berbasis Padi.....	201
Gambar 5.11	Sistem surjan dengan pola tanaman tumpang sari padi-jeruk dan padi-melon; pembuatan tukang dilakukan secara manual dan tukang yang berada di sekitar pertanaman padi .....	203
Gambar 5.12	Nilai Eh dan pH Tanah Akibat Pemberian Glukosa dan Beberapa Jenis Bahan Organik .....	204
Gambar 5.13	Dinamika Perubahan pH Tanah .....	207
Gambar 5.14	Teknologi <i>Indigeneous</i> Pengelolaan Jerami secara Sederhana ( <i>Tapulikampar</i> ) di Tanah Sulfat Masam oleh Petani Lokal Kalimantan.....	211

Gambar 5.15	Faktor-Faktor yang Memengaruhi Kebutuhan Pupuk Tanaman Padi di Tanah Sulfat Masam Lahan Pasang Surut .....	218
Gambar 5.16	Ilustrasi Konsep Teknologi PRB untuk Memperbaiki Kualitas Air Drainase di Tanah Sulfat Masam.....	221
Gambar 5.17	Konsentrasi Al dan N-total Fe dalam Air Tanah Berdasarkan Jarak Transek dari Titik Penempatan PRB yang Diamati pada Waktu yang Berbeda .....	222
Gambar 6.1	(a) Pintu Tabat dari Kayu Meranti yang Dilapisi Terpal dan (b) Pintu Tabat dari Kayu Ulin di Lahan Gambut Pasang Surut.....	229
Gambar 6.2	Sistem Drainase Dangkal untuk Budi Daya Palawija dan Sayuran di Lahan Gambut.....	230
Gambar 6.3	Parit yang Dibuat untuk Menurunkan Muka Air Tanah di Lahan Gambut.....	232
Gambar 7.1	Tanaman Padi yang Mengalami Keracunan $Fe^{2+}$ .....	246
Gambar 7.2	Fase Pertumbuhan Padi .....	251
Gambar 7.3	Produksi Gabah Kering Panen Padi Varietas Margasari dan Batanghari yang Ditanam di Tanah Sulfat Masam pada Beberapa Perlakuan Dosis Jerami .....	255
Gambar 7.4	Pola Tanam untuk Pertanaman Padi IP 200 di Lahan Pasang Surut sesuai Pola Curah Hujan di Kabupaten Barito Kuala, Kalimantan Selatan.....	263
Gambar 7.5	Skema Waktu Semai, Tanam, dan Panen pada Pola Tanam Sawit Dupa .....	265
Gambar 8.1	Model Lubang Tunggal dan Lubang Ganda.....	312

# Daftar Tabel

Tabel 1.1	Kriteria Penentuan Lahan Rawa Berdasarkan Elevasi, Iklim, dan Kemasaman Tanah.....	4
Tabel 1.2	Luas (dalam Juta Hektare) Lahan Rawa di Indonesia Menurut Berbagai Sumber Berdasarkan Laporan Hasil Survei dan Pemetaan.....	7
Tabel 1.3	Luas (dalam Juta Hektare) dan Sebaran Lahan Gambut di Tiga Pulau Besar dari Berbagai Sumber.....	8
Tabel 1.4	Luas (dalam Juta Hektare) dan Sebaran Lahan Pasang Surut, Lebak, dan Gambut di Indonesia.....	8
Tabel 1.5	Luas (dalam Juta Hektare) Lahan Rawa yang Berpotensi untuk Pertanian Padi Sawah.....	10
Tabel 1.6	Potensi Luas (dalam Juta Hektare) Lahan Rawa untuk Tanaman Hortikultura dan Tanaman Tahunan.....	11
Tabel 1.7	Luas Wilayah Rawa Berdasarkan Reklamasi/Pembukaan dan Pemanfaatannya.....	13
Tabel 2.1	Kriteria Zona Makro dalam Tata Ruang Lahan Rawa.....	17
Tabel 2.2	Tipologi Lahan Rawa.....	22

Tabel 2.3	Kandungan Kalium (K), Kalsium (Ca), Magnesium (Mg), dan Besi (Fe) dalam Air dari Saluran dan Sungai Sekitar Lahan Pasang Surut di Kabupaten Barito Kuala pada Akhir Musim Hujan (Juli 2013).....	30
Tabel 2.4	Kualitas Air Sepanjang Saluran Menuju Kolam pada Jaringan Tata Air Sistem Garpu di Tarantang, Kabupaten Barito Kuala, Kalimantan Selatan.....	34
Tabel 2.5	Kandungan Unsur Hara dan Unsur Potensial Meracun dalam Air Sungai pada Saat Pasang Purnama di Desa Belandean (Ray 5) (Pasang Surut Tipe Luapan B) dan di Daerah Terantang (T 37) (Pasang Surut Tipe Luapan C), Kabupaten Barito Kuala .....	34
Tabel 2.6	Dosis Pupuk dan Kapur Dolomit yang Diperlukan untuk Pertanaman Padi pada Lahan Lahan Pasang Surut Tipe Luapan A, B, dan C dengan Kandungan N-total 0,7%, P (bray I) 7,48 mg/kg, K-dd 0,23 (cmol/kg), dan pH Tanah 4,4 .....	35
Tabel 2.7	Tipe Lahan Lebak Berdasarkan Lama dan Tinggi Genangan.....	41
Tabel 3.1	Kriteria dan Tipe Tanah Sulfat Masam Berdasarkan Jenis dan Kondisi Pirit .....	71
Tabel 3.2	Sifat Kimia Tanah Sulfat Masam pada Beberapa DIR di Daerah Aliran Sungai (DAS) Barito .....	74
Tabel 3.3	Sifat Kimia Tanah Sulfat Masam Potensial dan Aktual di Kalimantan Berdasarkan Kedalaman Tanah .....	75
Tabel 3.4	Kadar Beberapa Mineral Fe dalam Profil Tanah dan Kondisi Redoks Lapisan Tanah Sulfat Masam Potensial, Tanah Sulfat Masam Aktual, dan Tanah Sulfat Masam Pascaaktif .....	96
Tabel 3.5	Konsentrasi Fe <sup>2+</sup> dalam Tanah Akibat Pemberian Bahan Organik .....	99
Tabel 3.6	Beberapa Sifat Kimia Tanah Sulfat Masam .....	114
Tabel 3.7	Perbandingan Sifat Fisika Tanah dan Kadar C Organik Antara Tanah Sulfat Masam Aktual dan Tanah Sulfat Masam Potensial.....	125
Tabel 4.1	Komposisi Senyawa Organik Gambut Ombrogen di Indonesia .....	148

Tabel 4.2	Sifat Kimia Tanah Gambut dari Daerah Tropika dan Boreal.....	151
Tabel 4.3	Konsentrasi dan Persentase Fe <sup>2+</sup> , Fe-organik, dan Fe-total yang Diamati pada Musim Hujan (MH) dan Musim Kemarau (MK).....	163
Tabel 4.4	Nilai BV Berdasarkan Derajat Dekomposisi Gambut dari Kalimantan.....	171
Tabel 5.1	Kadar Beberapa Unsur (me/l) dalam Air Sungai pada Saat Pasang dan Surut di Desa Tanjung Harapan dan Terantang (Tipe Luapan B) .....	197
Tabel 5.2	Arahan Penataan Lahan dan Pola Pemanfaatan Lahan untuk Pertanian Berdasarkan Tipologi Lahan dan Tipe Luapan Lahan Pasang Surut.....	200
Tabel 5.3	Persentase (%) Unsur Hara dalam Jerami Padi dan Pupuk Kandang Ayam.....	208
Tabel 5.4	Dosis Pupuk dan Hasil Tanaman Padi Varietas IR 64 pada Beberapa Tanah Sulfat Masam di Sumatra dan Kalimantan .....	219
Tabel 5.5	Dosis (kg/ha) Pupuk dan Kapur Dolomit yang Diperlukan untuk Pertanaman Padi Berdasarkan DSS Pemupukan Padi di Lahan Pasang Surut .....	220
Tabel 6.1	Pengaruh Ameliorasi Lahan terhadap Fluk CO <sub>2</sub> pada Tanah Gambut di Riau, Jambi, dan Kalimantan Tengah .....	241
Tabel 6.2	Pengaruh Ameliorasi Lahan terhadap Fluk CO <sub>2</sub> pada Lahan Gambut di Kalimantan Barat.....	242
Tabel 7.1	Produksi Padi pada Tiga Sistem Pengelolaan Air di Lahan Pasang Surut Tanah Sulfat Masam Danda Jaya, Kalimantan Selatan .....	249
Tabel 7.2	Kebutuhan Air Tanaman Padi Sesuai Tahap Pertumbuhannya .....	252
Tabel 7.3	Contoh Sistem Monokultur, Tumpang Sari, dan Tumpang Gilir Padi-Palawija dan Musim Tanam.....	268
Tabel 7.4	Jarak Tanam Monokultur Beberapa Komoditas Palawija.....	269
Tabel 7.5	Dosis Amelioran pada Tanaman Padi di Lahan Pasang Surut .....	274
Tabel 8.1	Beberapa Contoh Varietas Tanaman Palawija di Lahan Gambut.....	282

Tabel 8.2	Dosis Pupuk Urea, KCl, dan SP-36 pada Tanaman Palawija di Lahan Gambut .....	295
Tabel 8.3	Jenis dan Varietas Tanaman Sayuran di Lahan Gambut.....	298
Tabel 8.4	Hasil Analisis Tanah Lumpur di Pantai Kijing, Kalimantan Barat .....	304
Tabel 8.5	Dosis Pupuk untuk Beberapa Jenis Tanaman Perkebunan..	316

# Pengantar Penerbit

Sebagai penerbit ilmiah, Penerbit BRIN mempunyai tanggung jawab untuk terus berupaya menyediakan terbitan ilmiah yang berkualitas. Upaya tersebut merupakan salah satu perwujudan tugas Penerbit BRIN untuk turut serta membangun sumber daya manusia unggul dan mencerdaskan kehidupan bangsa sebagaimana yang diamanatkan dalam pembukaan UUD 1945.

Tanah sulfat masam dan tanah gambut adalah dua jenis tanah bermasalah yang berada pada ekosistem lahan basah (*wetland*). Kedua jenis tanah ini mulai populer sejak tahun 1970-an dengan adanya pembukaan persawahan pasang surut bersamaan dengan program transmigrasi dan selalu diperbincangkan sampai sekarang karena belum memberikan kepuasan dalam pemanfaatannya. Pada awalnya, dilaporkan produksi padi dan komoditas lainnya yang diusahakan oleh para transmigran, bahkan beberapa tanaman yang dibudidayakan, gagal tumbuh.

Buku *Sifat dan Pengelolaan Tanah Sulfat Masam dan Gambut* ini mencoba mengupas lebih detail tentang sifat kedua jenis tanah bermasalah terkait dengan pemanfaatannya untuk pertanian. Buku ini dapat dimanfaatkan peneliti, penyuluh, *civitas academica*, termasuk penyusun kebijakan dan pemangku kepentingan (*stakeholder*) yang terkait dengan bidang pertanian, perkebunan, kehutanan, perikanan, peternakan, dan lingkungan hidup sebagai pengetahuan sekaligus menambahkan khazanah pustaka tentang lahan basah secara umum dan lahan rawa khususnya.

Kami berharap hadirnya buku ini dapat menjadi referensi bacaan untuk menambah wawasan dan pengetahuan bagi seluruh pembaca. Akhir kata, kami mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu proses penerbitan buku ini.

Penerbit BRIN

# Kata Pengantar

Lahan rawa di dunia mencapai 800 juta hektare (ha) dan sekitar 38 juta ha terdapat di Indonesia. Lahan rawa di Indonesia pada umumnya terbentuk dari tanah mineral dan tanah gambut. Tanah gambut di dunia sendiri ada sekitar 424 juta ha, di antaranya sekitar 13 juta ha ada di Indonesia. Ekosistem rawa memiliki keanekaragaman hayati sangat besar sehingga disebut mega biodiversitas.

Sejarah pertanian rawa tecermin dari istilah-istilah yang kita kenal, seperti 'sawah pasang surut', 'sawah bayar', 'sawah rintak', dan 'sawah surung' di Kalimantan sudah sejak lama dan menjadi budaya (kultur) masyarakat di lahan rawa. Sesungguhnya, masyarakat lokal sudah sejak lama memanfaatkan tanah-tanah di lahan rawa untuk pertanian, baik tanah sulfat masam maupun tanah gambut. Akhir-akhir ini, penggunaan atau pembukaan lahan rawa meningkat pesat seiring dengan kebutuhan pangan dan bioenergi (*biofuel*) karena penambahan penduduk dan alih fungsi lahan dari pertanian menjadi nonpertanian, seperti jalan raya, jalan tol, permukiman, perumahan, pabrik, dan gedung sekolah/kantor atau sejenisnya.

Semestinya, pengembangan pertanian di lahan rawa mendapat perhatian lebih serius dengan makin luasnya penggunaan lahan rawa untuk pertanian pangan modern, seperti dikembangkannya *food estate*, perkebunan kelapa sawit (*oil palm estate*), perkebunan karet, nanas, jeruk, dan sebagainya. Hal ini disebabkan ekosistem rawa mempunyai sifat rapuh (*fragile*) dan rentan (*vulnerable*) terhadap adanya gejolak iklim dan lingkungan, seperti banjir pada musim hujan dan kekeringan/kebakaran pada musim kering. Dengan demikian, dapat ditarik garis lurus bahwa hal ini terjadi akibat kurang baiknya sistem penataan dan pengelolaan lahan serta lingkungan, baik dari aspek perencanaan, pencegahan, pemantauan, maupun pelaksanaan kegiatan pertanian dan lingkungannya. Sebaliknya, adanya pengelolaan yang baik menunjukkan besarnya potensi daerah rawa untuk produksi padi, misalnya Delta Mekong, dapat memproduksi padi hampir 50% untuk penduduk Vietnam, bahkan diekspor ke Indonesia.

Beberapa daerah rawa memang juga sudah terbukti menjadi sentra produksi padi, antara lain Kabupaten Barito Kuala di Kalimantan Selatan, Kabupaten Kapuas di Kalimantan Tengah, atau Kabupaten Banyuasin di Sumatra Selatan sehingga secara tidak langsung menjadi pemasok produksi beras nasional. Perkembangan ilmu pengetahuan dan inovasi teknologi dalam sistem budi daya pertanian memberikan andil cukup besar dalam meningkatkan produksi. Informasi dan pengetahuan yang lengkap tentang lahan rawa yang telah dirangkai dan dirangkum dalam buku ini kiranya dapat membantu pembaca untuk memahami tentang lahan rawa secara komprehensif sehingga diharapkan tercapai sistem pengelolaan yang baik dan berkelanjutan. Misalnya, tentang kemasaman akibat pirit yang sering menjadi masalah pertanian di lahan rawa, ini terjadi bukan hanya karena penurunan pH, tetapi juga tentang bagaimana proses besi feri ( $\text{Fe}^{3+}$ ) yang menjadi oksidan kuat. Selanjutnya, tentang tanah gambut yang kahat (defisiensi) Cu dan Zn, ini juga terkait dengan proses fisiologi tanaman sehingga berpengaruh terhadap jumlah gabah hampa. Masalah lainnya adalah apakah sifat gambut yang *hidrophobic* akibat kekeringan dapat kembali berubah menjadi *hidrophilic* sehingga dapat kembali menyimpan atau mengonservasi hara?

Sekadar mengingatkan, Proyek Pengembangan Lahan Gambut (PLG) Sejuta Hektare di Kalimantan Tengah (Mega Rice Project) tahun 1995–1999 dan Proyek Pengembangan Tanaman Pangan Terpadu Sejuta Hektare di Merauke (Merauke Integrated Food and Energy) Program Sentral Produksi Pangan Nasional Merauke (SP2NM) tahun 2008–2013 dan tahun 2015 memiliki “catatan merah” atau belum berhasil. Belum berhasilnya secara nyata kedua proyek tersebut hendaknya menjadi perhatian bahwa pengembangan daerah rawa memerlukan basis pengetahuan (sains dan teknologi) yang mumpuni, baik dari aspek teknis, sosial ekonomi, termasuk antropologi dan agribisnis, maupun lingkungan hidup.

Buku *Sifat dan Pengelolaan Tanah Sulfat Masam dan Gambut* ini menegaskan bahwa tanah-tanah di lahan rawa perlu dipahami dengan baik dan benar sehingga ke depan bisa menjadi andalan untuk memberikan hasil dan kontribusi yang memadai, menguntungkan, dan berkelanjutan. Oleh karena potensi dari lahan rawa yang cukup bahkan sangat luas ini, diperlukan sistem pengelolaan dan teknologi budi daya pertanian yang spesifik dan terpadu.

Buku ini patut dan pantas untuk dibaca para pengajar, peneliti, penyuluh, pejabat pembuat kebijakan, pemerhati, pelaksana teknis, dan pengusaha, serta para mahasiswa yang bersinggungan dengan tanah rawa dalam upaya pengembangan pertanian di lahan rawa. Semoga buku ini dapat memberikan manfaat dalam memperluas khazanah ilmu pengetahuan dan pengalaman yang perlu disadari bersama masih sangat terbatas.

Banjarbaru, 20 Februari 2024

Prof. Dr. Ir. Achmad Kurnain, M.Sc., IPM.  
Guru Besar Ilmu Tanah Fakultas Pertanian  
Universitas Lambung Mangkurat



# Prakata

Tanah sulfat masam dan tanah gambut adalah dua jenis tanah bermasalah yang berada pada ekosistem lahan basah (*wetland*). Kedua jenis tanah ini mulai populer sejak tahun 1970-an dengan adanya pembukaan persawahan pasang surut bersamaan dengan program transmigrasi dan selalu diperbincangkan sampai sekarang karena belum memberikan kepuasan dalam pemanfaatannya. Pada awalnya, dilaporkan produksi padi dan komoditas lainnya yang diusahakan oleh para transmigran, bahkan beberapa tanaman yang dibudidayakan, gagal tumbuh.

Kemudian, dilaporkan juga bahwa 40% dari lahan rawa yang dibuka pada waktu itu menjadi lahan bongkor dan ditinggalkan karena sistem pengelolaan air yang buruk. Laporan lain menyebutkan bahwa dari enam wilayah pengembangan yang merupakan tanah sulfat masam, hanya sekitar 50%–60% yang berhasil ditanami padi. Demikian juga pertanian di lahan gambut yang dilaporkan mengalami kegagalan sehingga sebagian petani transmigran terpaksa dipindahkan (relokasi) ke daerah dan lahan lain. Belakangan, baru

diketahui beberapa penyebab gagalnya usaha tani mereka, yaitu (1) keberadaan lapisan pirit yang dangkal dan (2) lapisan gambut yang tebal dan mentah. Pelajaran yang dapat dipetik dari upaya pembukaan dan pemanfaatan tanah sulfat masam dan gambut untuk pertanian memerlukan ilmu pengetahuan dan teknologi pengelolaan serta budi daya yang tepat. Perihal tersebut menarik sehingga memberikan semangat kuat kepada penyunting dan penulis untuk menghadirkan buku ini.

Buku *Sifat dan Pengelolaan Tanah Sulfat Masam dan Gambut* ini mencoba mengupas lebih detail tentang sifat kedua jenis tanah bermasalah tersebut dan hubungannya dengan pemanfaatan untuk pertanian. Buku ini dilengkapi dengan banyak foto, skema, rumus, dan gambar ilustrasi sehingga memudahkan untuk dipahami. Buku ini disusun dalam sembilan bab utama yang mengemukakan tentang potensi, sebaran, dan pentingnya lahan rawa pada Bab 1 yang ditulis oleh Muhammad Noor, Ani Susilawati, dan Dedi Nursyamsi. Kemudian, Bab 2 yang ditulis oleh Arifin Fahmi dan Muhammad Noor membahas tentang tipologi lahan rawa. Bab selanjutnya yang ditulis oleh Arifin Fahmi dan Dedi Nursyamsi menjabarkan tentang pembentukan, pencirian, dan sifat-sifat tanah sulfat masam (Bab 3) serta pembentukan, pencirian, dan sifat-sifat tanah gambut (Bab 4). Selanjutnya, Bab 5 yang ditulis oleh Arifin Fahmi dan Ani Susilawati menjelaskan tentang pengelolaan tanah sulfat masam. Bab 6 yang ditulis oleh Muhammad Noor dan Dedi Nursyamsi menyampaikan tentang pengelolaan tanah gambut. Adapun budi daya tanaman di tanah sulfat masam dijelaskan oleh Izhar Khairullah dan Muhrizal Sarwani pada Bab 7. Lalu, Izhar Khairullah dan Muhammad Saleh menjelaskan tentang budi daya tanaman di tanah gambut pada Bab 8. Terakhir, perspektif pengelolaan lahan rawa masa depan sebagai bab penutup (Bab 9) ditulis oleh Muhammad Noor dan Arifin Fahmi.

Buku *Sifat dan Pengelolaan Tanah sulfat Masam dan Gambut* ini pertama dicetak/diterbitkan oleh Penerbit Rajagrafindo Persada (2022) secara terbatas. Pada perkembangannya, penyunting dan penulis merasa perlu untuk menyebarluaskan buku ini kepada khalayak

yang lebih luas. Oleh karena itu, buku ini diajukan ke dalam Program Akuisisi Pengetahuan Lokal, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Akhirnya, setelah dilakukan beberapa perbaikan gambar, skema, foto, teks, dan penambahan Bab 9 sebagai penutup, buku ini siap diterbitkan oleh Penerbit BRIN.

Buku ini menjadi penting serta patut dimiliki dan disimak oleh para peneliti, penyuluh, *civitas academica*, termasuk penyusun kebijakan dan pemangku kepentingan (*stakeholder*) yang terkait dengan bidang pertanian, perkebunan, kehutanan, perikanan, peternakan, dan lingkungan hidup sebagai pengetahuan. Kehadiran buku ini sekaligus menambahkan khazanah pustaka tentang lahan basah secara umum dan lahan rawa khususnya.

Muhammad Noor  
Penulis



# Bab 1

## Pendahuluan

### A. Pengertian Lahan Rawa

Istilah tanah (*soil*) dalam tata nama (*nomenclature*) sumber daya lahan pertanian dibedakan dengan lahan (*land*). Tanah merupakan bagian atau komponen dari lahan. Lahan diartikan sebagai hamparan atau kawasan yang dikembangkan untuk pertanian secara umum, meliputi pertanian tanaman pangan, hortikultura, perkebunan, hutan tanaman industri, termasuk tanaman pakan ternak. Jadi, lahan mempunyai pengertian yang lebih luas di mana terbentuk atau terdiri dari komponen-komponen yang meliputi tanah, air, iklim, dan tanaman yang dibudidayakan, termasuk tanaman untuk pakan ternak. Berdasarkan faktor iklim, khususnya intensitas curah hujan dan suhu, serta letak ketinggian (elevasi) dari permukaan air laut (dpl), sumber daya lahan pertanian atau disingkat dengan lahan pertanian dibagi dalam dua kelompok besar, yaitu lahan kering (*dry land*) dan lahan basah (*wetland*).

Lahan kering dikategorikan sebagai hamparan lahan yang tidak pernah tergenang atau digenangi air pada sebagian besar waktu

dalam setahun atau sepanjang waktu. Penentuan lahan kering didasarkan pada satuan *landform*, jenis dan kelembapan tanah sehingga dibedakan antara lahan dataran tinggi dan dataran rendah, beriklim basah dan beriklim kering, serta bersifat masam dan tidak masam (BBSDLP, 2015). Adapun lahan basah dikategorikan sebagai lahan yang digenangi air, baik secara berkala maupun permanen, langsung atau tidak langsung, baik secara alami maupun buatan.

Menurut Konvensi Ramsar (Convention on Wetlands of International Importance Especially as Weterfowl Habitat) tahun 1971, lahan basah memiliki arti dan cakupan yang sangat luas, yaitu wilayah rawa, lahan gambut, dan air, baik alami maupun buatan, yang bersifat tetap atau sementara, tidak mengalir atau mengalir, bersifat asin, payau, atau tawar yang mencakup wilayah marine dan kedalamannya tidak lebih dari enam meter pada waktu surut (Dugan, 1990). Sedangkan menurut Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 27 Tahun 1991 tentang rawa, dinyatakan bahwa rawa adalah lahan genangan air secara alamiah yang terjadi terus-menerus atau musiman akibat drainase alamiah yang terhambat, serta mempunyai ciri khusus secara fisik, kimia, dan biologis. Adapun menurut PP No. 73 Tahun 2013 sebagai pengganti PP. No. 27 Tahun 1991 tentang rawa, ditetapkan pengertian lahan rawa adalah wadah air beserta air dan daya air yang terkandung di dalamnya, tergenang secara terus-menerus atau musiman, terbentuk secara alami di lahan yang relatif datar atau cekung dengan endapan mineral atau gambut, dan ditumbuhi vegetasi yang merupakan suatu ekosistem.

Istilah 'lahan rawa' lebih umum digunakan dalam bahasa Indonesia sebagai pengganti istilah 'lahan basah', khususnya untuk bidang pertanian, walaupun sebenarnya tidak semua lahan basah dapat dikategorikan sebagai lahan rawa. Lahan basah sebenarnya merupakan lahan transisi antara daratan dan perairan (sungai, danau, atau laut), yaitu antara daratan dan laut, atau di daratan sendiri antara wilayah lahan kering (*uplands*) dan sungai/danau. Berdasarkan posisinya tersebut, lahan ini selama sepanjang tahun atau dalam waktu yang panjang dalam setahun (beberapa bulan) tergenang dangkal,

selalu jenuh air, atau mempunyai air tanah dangkal. Lahan rawa mempunyai beberapa istilah dalam bahasa Inggris, antara lain *swamp land*, *marsh land*, dan *deep water land*. Sementara itu, tanah rawa juga mempunyai beberapa istilah, antara lain *submerged soils*, *flooded soil*, dan *waterlogged soils*.

Istilah *swamp* atau rawa digunakan untuk menyatakan wilayah atau area yang secara permanen selalu jenuh air, permukaan air tanahnya dangkal, atau tergenang air dangkal hampir sepanjang tahun. Air cenderung tidak bergerak atau tidak mengalir (*stagnant*). Dalam kondisi alami, rawa ditumbuhi oleh vegetasi dari jenis semak sampai pohon berkayu. Lahan rawa yang ditempati tumbuhan air atau rumput dan sejenisnya disebut *marsh*, sedangkan lahan rawa yang tergenang air dalam disebut dengan *deep water land*. Lahan rawa adalah area di mana air menjadi faktor utama yang menentukan lingkungan dan kehidupan di dalamnya, terjadi pada area dengan kondisi muka air tanah pada atau dekat permukaan, atau lahan tergenang.

Lahan rawa merupakan suatu bagian dari bentuk bentang alam pada hamparan bumi, memiliki fungsi penting bagi ekosistem global karena berperan dalam siklus biogeokimia global. Lahan rawa mempunyai nilai dan fungsi yang sangat vital, terbukti dalam beberapa dekade terakhir ini banyak kebijakan, baik nasional maupun internasional, yang dilahirkan secara khusus untuk memanfaatkan dan melestarikan lahan ini.

Dalam Pertemuan Nasional Pengembangan Pertanian Lahan Rawa Pasang Surut dan Lebak pada tanggal 3–4 Maret 1992 di Cisarua, Bogor disepakati bahwa lahan rawa dibagi dalam dua tipe, yaitu pasang surut dan lebak (Puslitbangtan, 1992). Lahan rawa pasang surut diartikan sebagai daerah rawa yang mendapatkan pengaruh langsung ataupun tidak langsung dari gerakan/luapan pasang-surutnya air laut/sungai sekitarnya, sedangkan lahan lebak diartikan sebagai lahan yang selama periode tertentu ( $\geq 1$  bulan) tergenang air dan rezim airnya dipengaruhi oleh hujan (Widjaja-Adhi et al., 2000).

Klasifikasi lahan rawa dapat didasarkan pada satuan *landform*, jenis tanah, dan kelembapan tanah (BBSDLP, 2015). Dasar yang di-

gunakan tersebut mempertimbangkan kondisi tinggi genangan atau luapan pasang yang menjadi ciri lahan rawa. Hal ini disebabkan data tentang tinggi muka air secara spasial belum tersedia. *Landform* yang tergolong lahan rawa termasuk grup bentuk lahan aluvial, marine, dan fluvial marine. Berdasarkan elevasinya, lahan rawa dibagi dua, yaitu dataran rendah dan dataran tinggi. Menurut iklim atau curah hujannya, lahan rawa juga dibagi dua, yaitu iklim basah dan iklim kering. Adapun berdasarkan kemasamannya (pH), lahan rawa kembali dibagi dua, yaitu masam (pH <5,5) dan tidak masam (pH ≥5). Pembagian ini disajikan pada Tabel 1.1.

**Tabel 1.1** Kriteria Penentuan Lahan Rawa Berdasarkan Elevasi, Iklim, dan Kemasaman Tanah

Parameter	Klasifikasi	Simbol	Kriteria
Elevasi	Dataran Rendah	DR	Elevasi < 700 mdpl
	Dataran Tinggi	DT	Elevasi > 700 mdpl
Iklim/curah hujan/kelembapan	Iklim Basah	IB	Curah hujan > 2.000 mm/tahun; rezim kelembapan tanah udik (lembap), akuik (basah)
	Iklim Kering	IK	Curah hujan < 2.000 mm/tahun; rezim kelembapan tanah ustik (kering)
Kemasaman tanah	Masam	MA	pH tanah < 5,5
	Tidak masam	TM	pH tanah > 5,5

Sumber: BBSDLP (2015)

Menurut Ponnampuruma (1977), tanah rawa (*submerged soil*) memiliki ciri unik yang dapat dikenali dengan adanya kondisi: (1) terbatasnya molekul oksigen, (2) penurunan senyawa penerima elektron dan terakumulasinya senyawa-senyawa tereduksi, (3) teroksidasinya lapisan atas tanah yang tergenang, (4) terjadinya pertukaran senyawa terlarut antara tanah dan air, (5) terjadinya akumulasi bahan organik, serta (6) adanya vegetasi air.

Berdasarkan macam dan tingkat kendala dalam pengembangan dan pengelolaan lahan, khususnya untuk pertanian, lahan rawa dibagi menjadi lima tipe, yaitu lahan potensial, lahan sulfat masam, lahan gambut, lahan salin, dan lahan lebak. Lebih lanjut, uraian tentang tipe atau klasifikasi lahan rawa, potensi, sifat dan ciri tanah sulfat masam dan tanah gambut, serta kaitannya dengan pengelolaannya akan dikemukakan secara detail pada bab-bab selanjutnya.

## **B. Potensi dan Sebaran Lahan Rawa**

Luas lahan basah di dunia diperkirakan mencapai 800 juta ha yang terdapat pada semua kondisi iklim (Reddy & DeLaune, 2008). Luas lahan rawa di Indonesia mencapai 34,12 juta ha dengan beragam kondisi menurut tata air, tanah, iklim, tutupan lahan (vegetasi), dan pemanfaatan. Lahan rawa tersebar dari ujung timur Sabang (Aceh) sampai ujung barat Merauke (Papua) melintasi sekitar 22 provinsi dan hampir 300 kota/kabupaten yang berada di Kalimantan, Sumatra, Sulawesi, dan Papua. Sebagian rawa dalam luasan yang terbatas juga ditemui di Jawa Barat, Jawa Timur, dan Jawa Tengah, umumnya di bagian pesisir pantai. Bahkan, beberapa daerah kabupaten/kota didominasi rawa, seperti Kabupaten Pelalawan (Riau), Kubu Raya (Kalimantan Barat), dan Pulang Pisau (Kalimantan Tengah) antara 50%–75% wilayah daratannya merupakan daerah rawa. Ada juga Kabupaten Mimika (Papua), Muaro Jambi (Jambi), dan Barito Kuala (Kalimantan Selatan) yang >10% luas wilayah daratannya adalah rawa (BBSDLP, 2015).

Lahan rawa di Pulau Kalimantan terdiri atas rawa pasang surut dan lebak. Lahan pasang surut membentang dari pantai barat Kalimantan Barat, pantai selatan Kalimantan Tengah dan Kalimantan Selatan, hingga pantai timur Kalimantan Timur. Adapun lahan lebak terhampar luas pada daerah aliran sungai (DAS) sungai-sungai besar dan anak-anak sungainya, seperti DAS Kapuas, DAS Kahayan, DAS Mentangai, DAS Mahakam, DAS Barito, dan DAS Nagara.

Secara administratif, lahan rawa pasang surut di Kalimantan Barat berada di Kabupaten Sambas, Kubu Raya, Pontianak, dan

Ketapang, sedangkan lahan lebak ada di Kabupaten Sambas. Di Kalimantan Selatan, lahan rawa pasang surut tersebar di Kabupaten Barito Kuala, Tanah Laut, Banjar, Tapin, Tanah Bumbu, Pulau Laut, dan Kota Banjarmasin, sedangkan lahan lebak terhampar di Kabupaten Hulu Sungai Utara, Hulu Sungai Selatan, Hulu Sungai Tengah, Tapin, Banjar, dan Tanah Laut. Di Kalimantan Tengah, lahan pasang surut tersebar di Kabupaten Kapuas, Pulang Pisau, Katingan, Kotawaringin Timur, Kotawaringin Barat, Seruyan, dan Kota Palangka Raya, sedangkan lahan lebak berada di Kabupaten Barito Selatan, Kapuas, dan Pulang Pisau. Di Kalimantan Timur, lahan rawa pasang surut tersebar di Kabupaten Paser, Panajam Paser Utara, Kutai Kartanegara, dan Kutai Timur, sedangkan lahan lebak berada di Kabupaten Kutai Kartanegara, Kotawaringin Timur, dan Kotawaringin Barat. Lahan pasang surut di Provinsi Kalimantan Utara tersebar di Kabupaten Bulungan dan Nunukan, sedangkan lahan lebak berada pada sisi-sisi danau.

Lahan pasang surut di Pulau Sumatra terbentang di sepanjang pantai timur, meliputi Riau, Sumatra Selatan, dan Jambi; serta dijumpai dalam luasan lebih sempit, seperti di Sumatra Utara, Lampung, sebagian di Aceh, Sumatra Barat, dan Bengkulu. Sedangkan di Pulau Papua, lahan rawa terhampar di sepanjang pantai selatan, meliputi Kabupaten Fakfak, pantai tenggara Kabupaten Merauke, daerah “kepala burung”, di sekeliling Teluk Berau–Bintuni dalam wilayah Kabupaten Manokwari dan Sorong, serta pantai selatan Kabupaten Kaimana. Di pulau Sulawesi, lahan pasang surut tersebar di kawasan pantai Sulawesi Selatan, Sulawesi Barat, dan Sulawesi Tenggara; serta sebagian kecil dengan luasan ribuan ha ada di Sulawesi Utara dan Gorontalo; sedangkan rawa lebak banyak terdapat di Kabupaten Sulawesi Selatan, meliputi Wajo, Sindrang, dan Sindrap. Lahan rawa juga terdapat di Kabupaten Maluku dan Maluku Utara.

Luas lahan rawa antara penulis/sumber satu dan sumber lainnya menunjukkan perbedaan. Euroconsult (1984) melaporkan, luas total lahan rawa sekitar 23,74 juta ha, sedangkan Nugroho et al. (1991) menyatakan bahwa total luas rawa sekitar 33,41 juta ha. Adapun

Laporan Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat (Puslittanak, 2000) menyatakan bahwa luas total lahan rawa sekitar 34,31 juta ha, meliputi 21,11 juta ha berupa tanah mineral dan 13,20 juta ha berupa tanah gambut. Hal ini terjadi karena perkembangan cara atau metode survei dan kemudahan akses daerah rawa yang makin baik sehingga memberikan hasil survei dan pemetaan yang berbeda. Selain itu, perbedaan kriteria yang digunakan dalam ketentuan yang disebut dengan tanah gambut atau rawa pasang surut atau lebak sehingga akan memberikan hasil luasan yang berbeda antara sumber satu dan sumber lainnya (Tabel 1.2). Adapun Tabel 1.4 menunjukkan data terbaru yang dikeluarkan Balai Besar Litbang Sumber Daya Lahan Pertanian sebagai wali data lahan (BBSDLP, 2014; 2015).

**Tabel 1.2** Luas (dalam Juta Hektare) Lahan Rawa di Indonesia Menurut Berbagai Sumber Berdasarkan Laporan Hasil Survei dan Pemetaan

Sumber	Pasang Surut	Lebak	Gambut	Jumlah
Euroconsult (1984)	3,07	11,41	9,26	23,74
Nugroho (1991)	8,23	13,28	10,90	33,41
Puslittanak (2000)	8,08	13,03	13,20	34,31

Berdasarkan Tabel 1.2, ditunjukkan total luas rawa dan luas masing-masing berdasarkan tipe lahan antara rawa pasang surut, rawa lebak, dan gambut dari sumber satu dan sumber lainnya berbeda. Khusus pada lahan gambut, apabila diperhatikan dengan lebih baik, dalam rentang waktu dari tahun 1984 sampai tahun 2000 terjadi penambahan luas, tetapi dari tahun 2001 secara bertahap terjadi penurunan luas yang sangat signifikan. Pada mulanya, luas lahan gambut Indonesia ditaksir sekitar 9,26 juta ha (Euroconsult, 1984), menjadi 10,90 juta ha (Nugroho et al., 1991), dan kemudian menjadi 13,32 juta ha (Puslittanak, 2000). Selanjutnya, dari data tahun 1980 atau lebih tepat dari tahun 1990 sampai tahun 2011, terjadi penurunan luas lahan gambut secara bertahap (Tabel 1.3).

**Tabel 1.3** Luas (dalam Juta Hektare) dan Sebaran Lahan Gambut di Tiga Pulau Besar dari Berbagai Sumber

Sumber	Sumatra	Kalimantan	Papua	Lainnya	Jumlah
Driessen (1978)	9,70	6,30	0,10	-	16,10
Euroconsult (1984)	6,84	4,93	5,46	-	17,20
Soekardi & Hidayat (1987)	4,50	9,30	4,60	< 0,1	18,40
Subagyo et al. (1990)	6,40	5,40	3,1	-	14,90
Nugroho et al. (1992)	4,80	6,10	13,20	0,1	15,96*
Radjaguguk (1993)	8,25	6,79	4,62	0,4	20,10
Dwiyono & Rahman (1996)	7,16	4,34	8,40	0,1	20,10
Wahyunto et al. (2005; 2006)	7,20	5,58	7,97	-	19,90
Anda et al. (2021)	5,85	4,54	3,01	-	13,41

\*) = termasuk gambut yang berasosiasi dengan lahan salin dan lebak 2,45 juta ha.

- = data tidak tersedia.

Berdasarkan buku Balai Besar Sumber Daya Lahan Pertanian (BBSDLP) Indonesia edisi tahun 2014, lahan rawa dipisahkan menjadi lahan pasang surut, lebak, dan gambut. Hal ini adalah sebuah kekeliruan sehingga pada edisi tahun 2015 dilakukan perbaikan di mana lahan rawa hanya dibagi menjadi lahan pasang surut dan lebak. Pada hakikatnya, lahan atau tanah gambut merupakan jenis tanah yang dapat berada di lahan pasang surut dan lebak (Tabel 1.4).

**Tabel 1.4** Luas (dalam Juta Hektare) dan Sebaran Lahan Pasang Surut, Lebak, dan Gambut di Indonesia

Pulau	Peta SDLP 2014				Peta SDLP 2015		
	Pasang Surut	Lebak	Gambut	Jumlah	Pasang Surut	Lebak	Jumlah
Kalimantan	2,30	2,94	4,78	10,02	2,99	7,04	10,03
Sumatra	2,50	3,99	6,44	12,93	3,03	9,91	12,93
Sulawesi	0,32	0,71	0,02	1,05	0,32	0,32	1,05

Pulau	Peta SDLP 2014				Peta SDLP 2015		
	Pasang Surut	Lebak	Gambut	Jumlah	Pasang Surut	Lebak	Jumlah
Papua	2,26	3,92	3,69	9,87	2,43	7,44	9,87
Maluku	0,07	0,09	0,00	0,16	0,07	0,09	0,16
Jawa	0,90	0,00	0,00	0,90	0,09	0	0,09
Jumlah	8,35	11,64	14,93	34,93	8,92	25,21	34.12

Sumber: BBSDLP (2014; 2015)

Perbedaan mencolok adalah tentang luas lebak yang pada data tahun 2014 tercatat 11,64 juta ha, sedangkan pada tahun 2015 menjadi 25,21 juta ha. Sementara itu, luas pasang surut tercatat sekitar 8,92 juta ha. Hal ini menunjukkan bahwa sebagian besar lahan gambut (14,93 juta ha) berada di lahan lebak. Berdasarkan data sebelumnya (Tabel 1.2), tampak bahwa lahan pasang surut luasnya berkisar 8,23 juta ha (Nugroho et al., 1991) atau sekitar 8,08 juta ha (Puslittanak, 2000). Perbedaan data luas tersebut dimungkinkan oleh beberapa hal, antara lain (1) perbedaan kriteria yang digunakan dalam menetapkan lahan pasang surut atau lebak karena tidak dimasukkannya data tinggi muka air permukaan dan dinamikanya sebagai faktor pembeda. Jika hanya berdasarkan *landform*, ada kemungkinan lahan pasang surut dan lebak mempunyai *landform* yang sama sehingga tidak terpetakan secara nyata perbedaan kedua lahan rawa tersebut; (2) perbedaan metode survei dan pemetaan dapat menyebabkan perbedaan pada data yang dihasilkan; serta (3) luas jelajah atau jangkauan wilayah yang dipetakan. Akibat makin terbukanya akses jalan menuju titik-titik pengamatan, makin banyak daerah yang dapat diakses dibandingkan masa-masa pemetaan sebelumnya sehingga ekstrapolasi data pengamatan makin sedikit. Dengan demikian, wilayah pemetaan yang disurvei makin teliti.

Berdasarkan laporan dari Nedeco/Euroconsult-Biec (1984), diketahui bahwa dari 39,41 juta ha lahan rawa, hanya 14,93 juta ha yang sesuai untuk pertanian. Sementara itu, BBSDLP (2015) melaporkan

bahwa dari luas 34,12 juta ha, lahan rawa yang sesuai untuk pertanian hanya sekitar 14 juta ha. Adapun lahan yang sudah dibuka oleh pemerintah/badan usaha milik pemerintah/swasta ada sekitar 3,0–3,5 juta ha, terdiri dari 0,5–1,0 juta ha yang digunakan untuk sawah atau tanaman pangan dan 2,0–2,5 juta ha dijadikan perkebunan, sedangkan sekitar 3,0 juta ha yang dibuka masyarakat secara swadaya digunakan untuk sawah dan sebagian perkebunan rakyat (BBSDLP, 2015). Tabel 1.5 menunjukkan luas lahan rawa yang berpotensi untuk pertanian padi sawah sekitar 11,38 juta ha, di antaranya dari lahan rawa tanah mineral, sementara dari lahan gambut sangat sedikit atau hampir habis. Lebih detail, Tabel 1.6 menunjukkan luas lahan yang berpotensi untuk tanaman hortikultura dan perkebunan masing-masing 1,46 juta ha dan 0,93 juta ha.

**Tabel 1.5** Luas (dalam Juta Hektare) Lahan Rawa yang Berpotensi untuk Pertanian Padi Sawah

Pulau	Tipe Lahan Rawa				Jumlah
	Pasang Surut		Lebak		
	Mineral	Gambut	Mineral	Gambut	
Kalimantan	0,567	0	2,684	0,176	2,701
Sumatra	1,656	0,173	3,620	1,402	5,022
Sulawesi	0,010	0	0,671	0	0,671
Papua	0,286	0,032	1,819	1,082	2,899
Maluku	0,011	0	0,087	0	0,098
Jumlah	2,625	0,205	8,883	2,500	11,383

Sumber: BBSDLP (2015)

Dari uraian tersebut, dapat disimpulkan bahwa sebagian pertanian telah merambat ke lahan-lahan rawa yang tidak sesuai. Dampak dari penggunaan lahan rawa yang tidak tepat akan menimbulkan bencana pada kemudian hari, yaitu kerusakan (degradasi) lahan yang sekarang sudah mulai muncul di beberapa lokasi, khususnya lahan gambut (Noor, 2016).

**Tabel 1.6** Potensi Luas (dalam Juta Hektare) Lahan Rawa untuk Tanaman Hortikultura dan Tanaman Tahunan

Pulau	Lahan Pasang Surut		Lahan Lebak		Jumlah
	Hortikultura	Tahunan	Hortikultura	Tahunan	
Kalimantan	0,111	0,048	0,418	0,427	1,004
Sumatra	0,025	0,009	0,317	0,265	0,616
Sulawesi	-	-	-	-	-
Papua	-	0,015	0,599	0,171	0,785
Jawa	-	-	-	-	-
Jumlah	0,136	0,072	1,334	0,863	2,405

Sumber: BBSDLP (2015)

### C. Pentingnya Lahan Rawa

Indonesia mempunyai kekayaan sumber daya lahan yang sangat luas dengan beragam agroekosistem, baik lahan kering maupun lahan rawa. Lahan kering terdiri dari dataran rendah, dataran tinggi, beriklim basah, beriklim kering, bersifat masam, dan tidak masam. Lahan kering terhampar seluas 144,47 juta ha. Lahan basah terdiri dari lahan nonrawa seluas 9,44 juta ha dan lahan rawa seluas 34,12 juta ha. Lahan rawa dibagi menjadi dua tipe, yaitu lahan pasang surut dengan luas 8,92 juta ha dan lahan lebak dengan luas 25,21 juta ha (Tabel 1.7). Berdasarkan jenis tanahnya, lahan pasang surut utamanya didominasi oleh dua jenis tanah, yaitu tanah gambut seluas 1,37 juta ha dan berupa tanah sulfat masam seluas 7,55 juta ha. Demikian pula di lahan lebak, utamanya berupa tanah gambut seluas 13,56 juta ha dan tanah sulfat masam seluas 11,56 juta ha (BBSDLP, 2015).

Indonesia merupakan negara besar dengan jumlah penduduk mencapai 265,2 juta jiwa pada tahun 2018 dengan laju pertumbuhan sekitar 3 juta jiwa/tahun. Sementara itu, lahan sawah sendiri sekitar 7,72 juta ha dengan tingkat laju konversi antara 50–100 ribu ha/tahun, sedangkan perluasan atau penambahan areal melalui pencetakan sawah hanya 0,1% (Noor & Maftuah, 2020). Sepuluh atau dua puluh tahun ke depan, pertanian masih mengandalkan potensi lahan yang

tersedia. Oleh karena itu, lahan rawa menjadi sangat strategis dan prospektif bagi produksi tanaman pangan dan pertanian umumnya, termasuk penghasil energi untuk bahan bakar (*biofuel* atau *biodiesel*) sekaligus sumber devisa dan berfungsi juga sebagai penyangga lingkungan.

Lahan rawa mempunyai nilai strategis karena diprediksi pada sepuluh tahun ke depan akan terjadi defisit beras di dunia. Indonesia diprediksi akan mengalami defisit jika tidak meningkatkan perluasan areal dan peningkatan produktivitas lahan pertaniannya, khususnya persawahan. Apabila tidak ada peningkatan produksi, defisit dalam lima tahun ke depan diperkirakan sebesar 1,09 juta ton dan meningkat pada tahun 2045 menjadi 12,25 juta ton. Selanjutnya, jika ditargetkan swasembada pangan tahun 2020 sampai 2045, diperlukan penambahan luas baku sawah menjadi 10,72 juta ha. Saat ini, luas baku sawah yang tersedia disinyalir sejumlah 7,72 juta ha sehingga diperlukan penambahan luas baku lahan sebesar 1,86 juta ha per tahun dan secara kumulatif diperlukan 4,98 juta ha hingga sampai pada tahun 2045 (Mamat & Noor, 2014). Penambahan luas baku lahan menjadi peluang bagi lahan rawa karena sebagian besar lahan pada agroekosistem lainnya sudah terpakai.

Lahan rawa mempunyai nilai prospektif karena terdapat sekitar 2,0–2,5 juta ha perkebunan karet dan kelapa sawit yang merupakan komoditas ekspor atau penghasil devisa negara. Beberapa pemerintah daerah menjadikan wilayahnya sebagai sentra produksi komoditas ini. Karet dan kelapa sawit dijadikan sebagai komoditas unggulan daerah, di antaranya Sumatra Utara dan Kalimantan Selatan. Pemerintah Sumatra Utara memosisikan karet sebagai komoditas unggulan daerah, sedangkan Kalimantan Selatan memilih karet dan kelapa sawit sebagai komoditas unggulan daerah. Oleh karena itu, untuk siap menghadapi tantangan ke depan dalam hal pengelolaan perkebunan di lahan rawa, dibutuhkan kebijakan pemerintah yang mendukung serta pengelolaan berkelanjutan yang ramah lingkungan.

Lahan rawa juga mempunyai nilai politis dan populis sebagai penyangga terkait dengan isu lingkungan berupa perubahan iklim

dan pemanasan global. Indonesia telah meratifikasi penurunan emisi gas rumah kaca (GRK) sebesar 31,89% secara mandiri atau 43,20% dengan bantuan negara maju sampai tahun 2030 (Imelda & Soejachmoen, 2023). Dalam hal ini, lahan rawa mempunyai nilai tawar untuk mengundang partisipasi investor lingkungan untuk menuju pengelolaannya yang berkelanjutan.

Namun, sangat disayangkan, dalam dekade terakhir ini, komitmen pemerintah dalam pengembangan lahan rawa terkesan berubah-ubah sehingga pengembangan daerah rawa mengalami pasang surut sesuai sifat dan watak dari ekosistem rawa sendiri yang dipengaruhi oleh iklim dan perubahannya. Padahal, pemanfaatan lahan rawa telah menunjukkan perannya dalam perkembangan ekonomi wilayah dan masyarakat, baik secara nasional maupun regional. Lahan rawa merupakan suatu bagian dari bentuk bentang alam pada hamparan bumi yang memiliki fungsi penting bagi ekosistem global karena berperan dalam siklus biogeokimia global. Lahan rawa mempunyai nilai dan fungsi yang sangat penting, terbukti dalam beberapa dekade terakhir, banyak kebijakan nasional maupun internasional yang dilahirkan secara khusus tentang pemanfaatan, pengelolaan, dan pelestarian lahan ini.

**Tabel 1.7** Luas Wilayah Rawa Berdasarkan Reklamasi/Pembukaan dan Pemanfaatannya

Tipologi Rawa	Reklamasi/Pembukaan (ha)			Pemanfaatan (ha)		Jumlah (ha)
	Belum Direklamasi	Reklamasi oleh		Belum	Sudah	
		Pemerintah	Masyarakat			
Pasang Surut	15.746.994	1.452.569	2.897.237	725.758	726.811	20.096.800
Lebak	11.850.255	347.431	1.099.084	120.128	227.303	13.296.770
Jumlah	27.597.249	1.800.000	3.996.321	845.886	954.114	33.393.570

Sumber: Diolah dari Birendradjana (2021)



## Bab 2

# Tipologi Lahan Rawa

Pada awalnya, lahan rawa dianggap sebagai lahan marginal sehingga cenderung tidak tersentuh, hanya dibiarkan sebagai “rawa monoton” yang selalu tergenang sepanjang tahun. Seiring dengan makin pesatnya pertumbuhan penduduk dan meningkatnya kebutuhan pangan, sementara lahan-lahan subur yang tersedia untuk pertanian makin sempit, maka mau tidak mau, suka tidak suka, lahan basah atau lahan rawa menjadi lahan alternatif untuk produksi pangan dan pertanian lainnya. Sejak tahun 1970-an, pemerintah telah melakukan pembukaan dan penggunaan lahan rawa untuk pertanian.

Berkaitan dengan nilai dan fungsi dari ekosistemnya, daerah rawa dibagi dalam dua fungsi utama, yaitu fungsi lindung dan fungsi budi daya. Fungsi lindung adalah daerah-daerah yang masih asli (*pristine*) yang perlu dan penting untuk dipertahankan, seperti hutan primer, hutan mangrove, kubah gambut, gambut tebal >3 m, habitat hewan yang dilindungi, tanaman langka, dan/atau situs budaya. Di luar dari kondisi tersebut, daerah-daerah yang potensial untuk dikembangkan sebagai kawasan produksi pertanian, perikanan, atau peternakan masuk dalam fungsi budi daya.

Lahan rawa mempunyai keberagaman, terutama dari aspek *landform*, air, tanah, dan iklim sehingga diperlukan identifikasi dan karakterisasi secara komprehensif dan terperinci. Awalnya, lahan rawa dinyatakan sebagai satu ekosistem yang seragam dan sama. Seiring dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi yang berbasis pada survei/eksplorasi, penelitian, dan pengkajian, disepakati bahwa lahan rawa dapat dipilah dalam beberapa tipe lahan berdasarkan beberapa aspek atau sudut pandang yang bersifat saintifik.

Perbedaan kriteria antara satu penulis/peneliti dan peneliti lainnya berkaitan tentang hubungan antara tipologi rawa dan faktor penentu berupa unsur hidrologi atau tinggi muka air pada saat musim hujan (genangan). Klasifikasi lahan rawa pasang surut dan lebak tidak cukup jika hanya berdasarkan *landform*, tanpa memasukkan unsur hidrologi. Misalnya, daerah *landform* rawa belakang (*backswaps*) sebetulnya tidak secara otomatis termasuk sebagai tipologi rawa lebak karena apabila memperhatikan hidrologi atau pengaruh pasang surutnya sungai/laut, sebagian *landform* tersebut termasuk dalam tipologi rawa pasang surut. Akan tetapi, sepengetahuan penulis, data spasial tentang hidrologi atau tinggi muka air memang belum tersedia.

## A. Zonasi Lahan Rawa

Pembagian atau zonasi lahan rawa dapat dilakukan atas beberapa dasar. Widjaja-Adhi et al. (1992) dan Subagyo (1997) membedakan lahan rawa berdasarkan pengaruh air pasang surut, khususnya sewaktu pasang purnama (*spring tides*) pada musim hujan di daerah aliran sungai bagian bawah (*down stream area*), menjadi tiga zona. Zonasi ini khususnya berlaku pada daerah-daerah dengan topografi landai, seperti beberapa daerah di sebagian Kalimantan dan Sumatra. Adapun pada daerah dengan topografi yang lebih curam (biasanya daerah sekitar perbukitan atau gunung yang berbatasan langsung dengan laut) zonasi tersebut dapat saja menjadi tidak berlaku. Di sisi lain, berdasarkan sifat dan fungsinya, zonasi makro rawa dapat dibagi menjadi empat zona, yaitu zona dengan fungsi lindung (*conservation management zone*), zona dengan fungsi budi daya (*development*

*management zone*), zona adaptif (*adaptive management zone*), dan zona pesisir pantai (*coastal management zone*) (Waclimid, 2012). Namun, zona makro ini masih perlu diperinci menjadi zona meso dan mikro dalam implementasinya. Walaupun demikian, pembagian lahan rawa berdasarkan kondisi pasang dan genangan menjadi lahan pantai, lahan pasang surut, dan lahan lebak juga belum dirasakan cukup sehingga diperlukan pembagian yang lebih detail lagi, yaitu menjadi tipe lahan, tipe luapan, dan tipe genangan (Balittra, 2011). Langkah awal dalam penggunaan dan pengelolaan lahan rawa agar dapat berkelanjutan adalah pembagian (zonasi) secara makro sebagaimana telah dituangkan dalam berbagai ketentuan dan kebijakan. Secara makro, lahan rawa didasarkan pada aspek fisik dan lingkungan dibagi menjadi empat zona, yaitu zona konservasi, zona pengembangan, zona adaptif, dan zona pantai (Tabel 2.1).

**Tabel 2.1** Kriteria Zona Makro dalam Tata Ruang Lahan Rawa

Zona Makro	Kriteria dalam Tata Ruang Lahan Rawa
Kawasan Konservasi	Wilayah gambut tebal (tebal >3 m), flora dan fauna spesifik, genangan dalam, dan kawasan air hitam; merupakan wilayah konservasi/cagar alam/kawasan lindung.
Kawasan Budi Daya	Wilayah tanah mineral, gambut tipis (tebal <1 m), dan tanggul sungai; merupakan wilayah pengembangan budi daya pertanian tanaman pangan/padi/palawija, sayuran, perkebunan, perikanan, dan peternakan.
Adaptif atau Budi Daya Terbatas	Wilayah gambut tengahan (tebal 1–3 m) yang berada pada posisi antara gambut tipis dan gambut tebal; merupakan wilayah penyangga, sebagian wilayah konservasi dan pengembangan budi daya pertanian dan perkebunan terbatas, seperti sagu, galam, jelutung, dan karet.
Pesisir	Wilayah pesisir pantai; merupakan wilayah penyangga, sebagian wilayah dikembangkan untuk budi daya perikanan terbatas.

Sumber: Team MP-EMRP (2008)

Berdasarkan kriteria tersebut, dibuatlah batas masing-masing zona yang merupakan arahan dalam pengelolaan dan penggunaan lahan rawa. Pembagian lahan rawa menjadi berbagai tipe lahan dan tipe luapan dan/atau genangan dalam kaitannya dengan pengelolaan dan pengembangannya untuk pertanian akan dikemukakan secara detail pada bab tersendiri.

Seperti telah dijelaskan sebelumnya, lahan rawa terdapat pada hampir semua ekosistem. Ekosistem rawa di berbagai wilayah sangat beragam sesuai kondisi geografis maupun iklim. Lahan rawa dari setiap ekosistem memiliki banyak perbedaan dengan lahan rawa pada ekosistem lainnya. Lahan rawa di daerah tropis berbeda dengan lahan rawa di daerah subtropik, lahan rawa di daerah humid berbeda dengan lahan rawa di daerah arid, bahkan lahan rawa di Kalimantan berbeda dengan lahan rawa di Sumatra meskipun masih memiliki zona iklim yang sama. Widjaja-Adhi et al. (1992) dan Subagyo (1997) mengelompokkan lahan rawa berdasarkan pengaruh air pasang, khususnya sewaktu pasang purnama (*spring tides*) di musim hujan, pada daerah aliran sungai bagian bawah (*down stream area*), menjadi tiga zona, yaitu Zona I: wilayah pasang surut air asin/payau; Zona II: wilayah pasang surut air tawar; dan Zona III: wilayah lebak (Gambar 2.1). Secara detail, ketiga zona tersebut dijelaskan oleh Subagyo (2006) sebagai berikut.

## 1. Zona I

Wilayah ini terdapat di bagian daratan yang terhubung dengan laut, khususnya di muara sungai besar dan pulau-pulau delta di wilayah dekat muara sungai besar. Wilayah ini sering kali disebut sebagai *tidal wetlands*, yaitu lahan basah yang dipengaruhi langsung oleh pasang surut air laut/salin. Bagian daratan berupa pantai yang terbuka menghadap laut lepas, pesisir pantainya berpasir halus, dan ombak langsung mencapai garis pantai. Biasanya, di sini terbentuk beting pasir pantai (*coastal dunes/ridges*), sedangkan pada daratan yang berada di belakangnya, terdapat semacam danau-danau kecil yang disebut laguna (*lagoons*). Wilayah di belakang laguna yang masih

dipengaruhi oleh air pasang melalui sungai-sungai kecil (*creeks*) biasanya ditumbuhi vegetasi mangrove (*Rhizophora* sp., *Bruguiera* sp.). Kemudian, lebih belakang dari hutan mangrove, biasanya terdapat wilayah yang mendapat pengaruh langsung atau tidak langsung dari air payau (*brackish water*) dan ditumbuhi vegetasi nipah (*Nipa fruticans*). Di belakang hutan nipah tersebut, terdapat *landform* rawa belakang (*backswamp*), wilayah ini mendapat pengaruh langsung air tawar (*fresh water*). Selanjutnya, lebih jauh ke arah daratan, terdapat *landform* cekungan/depresi berupa lahan rawa air tawar dan hutan gambut (*fresh-water swamp* dan *peat forests*). Zona ini mempunyai fisiografi lahan berupa marine pada daerah pantai dan fisiografi gambut pada bagian belakangnya,

Selanjutnya, bagian teluk atau *estuarin* yang terlindung dari hantaman ombak langsung, atau di bagian pantai yang terlindung gosong pasir (*sand spits*). Pada bagian paling depan kawasan ini, terdapat dataran lumpur tanpa vegetasi yang tenggelam saat air laut pasang dan muncul saat air laut surut yang disebut *tidal flats* atau *mudflats*. Kemudian, pada bagian daratan yang lebih tinggi letaknya, terdapat wilayah yang disebut lahan pasang surut (*tidal marsh*), atau rawa yang dipengaruhi air garam (*salt marsh*). Rawa ini sebagian atau seluruhnya masih tergenang saat air pasang.

Cakupan wilayah Zona I masuk ke arah hulu dari muara sungai, tergantung dari bentuk muara sungai yang melebar berbentuk huruf V ke arah laut. Jika bentuk *estuari* lebar dan lurus, pengaruh air asin/salin dapat mencapai sekitar 10–20 km dari muara sungai besar. Namun, apabila bentuknya relatif sempit dan sungai berkelok, pengaruh air asin/salin hanya mencapai 5–10 km dari muara sungai.

## 2. Zona II

Merupakan wilayah rawa yang merujuk ke bagian hulu sungai. Posisi wilayah ini lebih ke arah daratan/hulu, walaupun masih termasuk daerah aliran sungai bagian bawah. Pada wilayah ini, terjadi pertemuan energi sungai berupa gerakan aliran sungai ke arah laut dengan energi pasang surut yang umumnya terjadi dua kali dalam sehari (*semi*

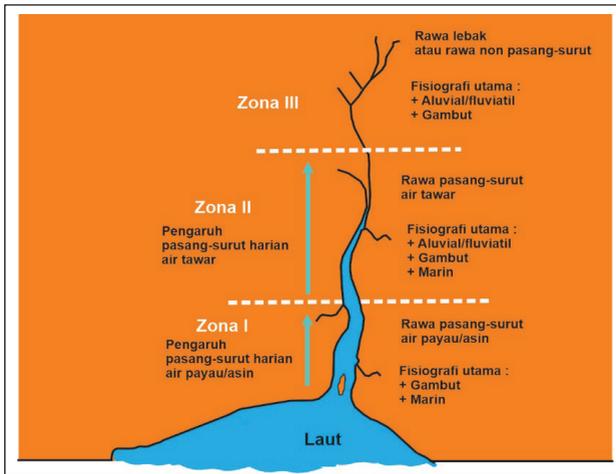
*diurnal*). Pada kondisi ini, pengaruh air tawar (*fresh water*) dari sungai menjadi lebih dominan karena sudah berada di luar pengaruh air asin/salin. Walaupun demikian, energi pasang surut masih cukup kuat, ditandai dengan masih adanya gerakan air pasang surut di sungai. Jarak jangkauan air pasang ke arah hulu atau ke daratan kiri dan kanan sungai besar dipengaruhi oleh musim, meander sungai, dan keberadaan bangunan di badan sungai tersebut. Jangkauan air pasang bertambah jauh ke arah hulu terjadi karena volume air sungai yang meningkat saat musim hujan. Saat musim kemarau, ketika volume air sungai relatif tetap atau berkurang, pengaruh air asin/salin dapat masuk sampai jauh ke pedalaman sehingga dapat mencapai jarak sejauh 40–90 km dari muara sungai pada puncak musim kemarau. Makin jauh ke arah hulu, kekuatan pasang surut makin berkurang. Batas Zona II ditandai dengan tidak ada lagi gerakan naik-turunnya air tanah sebagai pengaruh pasang surut. Jarak Zona II dari pantai tergantung dari bentuk dan lebar estuari di mulut/muara sungai dan meander sungai dapat mencapai sekitar 100–150 km dari pantai. Zona ini mempunyai fisiografi lahan berupa marine pada daerah perbatasan dengan Zona 1, kemudian aluvial pada daerah lebih ke hulu, dan fisiografi gambut pada bagian belakangnya.

### 3. Zona III

Zona ini adalah wilayah lahan rawa yang terletak lebih jauh ke arah pedalaman. Pada wilayah ini, tidak ditemukan pengaruh pasang surut air laut. Zona ini disebut juga lahan lebak/rawa pedalaman/rawa non-pasang surut. Biasanya berupa daerah aliran sungai bagian tengah pada sungai-sungai besar. *Landform*nya bervariasi, yaitu antara dataran banjir (*floodplains*) pada sungai-sungai besar yang relatif muda umur geologisnya, dataran banjir bermeander (*meandering floodplains*), bekas aliran sungai tua (*old river beds*), atau wilayah danau *oxbow* pada sungai-sungai besar yang lebih tua perkembangannya. Di wilayah ini akan ditemui pengaruh sungai yang sangat dominan berupa banjir besar yang bersifat musiman dan menggenangi dataran yang ada di kiri-kanan sungai besar. Zona ini mempunyai fisiografi lahan berupa

aluvial pada daerah tepi sungainya dan fisiografi gambut pada bagian belakangnya.

Pada kondisi tertentu, genangan banjir akan meluas. Hal ini disebabkan melambatnya aliran sungai ditambah tekanan balik arus air pasang dari muara yang mengakibatkan air sungai seakan-akan “berhenti” (*stagnant*) akibat peningkatan debit sungai selama musim hujan dan *verval* sungai atau perbedaan penurunan tanah dasar sungai yang rendah. Lama genangan pada wilayah ini sangat tergantung dari letak dan posisi lahan di *landform* sehingga genangan dapat berlangsung sekitar satu bulan sampai lebih dari enam bulan, tentunya sesuai dengan perubahan musim hujan dan kemarau.



Sumber: Diolah dari Subagyo (2006)

**Gambar 2.1** Zonasi Lahan Rawa di Sepanjang Daerah Aliran Sungai (DAS) Bagian Bawah dan Tengah

Adanya dinamika kondisi ekosistem serta banyaknya faktor yang memengaruhi ekosistem rawa telah memberikan ruang untuk terus berkembangnya sistem pembagian atau klasifikasi lahan rawa. Noor (2004) membagi lima tipe lahan rawa menjadi lima tipologi yang dapat dilihat pada Tabel 2.2.

**Tabel 2.2** Tipologi Lahan Rawa

No.	Tipologi Lama	Tipologi Baru
1.	Lahan potensial	1. Aluvial bersulfida dangkal 2. Aluvial bersulfida dalam 3. Aluvial bersulfida sangat dalam
2.	Lahan sulfat masam	4. Aluvial bersulfat dangkal 5. Aluvial bersulfat dalam 6. Aluvial bersulfat sangat dalam
3.	Lahan gambut	1. Lahan bergambut 2. Lahan gambut tipis 3. Lahan gambut sedang 4. Lahan gambut tebal 5. Lahan gambut sangat tebal
4.	Lahan salin	1. Lahan salin ringan 2. Lahan salin sedang 3. Lahan salin berat
5.	Lahan lebak	1. Lahan lebak dangkal 2. Lahan lebak tengahan 3. Lahan lebak dalam

Sumber: Noor (2004)

Berdasarkan Pertemuan Nasional tentang Pengembangan Pertanian Lahan Rawa Pasang Surut di Cisarua, Bogor pada 3–4 Maret 1992, telah disepakati bahwa lahan rawa dapat dibedakan menjadi lahan pasang surut (*tidal swamp*) dan lahan lebak (*fresh water swamp*) (Noor, 2004). Walaupun demikian, beberapa ahli telah mencoba mengelompokkan lahan rawa ke dalam berbagai kelompok ataupun tipe berdasarkan satu atau dua faktor yang dianggap paling dominan dalam menentukan pengelompokan tersebut. Pembagian kelompok ini dilakukan terhadap lahan rawa yang memiliki sifat-sifat mirip dan memiliki respons yang relatif sama pula terhadap upaya pengelolaan lahan. Widjaja-Adhi et al. (1992) dan Ismail et al. (1993) mengelompokkan lahan rawa menurut macam dan tingkatan permasalahan untuk pengembangan pertanian sebagai berikut.

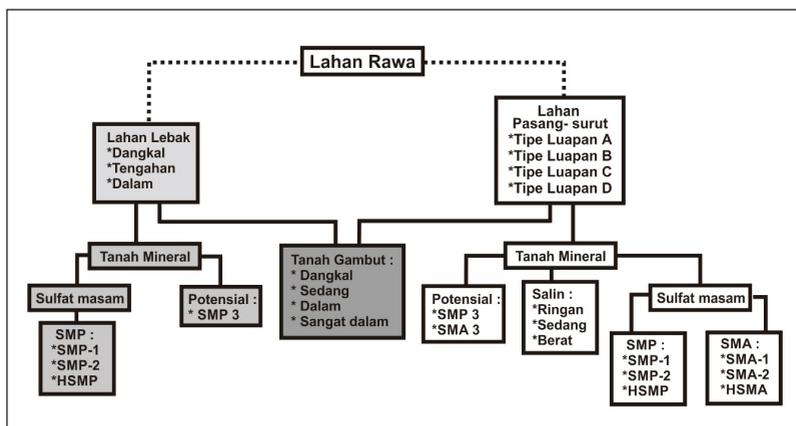
- 1) Lahan potensial adalah lahan rawa yang mempunyai jenis tanah sulfat masam potensial dengan kadar pirit <2% pada kedalaman >50 cm dari permukaan tanah.
- 2) Lahan sulfat masam adalah lahan rawa yang memiliki lapisan pirit pada kedalaman >50 cm dari permukaan tanah, disebut juga tanah sulfat masam potensial; dan jika lapisan pirit pada kedalaman <50 cm dari permukaan tanah, disebut juga tanah sulfat masam aktual.
- 3) Lahan gambut adalah lahan yang terbentuk dari bahan organik yang telah jenuh air atau telah teroksidasi dengan kandungan C-organik 12% jika fraksi mineral tidak mengandung klei; atau 18% C-organik jika fraksi mineral mengandung  $\geq 60\%$  fraksi klei.
- 4) Lahan salin adalah lahan rawa yang utamanya terdapat di sekitar pantai. Lahan ini mendapat pengaruh dari penyusupan air laut, baik secara langsung maupun tidak langsung, dapat bersifat payau, dan kandungan natrium (Na) dalam larutan tanah berkisar 8%–15%.
- 5) Lahan lebak adalah lahan rawa yang tergenang selama minimal tiga bulan dalam kurun satu tahun dengan ketinggian air 25–50 cm di atas permukaan tanah.

Sampai saat ini, belum ada sistem pembagian/klasifikasi lahan rawa yang disepakati secara umum oleh para ahli. Hal ini disebabkan sifat dan kondisi lingkungan lahan rawa sangat kompleks. Misalnya, suatu lahan gambut dapat terbentuk atau terdapat di lahan lebak atau terdapat di lingkungan lahan pasang surut. Dengan mengacu pada PP No. 73 Tahun 2013 tentang rawa, dapat disusun pembagian lahan rawa dengan memperhatikan ada-tidaknya pengaruh dari pasang surut air laut, sumber air utamanya berupa air hujan atau air laut, jenis bahan induk tanahnya, serta tingkat kendala menurut potensi pengembangannya untuk pertanian (Gambar 2.2).

Dalam pengelompokan tersebut, lahan rawa dikelompokkan dalam dua kelompok lahan utama berdasarkan rezim hidrologinya,

yaitu lahan lebak dan lahan pasang surut. Keputusan Menteri PU No. 64/PRT/1993 menerangkan bahwa lahan rawa dibedakan menjadi lahan pasang surut atau rawa pantai dan lahan non-pasang surut/pedalaman/lebak. Lahan pasang surut memiliki pengertian sebagai lahan yang dipengaruhi oleh pasang (naik) dan surutnya (turun) air laut atau sungai, baik secara langsung maupun tidak langsung. Adapun lahan lebak diartikan sebagai lahan rawa yang tidak mendapat pengaruh dari pasang-surutnya air laut atau sungai dan lebih dipengaruhi oleh air hujan. Lebih jauh, lahan lebak berdasarkan lama genangan dan tinggi genangannya dari permukaan tanah dapat dibagi menjadi tiga tipe, yaitu lahan lebak dangkal, menengah, dan dalam. Adapun lahan pasang surut berdasarkan luapan pasang dan intensitas drainasenya dapat dibagi menjadi empat tipe, yaitu A, B, C, dan D (Noorsyamsi et al., 1984; Widjaja-Adhi et al., 1992). Penjelasan empat tipe luapan pasang surut diuraikan secara lebih detail pada Gambar 2.2.

Selanjutnya, lahan lebak dan lahan pasang surut dapat kembali dibagi menurut jenis asal bahan induknya, yaitu gambut dan mineral. Pada tahapan berikutnya, pembagian kelompok lahan dibedakan berdasarkan tingkat kendala menurut potensi pengembangannya, di



**Gambar 2.2** Klasifikasi Lahan Rawa Berdasarkan pada Jenis Bahan Induk serta Tingkat Kendala Menurut Potensi Pengembangannya

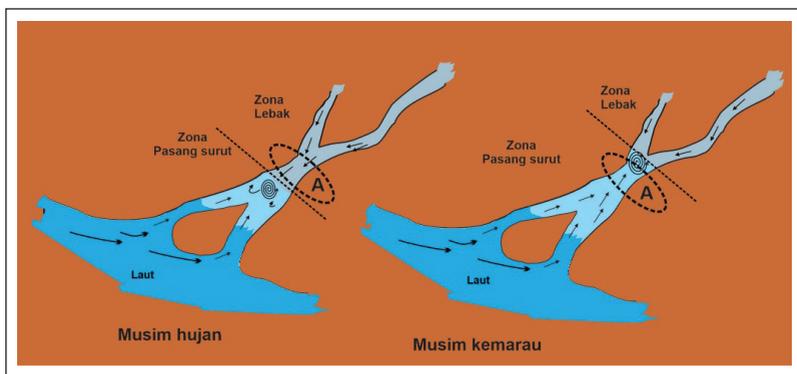
mana lahan gambut dapat terbagi menjadi gambut dangkal, sedang, dalam, dan sangat dalam. Lahan yang terbentuk dari bahan induk mineral dapat terbagi menjadi lahan sulfat masam dan potensial pada lahan lebak, sedangkan pada lahan pasang surut, dapat terbagi menjadi lahan sulfat masam, potensial, dan salin. Kemudian, secara lebih detail, berdasarkan tingkat kendala menurut potensi pengembangannya, lahan sulfat masam dan potensial dari mineral dapat dikelompokkan menjadi satu sampai tiga kelompok.

## **B. Landform Lahan Rawa**

Secara geografis, lahan rawa yang dapat dimanfaatkan untuk pertanian adalah lahan yang berada di daratan dan menempati posisi peralihan antara sungai/danau dan tanah darat (*uplands*), dapat ditemukan pada daerah depresi, cekungan-cekungan di bagian terendah lembah sungai, dataran banjir, serta sekitar wilayah pinggiran danau. Lahan tersebut tersebar pada daerah tinggi sampai dataran rendah. Lahan rawa yang terdapat di daerah tinggi dan sedang umumnya sempit, sedangkan lahan rawa yang terdapat di daerah rendah umumnya sangat luas, seperti pada dataran banjir sungai maupun wilayah pantai, khususnya di sekitar muara sungai-sungai besar.

Pada bagian sebelumnya, telah dijelaskan bahwa lahan rawa dapat dikelompokkan dalam dua kelompok lahan utama berdasarkan rezim hidrologinya, yaitu lahan lebak dan pasang surut. Berdasarkan kondisi bentang alam, sering ditemui kedua kelompok lahan tersebut berdampingan. Sebelumnya, diketahui bahwa para ahli menentukan batasan klasifikasi tipe luapan lahan pasang surut (Widjaja-Adhi et al.,1992) dan zonasi wilayah rawa (Widjaja-Adhi et al.,1992; Subagyo, 1997) pada musim hujan. Permasalahan penentuan apakah suatu daerah termasuk dalam kriteria lahan lebak atau lahan pasang surut kembali menjadi ambigu karena terjadinya pergeseran batas daerah terluapi pasang surut akibat perbedaan musim hujan dan kemarau. Dalam kondisi tersebut, salah satu cara untuk menentukan batasan antara kedua jenis lahan ini adalah dengan memperhatikan arah arus sungai. Misalnya, saat musim hujan, daerah A (berada lebih ke hilir)

hanya dilalui arus satu arah karena jumlah dan daya dorong arus air yang besar turun dari daerah hulu. Sebaliknya, pada musim kemarau, daerah A tersebut dilalui oleh arus dua arah (pasang surut) karena jumlah air dan daya dorong arus yang turun dari daerah hulu lebih kecil sehingga kekuatan arus pasang surut mampu masuk lebih jauh ke hulu (Gambar 2.3). Besarnya jumlah air dan daya dorong arus dari daerah hilir menuju hulu dapat diketahui dari jarak intrusi air laut atau payau yang masuk makin jauh ke arah hulu. Berdasarkan definisi lahan pasang surut dan lebak, dapat dinyatakan bahwa daerah A termasuk lahan pasang surut karena daerah tersebut masih mendapat pengaruh pasang surut dari air laut atau sungai, meskipun pengaruh tersebut hanya terjadi pada saat musim kemarau. Contoh daerah yang mengalami kondisi tersebut adalah Desa Tajau Landung di Kabupaten Banjar dan Desa Tanipah di Kabupaten Barito Kuala Provinsi Kalimantan Selatan. Dengan demikian, waktu terbaik penentuan batasan pasang surut dan lebak adalah saat musim kemarau.



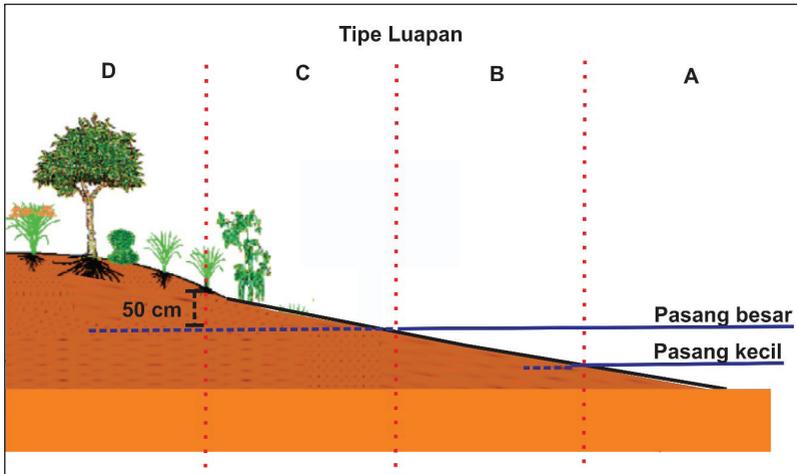
**Gambar 2.3** Ilustrasi Batas Wilayah Lahan Lebak dan Pasang Surut

Lahan pasang surut dan lebak masing-masing memiliki sifat tanah yang sangat spesifik sesuai dengan besarnya pengaruh dari banyak faktor alam yang memengaruhi pembentukannya ataupun setelah lahan tersebut terbentuk. Sebagai faktor utama yang menentukan pengelompokan kedua jenis lahan, tentulah faktor hidrologis

memiliki pengaruh yang paling besar terhadap sifat-sifat tanah pada kedua jenis lahan. Pengaruh tersebut salah satunya berupa kualitas maupun kuantitas air. Menurut Subagyo (2006), tanah-tanah di lahan lebak mempunyai kemiripan dengan tanah di lahan pasang surut air tawar. Perbedaannya terletak pada keberadaan endapan marine di lahan pasang surut, walaupun dalam beberapa penelitian terbaru, dilaporkan adanya tanah sulfat masam pada daerah non-pasang surut yang disebut *inland acid sulphate soil*, serta daerah sekitar pertambangan yang disebut *mine site acid sulphate soil* (Fitzpatrick et al., 1998).

### 1. Lahan Pasang Surut

Lahan pasang surut adalah lahan yang dipengaruhi oleh pasang dan surutnya air laut atau sungai, baik secara langsung maupun tidak langsung. Faktor hidrologis menjadi sangat penting ketika membahas sifat-sifat tanah di lahan pasang surut karena berhubungan dengan perkembangan tanah serta metode pengelolannya untuk tujuan tertentu. Pengelolaan air memiliki peranan kunci dalam menentukan tingkat keberhasilan pertanian di lahan pasang surut. Melalui kualitas maupun kuantitasnya, suatu jenis tanah yang sama dapat saja menuntut pengelolaan yang berbeda berdasarkan keberadaannya pada jenis lahan yang berbeda. Sehubungan dengan hal tersebut, berdasarkan luapan pasang dan intensitas drainasenya, lahan pasang surut dibedakan menjadi empat tipe, yaitu tipe luapan A, B, C, dan D sebagaimana digambarkan pada Gambar 2.4. Luapan pasang yang dimaksud dalam pengelompokan lahan ini adalah pasang tunggal dan pasang ganda pada saat musim hujan. Menurut Noor (2004), pasang tunggal atau pasang besar atau pasang purnama (*spring tide*) adalah pasang tertinggi yang terjadi hanya dua kali dalam satu bulan, yaitu pada bulan mati (hari pertama berdasarkan kalender qomariah) dan bulan purnama (hari ke-14), sedangkan pasang ganda atau perbani (*neap tide*) adalah pasang kecil yang terjadi dua kali dalam satu hari. Ketinggian air pada pasang kecil ini sangat bervariasi dan dipengaruhi oleh gaya gravitasi bulan terhadap bumi.



**Gambar 2.4** Ilustrasi Klasifikasi Lahan Pasang Surut Berdasarkan Tipe Luapan

Di sisi lain, seiring dengan masifnya pembangunan infrastruktur, kondisi hidrologi suatu lahan dapat berubah dengan mudah karena pembuatan saluran ataupun pembukaan lahan. Tinggi muka air di lahan dapat berubah karena adanya pembuatan saluran irigasi atau drainase. Pembuatan saluran irigasi dapat menyebabkan suatu lahan yang sebelumnya tidak terluapi oleh aliran pasang dapat menjadi terluapi karena makin lancarnya pergerakan pasang surut. Sebaliknya, suatu daerah dapat mengalami penurunan muka air tanah karena adanya pembuatan saluran drainase sehingga statusnya berubah menjadi daerah tipe luapan D dari sebelumnya tipe C karena saluran drainase yang makin lancar. Kondisi ini tentu tidak menjadi halangan dalam klasifikasi tipe luapan lahan pasang surut karena klasifikasi itu sendiri tidak membatasi terjadinya penggenangan dan drainase lahan berdasarkan proses keluar atau masuknya air ke lahan melalui saluran irigasi dan drainase yang dibuat manusia atau sungai alamiah, tetapi lebih menekankan pada intensitas terjadinya genangan dan tinggi muka air tanah. Definisi dari setiap tipe luapan lahan pasang surut dijelaskan sebagai berikut.

- 1) Lahan pasang surut tipe luapan A  
Lahan pasang surut yang selalu mendapat luapan pasang besar maupun kecil, serta mengalami drainase secara harian. Wilayah tipe luapan ini meliputi pesisir pantai dan sepanjang tepian sungai besar ataupun pada daerah-daerah yang telah memiliki saluran irigasi yang baik sehingga memungkinkan pergerakan air pasang mencapainya.
- 2) Lahan pasang surut tipe luapan B  
Lahan pasang surut yang selalu mendapat luapan hanya saat pasang besar, tetapi mengalami drainase harian. Wilayah tipe luapan ini meliputi wilayah sejauh 50–100 km ke pedalaman dari tepi sungai ataupun daerah-daerah yang berjarak <50 km dari sungai besar, tetapi kondisi saluran irigasi kurang baik sehingga memungkinkan pergerakan air pasang tidak mampu mencapainya.
- 3) Lahan pasang surut tipe luapan C  
Lahan pasang surut yang tidak mendapat luapan pasang dan mengalami pengatusan secara permanen. Pengaruh ayunan pasang di lahan hanya melalui resapan (*seepage*) dan mempunyai muka air tanah pada kedalaman <50 cm dari permukaan tanah.
- 4) Lahan pasang surut tipe luapan D  
Lahan pasang surut yang tidak mendapat pengaruh ayunan pasang sama sekali dan mengalami drainase secara terbatas. Muka air tanah mencapai kedalaman >50 cm dari permukaan tanah.

Pengelompokan lahan berdasarkan luapan pasang dan intensitas drainasenya membawa konsekuensi pada sifat atau karakteristik tanah pada tiap tipe luapan tersebut. Umumnya, secara alamiah tipe luapan A lebih subur daripada tipe luapan B. Begitu pula tipe luapan B lebih subur dibandingkan tipe luapan C dan demikian seterusnya. Salah satu faktor utama yang memengaruhi hal tersebut adalah kualitas dan kuantitas air yang berperan sebagai sumber hara sekaligus agen pelindinya senyawa meracun dari lahan. Kualitas air di lahan pasang surut sangat dipengaruhi oleh berbagai situasi dan kondisi. Beberapa faktor yang

memengaruhi kualitas air, seperti jarak dari muara sungai (Tabel 2.3) dan kondisi redoks tanah. Fluktuasi kondisi reduksi-oksidasi (redoks) tanah menentukan proses biogeokimia tanah dan air sekitar tanah sulfat masam (Karimian et al., 2018). Faktor lainnya yang memengaruhi kualitas air adalah musim (Breemen, 1975). Secara umum, kualitas air pada musim hujan relatif lebih baik daripada musim kemarau. Lebih lanjut, berdasarkan kualitasnya dalam satu musim, diketahui bahwa kualitas air pada saat puncak dan akhir musim hujan lebih baik daripada awal musim hujan. Bahkan, kualitas air pada awal musim hujan adalah yang paling rendah jika dibandingkan sepanjang tahun. Hal ini berhubungan dengan terjadinya pelindian (*leaching*) sumber-sumber kemasaman tanah melalui air hujan yang turun di awal musim setelah tanah teroksidasi secara maksimal pada musim kemarau sebelumnya. Pada saat seperti ini, biasanya petani di lahan pasang surut belum mau melakukan pertanaman karena pH tanah dan air sangat rendah dan konsentrasi unsur meracun di tanah dan air masih sangat tinggi.

**Tabel 2.3** Kandungan Kalium (K), Kalsium (Ca), Magnesium (Mg), dan Besi (Fe) dalam Air dari Saluran dan Sungai Sekitar Lahan Pasang Surut di Kabupaten Barito Kuala pada Akhir Musim Hujan (Juli 2013)

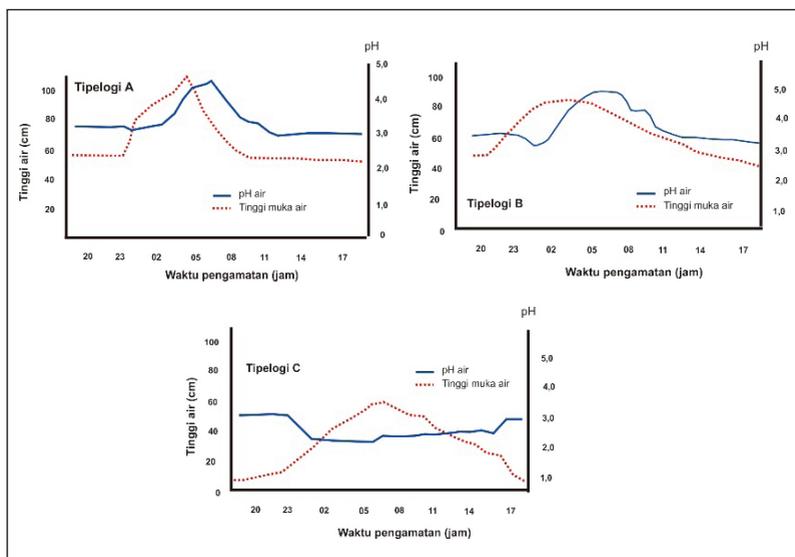
Tempat (Tipe luapan)	Unsur (ppm)			
	K	Fe	Ca	Mg
Belandean Muara (A)	3.17	16.11	1.68	16.03
Belandean (B)	1.73	5.91	5.40	4.97
Terantang (B)	4.22	4.94	2.85	10.20
Sei Bamban (C)	5.30	25.94	0.53	18.43

Sumber: Fahmi et al. (2013)

Kualitas air dalam suatu siklus pasang surut juga dipengaruhi oleh tingkatan pasang yang terjadi. Kualitas air yang baik biasanya terdapat pada saat pasang besar. Pada kondisi ini, kandungan hara dapat lebih tinggi dengan tingkat kemasaman yang rendah. Dilapor-

kan dari hasil penelitian di Jepang bahwa P yang terkandung dalam air sungai untuk irigasi berkisar 0,1–0,4 mg/l P (Miwa, 1989). Selain itu, air ini juga akan memiliki peranan yang lebih baik jika digunakan sebagai agen pelindi sumber-sumber kemasaman dan unsur meracun dalam tanah. Lebih detail lagi, kualitas air saat pasang yang terbaik juga berhubungan dengan waktu terjadinya pasang. Data penelitian Jumberi et al. (2003) menunjukkan bahwa pH air tertinggi terjadi sekitar 2–3 jam sesudah puncak pasang (Gambar 2.5).

Kualitas air yang baik saat pasang purnama biasanya dimanfaatkan oleh petani dalam suatu sistem tata air satu arah. Pada periode pasang besar, kualitas air relatif lebih baik daripada pasang harian sehingga pada saat inilah biasanya air dimasukkan ke dalam petakan sawah.



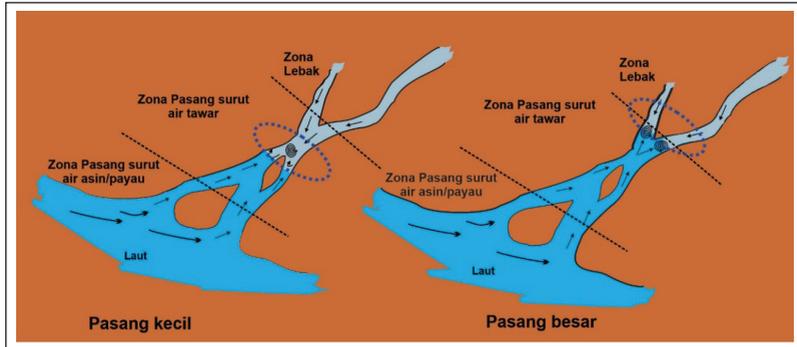
Sumber: Jumberi et al. (2003)

**Gambar 2.5** Tinggi Muka Air dan pH Air Sungai pada Daerah Pasang Surut Tipe Luapan A, B, dan C yang Diukur Selama 24 Jam

Adapun air yang sebelumnya ada di petakan akan didesak keluar oleh adanya gradien tinggi muka air. Air yang keluar dan terdesak dari petakan ini biasanya mengandung unsur meracun yang cukup tinggi dan pH yang rendah. Kandungan Fe dan aluminium (Al) pada air di saluran pembuangan sangatlah tinggi (Husson et al., 2000). Saat air mulai surut, kondisi sebaliknya terjadi, yaitu peningkatan kandungan Fe dan sulfat ( $\text{SO}_4$ ) dalam air. Hal ini menunjukkan bahwa terjadi pelindian sumber-sumber kemasaman dan unsur meracun dalam tanah melalui proses pasang-surutnya air di lahan. Adji et al. (2005) dan Anda et al. (2009) melaporkan bahwa adanya kandungan Al yang tinggi dan pH yang rendah dari air tanah dan air pada kanal di sekitar daerah yang dahulunya menjadi bagian dari pembukaan dan reklamasi lahan gambut pasang surut.

Seperti telah dijelaskan sebelumnya bahwa kualitas air di lahan pasang surut sangat dipengaruhi oleh situasi dan kondisi lingkungan pasang surut. Ini tidak hanya terkait kondisi daerah di hilir, tetapi juga di daerah hulu secara lebih spesifik. Pada daerah yang makin jauh dari muara sungai (makin ke arah hulu), kondisi lahan, seperti sifat tanah, memiliki peranan besar terhadap kualitas air sungai. Haraguchi (2007) dan Haraguchi et al. (2008) melaporkan bahwa oksidasi pirit yang terjadi pada musim kemarau di daerah sekitar kanal-kanal yang dibuat pada daerah eks-PLG telah memengaruhi kemasaman air sungai Kahayan, Kalimantan tengah. Bahkan, kemasaman air sungai Kahayan tersebut justru lebih tinggi pada saat musim hujan dibandingkan musim kemarau. Hal ini disebabkan produk oksidasi pirit yang terjadi pada musim kemarau justru lebih banyak terbawa ke sungai Kahayan pada musim hujan.

Kualitas yang baik dari air pasang juga dipengaruhi oleh kondisi hidrologis lahan secara makro pada daerah tersebut. Misalnya, kualitas air yang makin menurun dengan peningkatan jarak dari muara sungai. Pada kondisi ini, saat puncak air pasang ataupun awal pasang, kualitas air tidak berbeda, baik saat pasang maupun surut. Namun, bisa juga lebih buruk karena air yang masuk ataupun mengalir lahan di saat pasang adalah air yang sebelumnya dikeluarkan atau telah



**Gambar 2.6** Arah Aliran Air Saat Terjadi Pasang Besar dan Pasang Kecil pada Tiga Zona

menggenangi lahan sebelumnya (pergerakan arus pasang surut tidak maksimal). Kondisi ini diilustrasikan pada Gambar 2.6.

Jika kondisi ini terjadi secara terus-menerus, kesuburan tanah akan makin menurun karena tidak terjadi upaya pelindian (*leaching*) unsur meracun dari lahan, tetapi justru terjadi akumulasi senyawa meracun dan meningkatnya kemasaman tanah. Kondisi lingkungan seperti ini dapat terjadi pada daerah tipe luapan C atau B dengan sistem tata air yang buruk, kondisi sistem tata air dengan pengelolaan saluran yang buruk, atau pada sungai alami akibat pH air di dalam saluran ataupun di sungai dapat mencapai  $<3,0$ . Pada kondisi ini, biasanya tanaman seperti padi atau tanaman semusim lainnya tidak dapat tumbuh dengan normal. Bahkan, ikan yang biasanya hidup di lahan rawa akan menghilang karena menjauhi lingkungan ini. Salah satu contoh daerah yang mengalami kondisi seperti ini adalah daerah Jejangkit dan Tamban kilometer 10, Kabupaten Barito Kuala. Beberapa indikator sifat tanah yang menurun sesuai dengan pertambahan jarak yang diukur dari daerah laut dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Kualitas air yang baik juga berperan sebagai sumber hara bagi tanaman. Hasil penelitian Jumberi et al. (2003) menunjukkan bahwa kandungan hara dalam air sungai/saluran saat terjadi pasang pada tipe luapan B di sekitar Belandean, Kabupaten Barito Kuala lebih baik daripada saat surut (Tabel 2.5).

**Tabel 2.4** Kualitas Air Sepanjang Saluran Menuju Kolam pada Jaringan Tata Air Sistem Garpu di Tarantang, Kabupaten Barito Kuala, Kalimantan Selatan

Unsur	Jarak dari muara sungai (km)				
	0	2,5	4,0	5,5	7,0
pH	5,73	5,61	3,81	2,84	2,76
DHL (ds/m)	0,05	0,082	0,403	0,945	1,089
Al <sup>3+</sup> (me/l)	0,01	0,02	0,42	0,39	0,40
Fe <sup>2+</sup> (me/l)	0,03	0,04	0,01	0,31	0,53
Mn <sup>2+</sup> (me/l)	tt	tt	tt	0,02	0,02
SO <sub>4</sub> (me/l)	0,03	tt	2,32	5,35	6,91
Ca (me/l)	0,31	0,40	0,44	0,43	0,45
Mg (me/l)	0,16	0,22	0,80	1,34	1,53
K (me/l)	0,02	0,02	0,06	0,09	0,09
Na (me/l)	0,08	0,16	0,81	1,35	1,32
SiO <sub>2</sub> (mmol /l)	0,13	0,13	0,19	0,29	0,42

tt = tidak terukur

Sumber: Anwar et al. (1994)

**Tabel 2.5** Kandungan Unsur Hara dan Unsur Potensial Meracun dalam Air Sungai pada Saat Pasang Purnama di Desa Belandean (Ray 5) (Pasang Surut Tipe Luapan B) dan di Daerah Terantang (T 37) (Pasang Surut Tipe Luapan C), Kabupaten Barito Kuala

Desa	Kodisi	Unsur (me/l)						
		NH <sub>4</sub>	K	Ca	Mg	Na	Fe	SO <sub>4</sub>
Belandean	Pasang	1,23	2,74	8,64	3,11	4,01	0,01	163,7
	Surut	1,46	2,08	1,07	10,69	17,35	0,57	679,4
Terantang	Pasang	1,14	2,74	8,41	3,35	4,26	0,01	227,1
	Surut	1,42	3,77	8,64	8,25	22,2	0,39	529,8

Sumber: Jumberi et al. (2003)

Dari hasil studi literatur oleh penulis tentang pengaruh kualitas air yang baik terhadap peningkatan kandungan hara di lahan, didapatkan bahwa pada lahan pasang surut tipe luapan A terdapat potensi sumbangan N yang setara 100 kg/ha/musim urea. Pada lahan tipe luapan B, terdapat potensi sumbangan N yang setara 50 kg/ha/musim urea. Adapun pada lahan pasang surut tipe luapan A, terdapat potensi sumbangan P yang setara 56 kg/ha/musim SP-36. Hal tersebut menjadikan dosis pupuk dan kapur yang diberikan menjadi berbeda, walaupun lahan-lahan tersebut memiliki sifat tanah yang sama (Tabel 2.6).

**Tabel 2.6** Dosis Pupuk dan Kapur Dolomit yang Diperlukan untuk Pertanaman Padi pada Lahan Pasang Surut Tipe Luapan A, B, dan C dengan Kandungan N-total 0,7 %, P (bray I) 7,48 mg/kg, K-dd 0,23 (cmol/kg), dan pH Tanah 4,4

Pupuk	Takaran Pupuk dan Kapur (kg/ha) pada Tipe Luapan Lahan		
	A	B	C
Urea	150	200	250
SP-36	54	109	110
KCl	42	43	45
Dolomit	0	700	770

Sumber: Fahmi et al. (2013)

Selain kualitas air, ketinggian muka air saat pasang ataupun surut sangat dipengaruhi oleh musim dan jarak dari muara sungai atau laut. Makin jauh jarak dari muara laut atau sungai, makin rendah permukaan pasang. Wilayah yang jauh dari muara sungai atau laut juga akan memiliki ketinggian muka air yang lebih rendah saat pasang dibandingkan wilayah yang dekat dari muara sungai atau laut. Adapun pengaruh musim dapat diperhatikan dari ketinggian muka air saat pasang pada musim hujan yang relatif lebih tinggi daripada musim kemarau. Hal ini tecermin pada perbedaan tinggi muka air saat pasang di tipe luapan A antara musim hujan dan musim kemarau berkisar 30 cm, di tipe luapan B perbedaan tinggi muka air saat pasang besar

antara musim hujan dan musim kemarau berkisar 40 cm dan menjadi 70 cm saat pasang ganda (AARD & LAWOO, 1992).

Air sebagai sumber daya utama pada lahan rawa menjadi faktor kunci dalam menentukan tingkat keberhasilan pertanian di lahan rawa. Kuantitas yang terlalu sedikit menyebabkan kekeringan dan akan diikuti perubahan sifat-sifat tanah yang juga berpotensi menghambat pertumbuhan tanaman. Sebaliknya, kuantitas yang terlalu besar atau berlebihan, seperti banjir, juga akan menjadi kendala bagi pertanaman. Gradien tinggi muka air pasang dan surut dapat dipengaruhi oleh kondisi penutupan lahan, di mana pada hutan yang relatif telah gundul akan memiliki gradien yang lebih besar dibandingkan hutan yang masih alami. Rieley dan Page (2005) dan Page et al. (2006) mencatat fluktuasi tinggi muka air tanah antara musim hujan dan musim kemarau di lahan gambut pasang surut mencapai 0,2–0,6 m, bahkan dapat mencapai 2,5 m.

Dengan demikian, tingkat kesuburan tanah dan permasalahan di lahan pasang surut maupun tipe luapan lahan yang dipengaruhi oleh kualitas dan kuantitas air sangat ditentukan oleh jarak dari saluran utama atau sungai besar, sistem reklamasi atau bentuk jaringan tata air, dimensi saluran atau sungai, dan kondisi lahan di daerah hulu atau hilir, serta musim sebagai faktor utamanya.

## 2. Lahan lebak

Berdasarkan rezim hidrologinya, selain lahan rawa pasang surut, pada lahan rawa juga ditemukan lahan lebak yang sumber air utamanya berasal dari hujan. Lahan lebak (*freshwater swamp*) diartikan sebagai lahan rawa yang tidak mendapat pengaruh dari pasang-surutnya air laut atau sungai, tetapi lebih dipengaruhi oleh air hujan. Menurut Widjaja-Adhi et al. (1992) dan Subagyo (1997), lahan lebak merupakan zona ketiga yang terletak jauh ke arah hulu sungai, yaitu mendekati atau berada pada daerah aliran sungai (DAS) di bagian tengah. Di daerah ini, pengaruh pasang surut sudah tidak ada lagi, berganti dengan pengaruh sungai yang sangat dominan dari hulu menuju hilir. Lahan lebak umumnya terletak pada fisiografi cekungan dan terhampar di

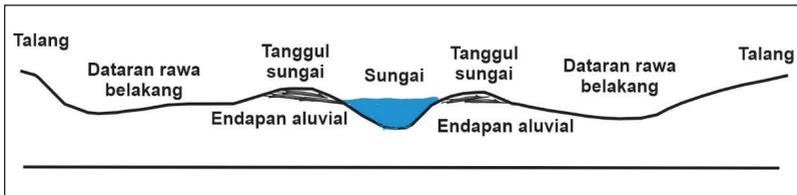
kiri dan kanan sungai-sungai besar yang sumber air utamanya dari hujan. Musim hujan menyebabkan banjir besar yang secara periodik menggenangi lahan atau banjir tahunan akibat dari volume air sungai yang sangat besar selama musim hujan bersamaan dengan tekanan balik arus pasang dari bagian hilir. Sungai di daerah ini tidak mampu menampung semua air sehingga meluap mencapai dataran banjir di sisi kiri dan kanan sungai. Selama musim hujan, lahan lebak selalu digenangi air yang kemudian secara perlahan menjadi surut seiring dengan perubahan musim.

Istilah 'lahan lebak' pertama kali digunakan di daerah Sumatra Selatan. Di Jambi, lahan lebak dikenal sebagai '*rawa payau*' dan secara umum disebut oleh masyarakat Melayu di Sumatra sebagai '*paya*' dan '*lumo*'. Di Kalimantan Timur, sawah di lahan lebak disebut '*sawah rapak*' atau '*sawah kelan*', sedangkan di Kalimantan Selatan, disebut '*sawah rintak/timur*' jika musim tanam pada awal musim kemarau, dan '*sawah surung/barat*' jika musim tanamnya pada awal musim hujan (Noor, 2004; Subagyo, 2006).

Lahan lebak sering kali didefinisikan sebagai lahan rawa non-pasang surut karena posisinya di dataran banjir sungai menyebabkan terjadinya genangan secara periodik (sekurang-kurangnya sekali dalam setahun) yang berasal dari curah hujan dan/atau luapan banjir sungai. Lahan lebak dapat mengalami genangan selama lebih dari tiga bulan dengan ketinggian genangan antara 25–50 cm atau bahkan lebih tinggi lagi. Genangan dapat terjadi lebih dari satu kali sebagai akibat dari curah hujan di hilir sungai yang memiliki dua puncak musim hujan atau dapat juga terjadi karena kondisi lingkungan di daerah aliran sungai bagian hilir sudah rusak sehingga dapat terjadi banjir di bagian hilir. Menurut PP No. 73 Tahun 2013, lahan lebak adalah rawa yang terletak jauh dari pantai dan tergenangi air akibat luapan air sungai/hujan yang menggenang secara periodik atau terus-menerus.

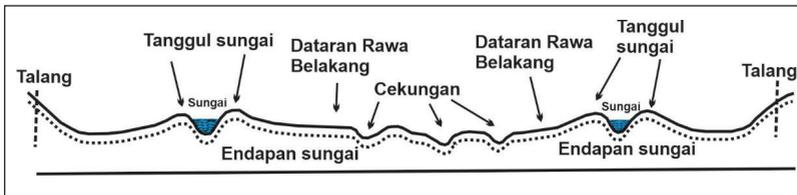
Lahan lebak terdapat pada wilayah dengan topografi atau bentuk wilayah yang hampir datar (*flat*) dengan tingkat kelerengan 1–2%, kemudian berangsur menurun membentuk cekungan (*basin*) ke arah wilayah rawa belakang, di bagian tengah menempati posisi paling

rendah. Subagyo (2006) mengilustrasikan bentuk lahan di wilayah lahan lebak dengan tiga kemungkinan satuan bentuk lahan. Pertama, satuan bentuk lahan yang dijumpai pada dataran banjir satu sungai besar (Gambar 2.7); kedua, satuan bentuk lahan yang dijumpai pada dataran banjir dua sungai besar (Gambar 2.8); dan ketiga, wilayah peralihan antara lahan lebak dan wilayah lahan pasang surut (Gambar 2.9).



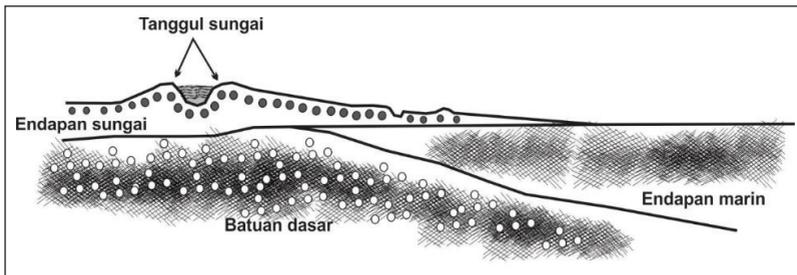
Sumber: Diolah dari Subagyo (2006)

**Gambar 2.7** Penampang Skematis Daerah Lahan Lebak pada Satu Sungai



Sumber: Diolah dari Subagyo (2006)

**Gambar 2.8** Penampang Skematis Daerah Lahan Lebak di Antara Dua Sungai Besar



Sumber: Diolah dari Subagyo (2006)

**Gambar 2.9** Penampang Skematis Daerah Lahan Lebak Peralihan Antara Lahan Lebak dan Lahan Pasang Surut (Marine)

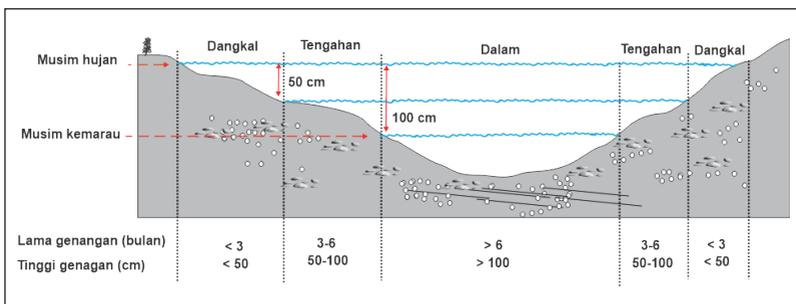
Menurut Subagyo (2006), pada lahan lebak dengan satu sungai besar (Gambar 2.7), akan ditemui bentuk-bentuk lahan berupa tanggul sungai alam (*natural levee*), diikuti dataran rawa belakang berupa wilayah cekungan yang umumnya ditempati gambut dangkal (50–100 cm) sampai gambut sedang (101–200 cm), kemudian wilayah dataran banjir sungai, sampai terakhir daerah yang disebut talang (lahan kering/*uplands*). Kondisi seperti ini umumnya dijumpai pada DAS bagian tengah ke arah hilir sungai. Tanah-tanah yang terbentuk umumnya merupakan tanah endapan sungai (aluvial atau fluviatil). Adanya lahan gambut di daerah rawa belakang biasanya tidak membentuk kubah gambut karena ukuran cekungan/depresi yang relatif kecil. Walaupun demikian, cekungan tersebut kadang hanya berisi air dan berbentuk danau berukuran kecil. Tanah yang terbentuk merupakan endapan sungai yang diendapkan setiap kali musim banjir datang dan menggenangi wilayah.

Pada lahan lebak dengan dua sungai besar (Gambar 2.8), akan ditemui bentuk-bentuk lahan yang terbentang antara dua buah sungai. Dataran banjir sungai pertama akan bersambungan dengan dataran banjir sungai kedua dan membentuk dataran rawa belakang hampir rata dan sangat luas, lebarnya dapat mencapai puluhan kilometer. Adapun pada daerah antara sungai dan daerah talang, akan ditemui bentuk lahan seperti pada daerah lahan lebak dengan satu sungai besar. Sama seperti daerah lahan lebak dengan satu sungai besar, tanah yang terbentuk juga merupakan tanah endapan sungai (Subagyo, 2006).

Daerah lahan lebak yang menjadi peralihan antara lahan lebak dan lahan pasang surut adalah lahan lebak yang dalam proses pembentukannya dipengaruhi oleh dua proses yang berbeda, yaitu antara endapan sungai yang terbentuk lebih muda umurnya dan endapan laut/marine yang telah terbentuk terlebih dahulu (Gambar 2.9). Hal ini dapat terjadi pada daerah-daerah lahan pasang surut air tawar (Zona II) dan lahan rawa non-pasang surut atau lahan lebak (Zona III). Tanah yang terbentuk di wilayah ini biasanya mempunyai dua jenis bahan induk, yaitu di bagian atas merupakan endapan sungai

sebagai bahan yang lebih muda serta bagian bawahnya berasal dari endapan marine yang mengandung bahan sulfidik. Kedalaman bahan sulfidik di daerah peralihan ini bervariasi, antara 70–150 cm atau antara 50–120 cm dari permukaan tanah (Subagyo, 2006).

Adanya pengaruh bentuk lahan dan ketinggian tempat lahan lebak berada mengakibatkan terjadinya variasi tinggi genangan air di setiap lahan dalam satu masa waktu yang sama pada suatu hamparan lahan. Wilayah yang lebih dekat arah talang akan cenderung memiliki tinggi genangan yang lebih rendah dibandingkan daerah-daerah yang berada di tengah cekungan. Posisi tersebut juga menentukan lamanya genangan akan bertahan dalam suatu periodik musim hujan. Daerah yang berada di tepian cekungan tentunya akan lebih cepat menjadi kering pada saat pergeseran musim hujan ke musim kemarau. Berdasarkan lama genangan dan tinggi genangan yang terjadi pada suatu daerah lahan lebak di musim hujan, dikenal tiga tipe lahan lebak, yaitu lebak dangkal/pematang, lebak tengahan, dan lebak dalam (Gambar 2.10).



**Gambar 2.10** Ilustrasi Klasifikasi Tipe Lahan Lebak

Secara detail, Subagyo (2006) menjelaskan pengertian ketiga jenis lahan lebak sebagai berikut.

- 1) Lebak dangkal/pematang adalah lahan lebak yang mempunyai tinggi genangan <50 cm dengan lama genangan <3 bulan atau lebih dalam setahun. Wilayah ini mempunyai topografi yang lebih tinggi dan berada paling dekat dengan tanggul sungai.

- 2) Lebak tengahan adalah lahan lebak yang mempunyai tinggi genangan antara 50–100 cm dengan lama genangan <3 bulan atau 3–6 bulan lebih dalam setahun, atau tinggi genangan >100 cm dengan lama genangan <3 bulan dalam setahun. Wilayah ini mempunyai topografi lebih rendah daripada lahan lebak dangkal dan merupakan wilayah transisi antara lahan lebak dangkal dengan lahan lebak dalam.
- 3) Lebak dalam adalah lahan lebak yang mempunyai tinggi genangan >100 cm dengan lama genangan 3–6 bulan atau >6 bulan dalam setahun, atau mempunyai tinggi genangan 50–100 cm dengan lama genangan >6 bulan dalam setahun. Wilayah ini memiliki topografi paling rendah dan biasanya berupa daerah pertengahan pada sebuah cekungan yang luas.

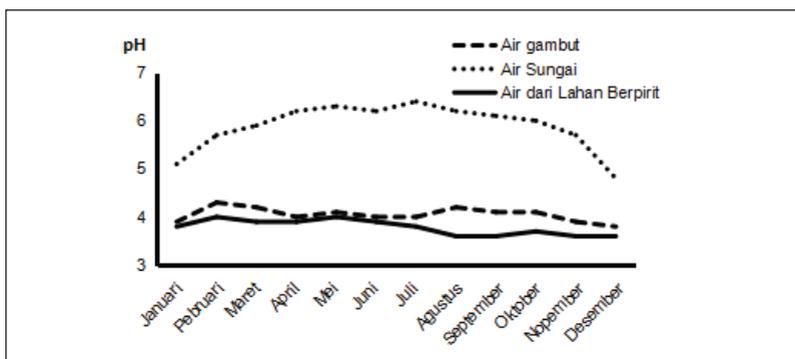
Pengertian ketiga tipe lahan tersebut dapat disederhanakan dalam bentuk sebuah tabel yang membedakan lahan lebak berdasarkan lama dan tinggi genangan (Tabel 2.7). Masing-masing tipe lahan lebak tersebut mempunyai karakteristik fisik, kimia, dan biologi, serta potensi untuk pertanian yang berbeda sehingga diperlukan penanganan atau pengelolaan yang berbeda pula. Sifat tanah pada setiap tipe lahan tersebut sangat dipengaruhi oleh sifat bahan induk yang diendapkan dan kualitas air yang menggenangi lahan. Lahan rawa lebak yang bahan induknya berasal dari tanah atau mineral yang mengandung unsur hara yang tinggi tentunya akan memiliki tingkat kesuburan tanah yang lebih baik. Tanah-tanah yang digenangi air berkualitas

**Tabel 2.7** Tipe Lahan Lebak Berdasarkan Lama dan Tinggi Genangan

Tinggi Genangan	Lama Genangan pada Lahan		
	<3 Bulan	3–6 Bulan	>6 Bulan
<50 cm	Lebak dangkal	Lebak dangkal	Lebak dangkal
50–100 cm	Lebak tengahan	Lebak tengahan	Lebak dalam
>100 cm	Lebak tengahan	Lebak dalam	Lebak dalam

Sumber: Subagyo (2006)

baik tentunya juga akan meningkatkan kesuburannya. Kualitas air yang baik salah satunya ditentukan oleh sumber atau wilayah yang telah dilewati oleh aliran air tersebut sebelum dialirkan ke lahan. Air yang telah melewati tanah gambut cenderung memiliki kandungan asam organik yang lebih tinggi, demikian pula air yang telah mengalir tanah-tanah dengan kandungan bahan sulfidik yang tinggi tentunya akan lebih bersifat masam. Sebaliknya, jika air tersebut sebelumnya telah melewati daerah-daerah yang memiliki kandungan hara terlarut tinggi, tentunya akan membawa unsur hara dan mengendapkannya di daerah tertentu. Hasil penelitian Anwar et al. (2012) menunjukkan bahwa kemasaman air sungai adalah yang paling rendah dibandingkan air dari lahan gambut dan lahan yang mengandung bahan sulfidik (Gambar 2.11).



Sumber: Anwar et al. (2012)

**Gambar 2.11** Dinamika Kemasaman Air pada Lahan Lebak

Sebagian besar lahan lebak yang berasal dari bahan induk aluvial memiliki potensi menjadi lebih subur karena adanya kandungan hara dan pH yang tinggi (mendekati netral) dalam air di kawasan rawa lebak. Walaupun demikian, sebagaimana di lahan pasang surut, faktor aliran air keluar/drainase dari lahan adalah sisi lain yang juga menjadi penentu tingkat kesuburan tanah. Lahan rawa lebak dapat saja menjadi tidak subur karena air yang telah lama menggenangi lahan tidak bisa

didrainase dari lahan karena sistem penataan lahan yang tidak tepat. Kondisi ini menjadi sangat kompleks ketika lahan yang aliran airnya stagnan adalah lahan dengan bahan induk yang berasal dari bahan marine. Salah satu contoh kasus nyata yang mengalami hal ini adalah daerah Rawa Muning, di Kabupaten Tapin, Kalimantan Selatan.

Seperti halnya lahan pasang surut, kualitas air pada dataran banjir di lahan lebak juga ditentukan oleh kondisi daerah hulu secara lebih spesifik. Kondisi lingkungan hulu sungai yang rusak dapat membawa material dari lahan tererosi dan diendapkan di wilayah-wilayah yang dilaluinya. Jika material yang diendapkan banyak mengandung logam-logam berat atau senyawa berpotensi meracun, ini dapat berpotensi mencemari lahan di daerah lebak. Kondisi seperti ini banyak terjadi pada daerah-daerah hulu sungai atau sekitar daerah aliran sungai yang dijadikan areal pertambangan. Johnson (2000; 2003) menemukan tingginya kandungan logam dan sulfur (S) yang tinggi dari air yang didrainase dari wilayah tambang dan industri. Jika logam dan sulfur yang terkandung dalam air tersebut ikut mengalir, ini dapat menyebabkan pencemaran di wilayah lebak.

Air merupakan faktor kunci yang menentukan keberhasilan pertanian ataupun tingkat kesuburan tanah, maka sumber daya alam ini juga dapat menjadi permasalahan utama di lahan lebak. Jumlah atau kuantitas yang dalam waktu tertentu sangat berlebihan tentunya akan menghambat usaha pertanian di lahan lebak. Secara alamiah, usaha pertanian paling mungkin dilakukan hanya di lahan lebak dangkal, sedangkan di lahan lebak tengahan, tanaman yang berumur lebih dari tiga bulan memiliki tingkat risiko kegagalan yang tinggi. Hal ini karena banjir atau genangan air yang bisa saja terjadi sewaktu-waktu pada musim hujan, walaupun tidak terjadi hujan yang berlebihan di daerah setempat.

Terjadinya banjir yang menghambat pengembangan dan pemanfaatan lahan lebak untuk usaha pertanian menyebabkan nilai produktivitas lahan menjadi rendah. Untuk mengurangi risiko kegagalan, tanaman yang dibudidayakan cenderung hanya tanaman musiman yang berumur pendek. Risiko kegagalan panen makin

meningkat manakala kondisi cuaca saat ini sudah hampir tidak bisa diprediksi lagi. Menurut para ahli, iklim global telah berubah. Saat lahan sudah mulai kering dan bibit tanaman sudah mulai ditanam, banjir dapat saja terjadi dengan tiba-tiba karena hujan kembali turun dengan intensitas yang tinggi di akhir musim hujan.

Lahan rawa adalah salah satu bentang alam yang memiliki tingkat kemiringan sangat rendah. Lahan ini dapat dikatakan datar dan terhampar luas, mulai dari daratan yang berbatasan dengan laut (dapat berupa daerah pantai) sampai wilayah di sekitar kaki-kaki bukit atau pegunungan. Bentuk fisiografi ini memungkinkan terjadinya proses pengendapan bahan-bahan dari hulu dan/atau hilir yang utamanya diawali pada daerah-daerah cekungan. Berdasarkan jenis material bahan induk yang menjadi penyusun utama tanah-tanah di lahan rawa, material yang diendapkan di lahan rawa dapat berasal dari bahan organik dan mineral yang dapat berasal dari endapan sungai ataupun endapan marine. Menurut Noor (2004), lahan rawa terdiri atas tiga kelompok utama, yaitu tanah gambut (*peat soils*), tanah sulfat masam (*acid sulphate soils*), dan tanah aluvial non-sulfat masam (termasuk dalam kelompok ini adalah tanah salin).

Pengelompokan lainnya dapat berdasarkan jenis bahan induk, yaitu bahan endapan mineral marine dapat membentuk tanah-tanah mineral, seperti tanah sulfat masam, potensial, dan salin. Adapun endapan yang berasal dari bahan organik membentuk tanah gambut. Bahan-bahan tersebut diendapkan sejak ribuan tahun silam dan sampai sekarang masih terus berlangsung. Secara umum, tanah mineral yang terdapat di wilayah rawa seluruhnya merupakan endapan bahan halus berupa debu halus dan lumpur yang diendapkan air pasang dan ditambah dengan bahan aluvium yang dibawa ke muara oleh air sungai. Oleh karena itu, tanah yang terbentuk semuanya merupakan tanah aluvial basah yang di permukaannya bisa saja terdapat lapisan gambut tipis (<20 cm) atau agak tebal (20–50 cm). Tanah-tanah dengan ketebalan lapisan gambut antara 20–50 disebut tanah mineral bergambut (*peaty soils*).

## Bab 3

# Tanah Sulfat Masam

Bentuk fisiografi lahan rawa yang hampir datar memungkinkan terjadinya proses pengendapan bahan-bahan aluvium yang dibawa dari hulu atau hilir dengan perantara air pasang. Proses pengendapan yang bermula sejak ribuan tahun silam sampai sekarang masih terjadi. Berdasarkan jenis material bahan induk yang menjadi penyusun utama tanah-tanah di lahan rawa, material yang diendapkan di lahan rawa dapat berasal dari bahan organik dan mineral yang dapat berasal dari endapan sungai ataupun endapan marine. Bahan endapan mineral marine dapat membentuk tanah-tanah mineral, seperti tanah sulfat masam dan salin, sedangkan endapan yang berasal dari bahan organik akan membentuk tanah gambut. Menurut Noor (2004), salah satu dari tiga kelompok utama jenis tanah di lahan rawa adalah tanah sulfat masam.

Secara umum, tanah sulfat masam merupakan terminologi untuk tanah atau sedimen yang mengandung mineral Fe sulfida (bahan sulfidik), terutama pirit, atau senyawa-senyawa hasil ataupun yang dipengaruhi oleh transformasi mineral sulfida, seperti bahan sulfurik dan monosulfidik. Menurut Indraratna et al. (1999), tanah

sulfat masam adalah tanah atau sedimen yang terdapat di sekitar pantai atau dataran banjir yang mengandung bahan sulfidik yang telah teroksidasi ataupun berpotensi teroksidasi. Secara lebih teknis, Dent dan Pons (1995) menyatakan bahwa tanah sulfat masam adalah tanah-tanah yang mengandung bahan sulfidik yang ketika teroksidasi menghasilkan asam sulfat dan secara potensial dapat menimbulkan masalah ketika melebihi daya sangga tanah.

Tanah sulfat masam secara ilmiah baru dikenal pada abad ke-18 (1735) ketika Linnaeus menyampaikan sebuah istilah untuk bahan tanah dalam bahasa Belanda, yaitu *argilla vitriolacea* yang berarti 'klei dengan asam sulfat' (Pons, 1973). Istilah *acid sulfate soil* yang berarti 'tanah sulfat masam' menjadi lebih populer pada saat diselenggarakannya simposium tanah sulfat masam pertama di Wageningen, Belanda oleh International Land Reclamation Institute (ILRI). Dalam kesempatan tersebut, tanah sulfat masam didefinisikan oleh Pons (1973) sebagai "semua bahan dan tanah sebagai akibat dari proses pembentukan tanah, baik yang akan menghasilkan, sedang dalam proses menghasilkan, maupun telah dihasilkan asam sulfat dalam jumlah yang mampu memengaruhi karakteristik utama tanah".

Tanah sulfat masam juga dikenal dengan sebutan '*cat clay*' yang berasal dari kata *kattekleigronden* (bahasa Belanda), *cat clay soil* (bahasa Inggris), atau *mainbolt* dalam bahasa Jerman, diartikan sebagai *klei* yang berwarna kelabu dengan bercak kuning pucat (Fanning, 2006). Bercak kuning ini merupakan senyawa hasil (produk) oksidasi pirit yang sering disebut mineral jarosit. Istilah tanah sulfat masam digunakan karena berkaitan dengan adanya bahan sulfidik yang terkandung di dalamnya. Bahan ini jika teroksidasi menghasilkan asam sulfat sehingga menyebabkan tanah menjadi masam sampai sangat masam (pH 2,0–3,0). Dalam konteks perkembangan tanah (*pedogenesis*), tanah sulfat masam merupakan endapan marine yang mengalami perubahan secara bertahap (pematangan). Kondisi hidrologis lahan yang disertai dengan proses pencucian/pelindian, khususnya pada kawasan tropika, sangat menentukan tinggi-rendahnya kadar atau sifat bahan sulfidik dari tanah sulfat masam yang terbentuk (Pons et al., 1982).

## A. Pencirian dan Pembentukan Tanah Sulfat Masam

### 1. Pencirian Tanah Sulfat Masam

Tanah sulfat masam merupakan endapan marine dengan pencirian salah satu atau beberapa hal berikut, yakni (1) mengandung bahan sulfidik, (2) memiliki horizon sulfurik, (3) terdapat bercak jarosit, serta (4) mengandung bahan penetral berupa karbonat atau basa tukar lainnya. Beberapa pencirian tersebut dapat dilihat secara kasatmata dalam lapisan tanah sulfat masam (Gambar 3.1).

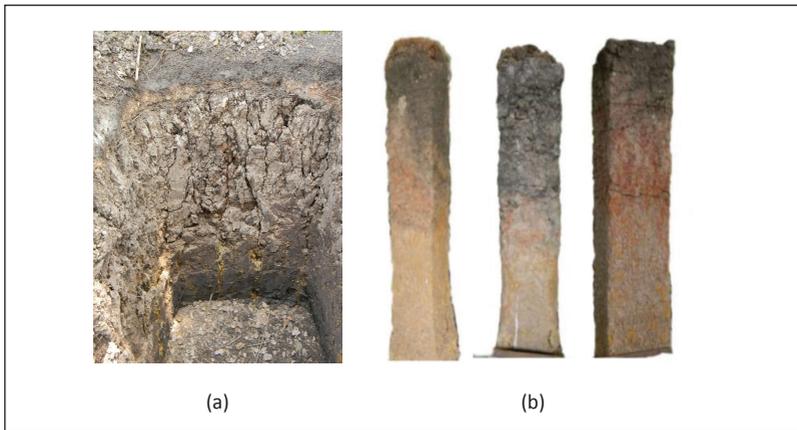


Foto: (a) Arifin Fahmi (2016); (b) Arifin Fahmi (2014)

**Gambar 3.1** Contoh Profil dan Monolit Beberapa Sub-Grup Tanah Sulfat Masam

#### a. Bahan Sulfidik

Bahan sulfidik (*sulphidic material*) adalah bahan tanah mineral yang banyak mengandung mineral Fe monosulfida ( $\text{FeS}$ ), seperti makinawit (*mackinawite*), greigit (*greigite*), dan Fe monosulfida-amorf, dan/atau mineral Fe disulfida ( $\text{FeS}_2$ ), seperti pirit (Fitzpatrick et al., 1996; Keene et al., 2011). Pirit adalah salah satu mineral Fe sulfida yang paling dominan pada tanah sulfat masam. Selain itu, terdapat juga mineral lainnya, seperti markasit, makinawit, greigit, schwertmannit (*schwertmannite*), dan Fe monosulfida lainnya dalam jumlah yang

lebih sedikit (Bush, 2000; Bush et al., 2000; Bush & Sullivan, 1997; Mosley et al., 2014; Sullivan & Bush, 1997). Istilah 'pirit' berasal dari kata 'pyros' dalam bahasa Yunani yang berarti api. Kata ini digunakan sebagai gambaran adanya percikan bunga api ketika mineral tersebut dipukul (Borda, 2006).

Pirit adalah mineral sulfida yang paling umum di bumi (Rickard & Luther III, 2007) dan salah satu produk akhir dari proses reduksi  $\text{SO}_4$  (Lamontagne et al., 2004). Pirit didefinisikan sebagai bahan mineral dari tanah mineral atau organik yang apabila diinkubasi dalam kondisi lapang dan pada suhu kamar selama 8 minggu, nilai pH-nya akan turun minimal 0,5 unit menjadi  $\leq 4,0$  (Soil Survey Staff, 2014; 2022). Menurut Shand et al. (2018), bahan sulfidik dapat dibagi menjadi (1) *hypersulfidic*, yaitu bahan sulfidik yang jika teroksidasi menyebabkan pemasaman tanah yang sangat berat (pH <4) dan (2) *hyposulfidic*, yaitu bahan sulfidik yang jika teroksidasi tidak menyebabkan pemasaman tanah yang sangat berat. Menurut Paynea dan Stolt (2017), penggunaan istilah bahan *hypersulfidic* dan *hyposulfidic* dalam taksonomi tanah harus menjadi pertimbangan untuk perubahan dalam sistem klasifikasi tanah di masa depan.

Di lapangan, pirit dapat ditemui pada lapisan tanah yang belum teroksidasi. Pada lapisan tersebut, pirit tergabung dengan jaringan sisa-sisa akar mangrove atau tersebar dalam matriks tanah. Lapisan tanah yang mengandung pirit berwarna gelap/hitam (hue 10YR, 2,5Y, 5Y, N, dan 5GY; kroma 1) (Subagyo, 2006) sebagaimana ditampilkan pada Gambar 3.2. Adapun menurut IUSS Working Group WRB (2006), pada kondisi lembap atau basah di lapangan, deposit yang mengandung pirit menunjukkan kilauan emas yang jika dilihat berdasarkan buku *Munsell Soil Colour Charts*, berada pada kisaran hue N, 5 Y, 5 GY, 5 BG, atau 5 G; value 2, 3, atau 4; serta chroma selalu 1. Warna yang terlihat tersebut bersifat tidak stabil karena akan bertambah gelap seiring terjadinya oksidasi. Klei yang mengandung mineral ini biasanya bersifat mentah.

Secara umum, kandungan pirit yang terdapat dalam tanah sulfat masam berkisar antara 0,01%–15% (Fitzpatrick et al., 1998) atau

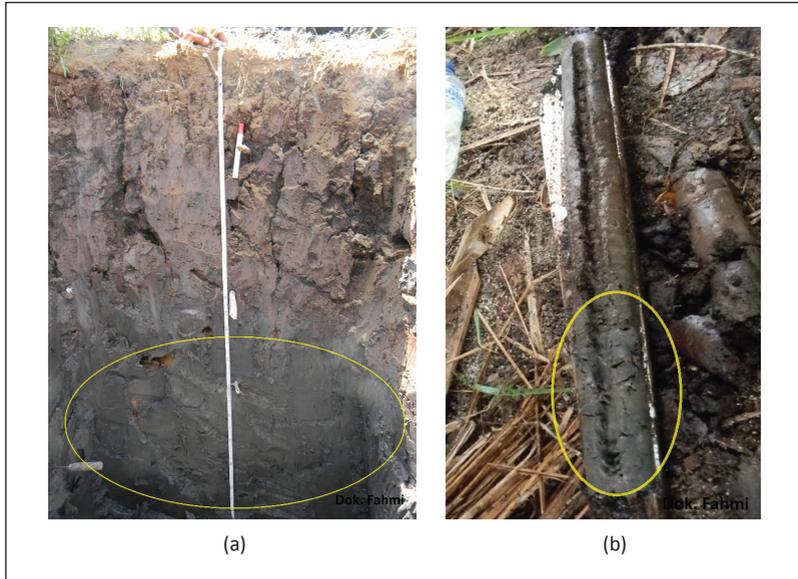


Foto: (a) Arifin Fahmi (2016); (b) Arifin Fahmi (2007)

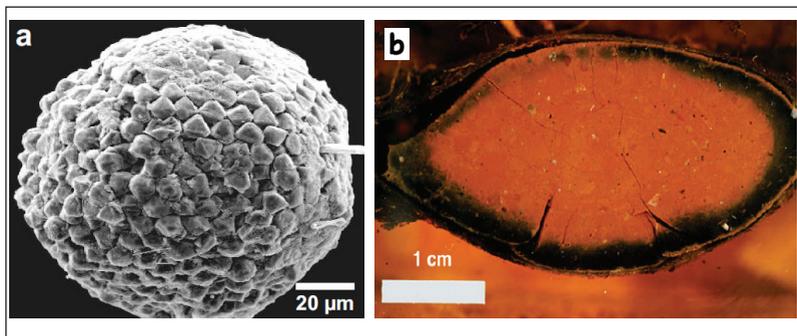
**Gambar 3.2** Lapisan Tanah yang Mengandung Bahan Sulfidik pada Profil dan Hasil Pengeboran Tanah Sulfat Masam

dapat mencapai 6%–7% (berdasarkan berat) dan kandungan yang paling umum bervariasi antara 1%–4% (Breemen, 1973). Adapun Pons (1970) mengajukan pengelompokan persentase kandungan pirit dalam tanah sulfat masam, yaitu sedikit (*few*): <1,20%, umum (*common*): 1,21%–2,40%, banyak (*many*): 2,41%–4,50%, dan sangat banyak (*abundant*): >4,50%.

Pirit adalah salah satu mineral yang merupakan produk akhir dari proses reduksi  $\text{SO}_4$  (Lamontagne et al., 2004). Proses pembentukan bahan sulfidik disebut sebagai sulfidisasi (*sulfidization*). Secara detail, Fanning et al. (2017) menjelaskan bahwa sulfidisasi adalah serangkaian proses terbentuknya dan terakumulasinya mineral sulfida (terutama Fe sulfida) dalam lapisan tanah yang anaerob. Pirit berbentuk kristal dan memiliki variasi dalam hal struktur, kristalinitas, serta kandungan unsur ikutannya yang berpengaruh pada reaktivitasnya (Nordstrom

& Southam, 1997). Pirit utamanya berbentuk oktahedron kristalin dengan kristal tunggalnya dapat berukuran  $<1-9 \mu\text{m}$  (Subagyo, 2006),  $0,2-2,0 \mu\text{m}$ , atau rata-rata  $0,5 \mu\text{m}$  (Luther III et al., 1982). Menurut Rickard (1975), pirit kristal tunggal terbentuk karena proses kristalisasi yang terjadi secara cepat. Jika diamati menggunakan mikroskop polarisasi dengan cahaya biasa (normal) dan terpolarisasi, kristal-kristal pirit terlihat berwarna hitam/opak. Selain berbentuk kristal tunggal oktahedron, kristal tunggal dapat bergabung membentuk agregat lonjong (*elliptical*) atau membulat (*spherical*) yang padat dan disebut 'framboid' (Gambar 3.3), dengan ukuran yang lebih besar ( $5-20 \mu\text{m}$ ) (Luther et al., 1982). Rata-rata diperlukan waktu 5 hari dalam pembentukan framboidal pirit dengan ukuran  $\sim 6 \mu\text{m}$  (Rickard, 2019). Menurut Wilkin dan Barnes (1996) serta Schoonen et al. (2004), bentuk framboidal sebagai bentuk pirit dominan yang terbentuk melalui mineral Fe monosulfida.

Besi adalah salah satu faktor kunci dalam pembentukan pirit. Mineral Fe sulfida dapat berbentuk monosulfida dan disulfida. Pirit dapat terbentuk melalui reaksi sulfida dengan fase-fase mineral lain yang mengandung Fe, seperti fougerit (*green rust*), gutit, hematit, atau makinawit (Rickard & Luther III, 2007). Keberadaan mineral sulfida, seperti pirit, menjadi salah satu pencirian tanah sulfat masam.



Sumber: (a) Ohfuji et al. (2006); (b) Faning et al. (2010)

**Gambar 3.3** Bentuk mineral pirit framboidal menggunakan (a) *scanning electron microscopy* (SEM) dan (b) *thin section* framboidal pirit.

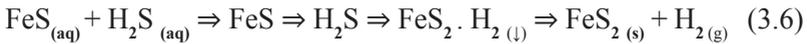
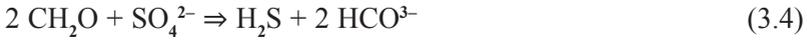
Pirit adalah bentuk mineral Fe sulfida paling umum yang terbentuk melalui serangkaian proses biogeokimia yang sangat kompleks. Pembentukan pirit dapat melalui tahapan reduksi  $\text{SO}_4$  sebagaimana dinyatakan sebelumnya. Menurut Fitzpatrick et al. (1998), Rabenhorst et al. (2006), dan Kraal et al. (2013), setidaknya ada lima faktor yang diperlukan dalam pembentukan Fe sulfida di tanah sulfat masam, yaitu  $\text{SO}_4$  terlarut dengan konsentrasi  $>10$  mg/l, bahan organik yang mudah terdekomposisi, Fe reaktif, kondisi anaerob, dan bakteri pereduksi  $\text{SO}_4$ . Setiap komponen tersebut dapat menjadi faktor pembatas dalam reaksi atau proses pembentukan mineral pirit. Pembentukan pirit yang diawali dari reduksi  $\text{Fe}^{3+}$ -oksida dalam sedimen dan  $\text{SO}_4$  dalam air oleh bakteri menghasilkan ion  $\text{Fe}^{2+}$  dan sulfida terlarut, seperti  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{S}^{2-}$  dan  $\text{HS}^-$  (Berner, 1964; 1970; Dent & Pons, 1995).

Pirit dapat terbentuk melalui sejumlah jalur yang melibatkan  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{S}_{(0)}$ , polisulfida, greigit,  $\text{Fe}^{2+}$ , atau gutit. Namun, pembentukan pirit yang diawali pembentukan Fe monosulfida adalah yang paling umum terjadi. Selanjutnya, menurut Burton et al. (2011), saat ini ada dua jalur pembentukan pirit yang dapat diterima di kalangan banyak peneliti, yaitu melalui polisulfida dan  $\text{H}_2\text{S}$  sebagaimana persamaan reaksi berikut.

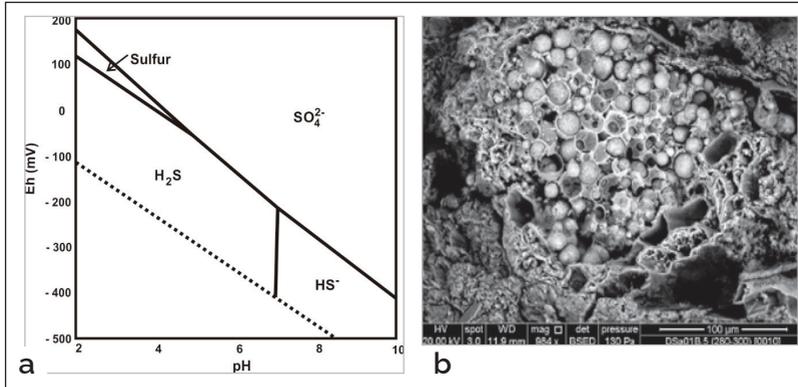


Pada kondisi yang alamiah, laju pembentukan pirit sangat lambat. Menurut Dent (1986), laju pembentukannya hanya berkisar 1% (berdasarkan berat kering) untuk seratus tahun atau hanya sekitar 10 kg/ $\text{m}^3/100$  tahun. Lebih detail, Kraal et al. (2013) menghitung kecepatan pembentukan pirit, yaitu sekitar 70 dan 650 L mol/g sedimen kering/tahun untuk masing-masing kandungan N-total sulfida terlarut yang rendah dan tinggi. Laju pembentukan pirit melalui jalur  $\text{H}_2\text{S}$  (99% dari pembentukan pirit) adalah sekitar dua kali lipat lebih besar daripada melalui jalur polisulfida (1% dari pembentukan pirit), atau sekitar

$3 \times 10^{-10}$  sampai  $3 \times 10^{-5}$  mol/g/tahun (Rickard & Luther III, 1997b). Menurut Rickard dan Luther III (1997a), reaksi pembentukan pirit dapat dilustrasikan sebagai berikut.

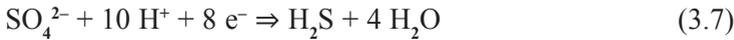


Berdasarkan peranan dan ketersediaannya, setiap komponen yang terlibat dalam pembentukan mineral sulfida dapat pula menjadi faktor pembatas dalam reaksi  $\text{SO}_4$ . Keberadaan  $\text{SO}_4$  menjadi hal mutlak agar reaksi dapat berlangsung. Dalam konteks pembentukan mineral sulfida di sekitar ekosistem yang mendapat pengaruh dari laut,  $\text{SO}_4$  utamanya bersumber dari laut. Jika konsentrasinya  $<5\text{--}20$  mM atau  $0,16\text{--}0,6$  mg/l dalam suatu sistem, ketersediaannya menjadi pembatas reaksi pembentukan pirit (Ingvorsen et al., 1984). Sebagian besar  $\text{SO}_4$  sangat larut dan hanya terbentuk pada kondisi air yang stagnan/tanpa adanya pencucian (Breemen, 1973). Reduksi  $\text{SO}_4$  adalah proses alamiah yang terjadi di hampir semua danau, sungai, lahan basah, dan lautan. Reduksi  $\text{SO}_4$  hanya terjadi pada kondisi yang sangat reduktif. Hal ini disebabkan mikroorganisme pereduksi  $\text{SO}_4$  hanya hidup pada kondisi yang sangat reduktif, walaupun beberapa genera dinyatakan masih mampu hidup pada kondisi yang aerob (Rabenhorst et al., 2006). Menurut Reddy dan DeLaune (2008), reaksi reduksi  $\text{SO}_4$  terjadi pada kisaran redoks potensial tanah (Eh)  $-100$  mV sampai  $-200$  mV (pH 7,0). Hasil penelitian Gao et al. (2002) menunjukkan bahwa  $\text{SO}_4$  dapat mulai tereduksi pada 2 hari setelah tanah digenangi dan konsentrasi terendahnya terjadi pada 8–9 minggu penggenangan. Pada kondisi tersebut juga diketahui bahwa  $\text{O}_2$  terlarut dan  $\text{NO}_3$  telah hampir direduksi sempurna pada sekitar 2–3 hari setelah digenangi. Jika reduksi  $\text{SO}_4$  terjadi pada pH yang agak masam, dihasilkan  $\text{H}_2\text{S}$  sebagaimana digambarkan pada Persamaan 3.7 dan Gambar 3.4.



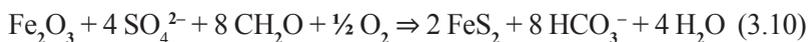
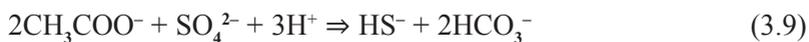
Sumber: (a) Diolah dari Rickard & Luther III (2007); (b) Fitzpatrick et al. (2017)

**Gambar 3.4** (a) Stabilitas SO<sub>4</sub> berdasarkan hubungan Eh dan pH; (b) penampakan mineral pirit yang terbentuk dan teroksidasi di dalam serat organik.



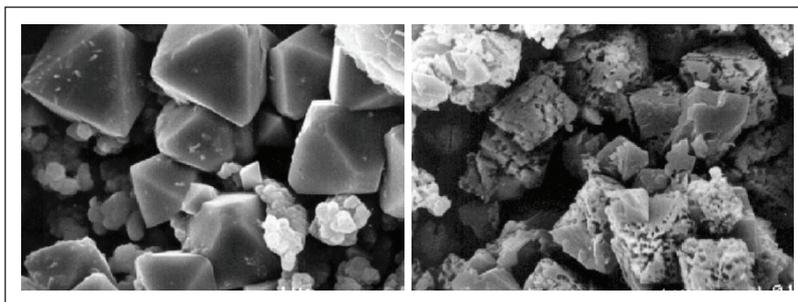
Faktor lainnya yang menjadi penentu dalam proses pembentukan mineral Fe sulfida adalah bahan organik. Janjirawuttikul et al. (2010) menemukan bahwa ketersediaan bahan organik menjadi faktor pembatas dalam proses pembentukan pirit pada beberapa titik pengamatannya di Lower Central Plain, Thailand. Bahan organik menjadi sumber energi bagi bakteri pereduksi SO<sub>4</sub>. Bahan organik yang dapat dimanfaatkan dalam reaksi ini adalah bahan organik yang mudah didekomposisi. Sebaliknya, adanya bahan organik yang telah terdekomposisi atau terhumifikasi lanjut, seperti gambut, dapat membatasi terjadinya reduksi SO<sub>4</sub>. Senyawa-senyawa organik dalam bahan organik yang terlibat dalam reaksi ini adalah senyawa organik sederhana, antara lain asetat, format, propionat, dan laktat. Persamaan reaksi yang menggambarkan terjadinya reduksi SO<sub>4</sub> dengan bantuan asam-asam organik sederhana, seperti asam laktat (Persamaan 3.8) dan asam asetat (Persamaan 3.9) sebagai donor elektron (Reddy & DeLaune, 2008). Lebih lanjut, jika reaksi yang terjadi melibatkan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sebagai sumber Fe, reaksi pembentukan pirit dapat digam-

barkan seperti dalam persamaan 3.10 (Bloomfield & Coulter, 1973; Fitzpatrick, Shand et al., 2009).



Tanah sulfat masam mengandung banyak senyawa S tereduksi dalam bentuk logam sulfida, polisulfida, dan lainnya. Yang paling utama dari mineral-mineral tersebut adalah pirit (Bloomfield, 1973; Hicks et al., 1999). Pirit terbentuk pada kondisi anaerob yang sangat reduktif. Adanya perubahan atau gangguan, seperti drainase atau fluktuasi pasang surut, dapat menyebabkan pirit teroksidasi. Beberapa faktor yang memengaruhi oksidasi pirit adalah ukuran kristal, luas permukaan, morfologi, kelembapan tanah (Karimian et al., 2017), tekstur tanah, permeabilitas, aktivitas mikroorganisme (Moses et al., 1987; Doye & Duchesne, 2003), dan bahan organik (Vegas-Vilarrúbia et al., 2008).

Transformasi pirit utamanya terjadi karena lingkungan yang berubah menjadi lebih oksidatif ketika teroksidasi pirit mengalami disintegrasi pada permukaan struktur mineralnya (Gambar 3.5).



Sumber: Shamshuddin et al. (2004)

**Gambar 3.5** Struktur Pirit Sebelum Teroksidasi dan Sesudah Teroksidasi Menggunakan Sem-Edx (*Energy Dispersive X-Ray*)

Stabilitas pirit terjadi pada pH 6 dan dengan kondisi yang sangat reduktif ( $E_h < -250$  mV) (Butler & Rickard, 2000), atau pada kisaran pH yang lebar dengan  $E_h$  berkisar 25 sampai -50 mV (Gambar 3.19) (Rose & Cravotta III, 1998).

Reaksi oksidasi pirit adalah reaksi yang rumit, diperlukan transfer 14 mol elektron untuk mengoksidasi satu mol pirit menjadi  $SO_4$ . Nordstrom (1982) menyatakan bahwa tidak mungkin terjadi transfer tersebut dalam satu tahapan karena di dalam proses tersebut melibatkan beberapa tipe reaksi redoks, hidrolisis, pembentukan kompleks, dan pelarutan. Menurut Nordstrom dan Southam (1997), oksidasi pirit dapat terjadi secara biotik dan abiotik. Kecepatan reaksi oksidasi pirit oleh  $O_2$  secara biotik ( $8,8 \times 10^{-8}$  mol/m<sup>2</sup>/S) lebih cepat daripada secara abiotik ( $0,3-3 \times 10^{-9}$  mol/m<sup>2</sup>/S), sedangkan reaksi oksidasi pirit oleh  $Fe^{3+}$  adalah ( $1-2 \times 10^{-8}$  mol/m<sup>2</sup>/S). Pirit yang teroksidasi akan mengalami transformasi menjadi beberapa mineral, salah satunya adalah jarosit (Shamshuddin et al., 2014). Bentuk atau spesies mineral akhir sebagai hasil transformasi pirit sangat tergantung pada kondisi lingkungan (Gambar 3.19). Selain  $Fe(OH)_3$ , menurut Nordstrom dan Southam (1997), beberapa mineral hasil oksidasi pirit, antara lain schwertmannit, gutit, jarosit, dan ferihidrit.

Berdasarkan siklus biogeokimia Fe di tanah sulfat masam, pelarutan mineral Fe primer maupun sekunder, seperti pirit, yang salah satunya menghasilkan ion-ion  $Fe^{2+}$  ataupun  $Fe^{3+}$  berpotensi menyebabkan pembentukan kembali pirit (*reformation*). Tentunya proses tersebut dipengaruhi oleh beberapa faktor lingkungan yang menjadi prasyarat terbentuknya pirit, seperti ketersediaan Fe,  $SO_4$  terlarut, bahan organik, kondisi anaerob, dan bakteri pereduksi  $SO_4$ .

## b. Horizon Sulfurik

Oksidasi bahan sulfidik menghasilkan mineral baru yang disebut sebagai bahan sulfurik, salah satunya adalah jarosit, dan prosesnya dikenal dengan sulfurisasi (*sulfuricization*) (Fanning, 2006). Secara lebih detail, Fanning et al. (2017) menjelaskan bahwa sulfurisasi adalah proses di mana teroksidasinya mineral sulfida (terhidrolisisnya

Fe<sup>3+</sup>), terlapuknya mineral-mineral akibat pengaruh asam sulfat yang dihasilkan oleh proses oksidasi dan terbentuknya mineral baru akibat proses pelarutan. Horizon tanah yang mengandung bahan tersebut disebut horizon sulfurik (Fitzpatrick et al., 1996). Bahan baru ini utamanya terdiri dari campuran mineral quartz, feldspar, mika yang relatif tidak reaktif, dan mineral Fe sekunder, seperti jarosit, schwertmannit, dan gutit, serta mineral Al hidroksi sulfat (basaluminit) yang relatif sukar larut (Ahern et al., 2004). Beberapa peneliti, seperti Dent (1986), Bigham dan Nordstrom (2000), serta Fitzpatrick dan Shand (2008) menyatakan bahwa jarosit dan schwertmannit adalah mineral Fe sekunder paling berperan penting dalam horizon sulfurik. Walaupun demikian, menurut Soil Survey Staff (2014), jarosit tidak harus selalu ada dalam semua horizon sulfurik.

Horizon sulfurik adalah horizon yang berada di bawah permukaan tanah dengan pH yang sangat masam. Hal tersebut disebabkan oleh adanya asam sulfat yang dihasilkan akibat teroksidasinya bahan-bahan bersulfida (Soil Survey Staff, 2014). Horizon sulfurik disebut sebagai horizon thionic (Working Group WRB, 2014). Horizon sulfurik merupakan lapisan tanah setebal  $\geq 15$  cm, tersusun dari bahan tanah mineral atau bahan tanah organik, dan memiliki pH  $\leq 3,5$  (dalam suspensi 1:1). Horizon menunjukkan bahwa rendahnya pH tersebut akibat asam sulfat (Soil Survey Staff, 2014). Bukti-bukti tersebut, boleh satu atau kedua-duanya (Fanning et al., 2002), yaitu:

- 1) horizon memiliki:
  - a) konsentrasi jarosit, schwertmannit atau mineral Fe, dan/ atau mineral Al sulfat atau Al hidroksi sulfat; atau
  - b)  $\geq 0,05\%$  SO<sub>4</sub> larut air; atau
- 2) terletak langsung di atas lapisan bahan sulfidik.

Horizon sulfurik biasanya terbentuk akibat teroksidasinya mineral yang kaya bahan sulfidik. Selama proses pembentukannya, hidrolisis dari mineral Fe dan Al dalam bahan ini akan menghasilkan pemasaman (*acidification*) tanah. Keberadaan horizon ini menjadi salah satu pencirian atau pembeda antara tanah sulfat masam aktual

dan potensial. Jika horizon ini berada pada kedalaman kurang dari 100 cm dari permukaan tanah, tanah tersebut digolongkan sebagai tanah sulfat masam bersulfat satu (SMA-1) dan tanah sulfat masam bersulfat dua (SMA-2). Sedangkan tanah sulfat masam bersulfat 3 (SMA-3) jika horizon ini berada pada kedalaman lebih dari 100 cm dari permukaan tanah (Widjaja-Adhi & Alihamsyah, 1998).

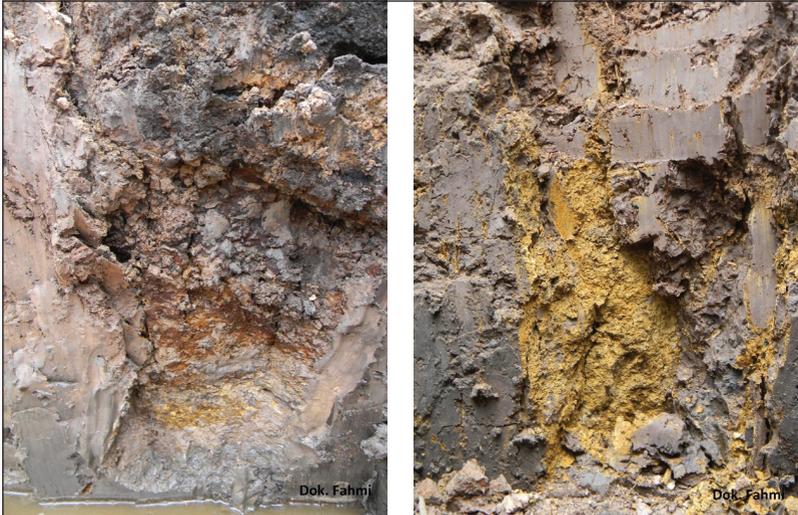


Foto: Arifin Fahmi (2016)

**Gambar 3.6** Horizon Sulfurik dalam Profil Tanah Sulfat Masam

Walaupun demikian, keberadaan mineral jarosit tidak menjadi syarat mutlak sebagai indikasi pembentukan horizon sulfurik karena mineral tersebut bisa saja terdapat pada tanah yang mengandung karbonat dan tidak ekstrem masam (Carson et al., 1982).

### c. Bahan Sulfurik

Jarosit adalah salah satu mineral Fe sekunder yang memiliki rumus kimia  $KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$  atau disebut juga sebagai *potassium-iron-sulfate-hydroxide*. Jarosit ditemukan pertama kali oleh seorang ahli

mineralogi Jerman bernama August Breithaupt pada tahun 1852 di Barranco del Jaroso (Jaroso Ravine), Sierra Almagrera, Almeria, Spanyol (Anthony et al., 1990; Eftekhari et al., 2020). Istilah ‘jarosit’ berasal dari kata ‘Jaroso’, yaitu nama tempat yang menjadi asal muasal penemuan mineral tersebut. Jarosit adalah salah satu mineral  $\text{Fe}^{3+}$ -sekunder yang merupakan produk dari oksidasi mineral Fe sulfida, seperti pirit. Mineral ini terbentuk pada kondisi yang sangat oksidatif ( $E_h > 400 \text{ mV}$ ) pada pH 1,7–4,0 (Breemen, 1976; Zahrai et al., 2013) dan pH  $< 2,5$  (Cruells & Roca, 2022) sehingga keberadaan mineral ini dapat menjadi indikator bahwa tanah sulfat masam telah atau pernah teroksidasi, khususnya pada lapisan di mana mineral tersebut berada. Secara sederhana, reaksi pembentukan jarosit akibat oksidasi pirit diekspresikan dalam Persamaan 3.27.

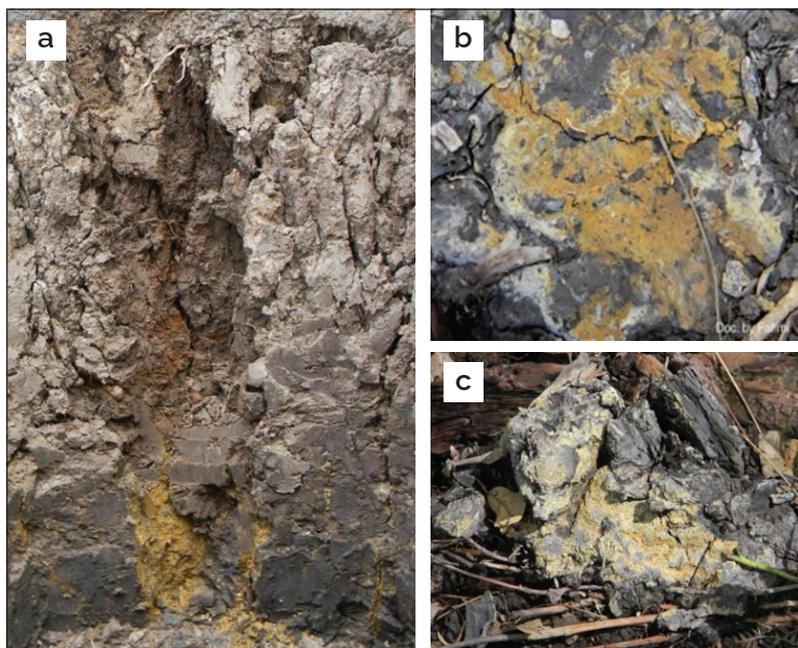


Foto: (a) Arifin Fahmi (2016); (b) Arifin Fahmi (2014); (c) Arifin Fahmi (2014)

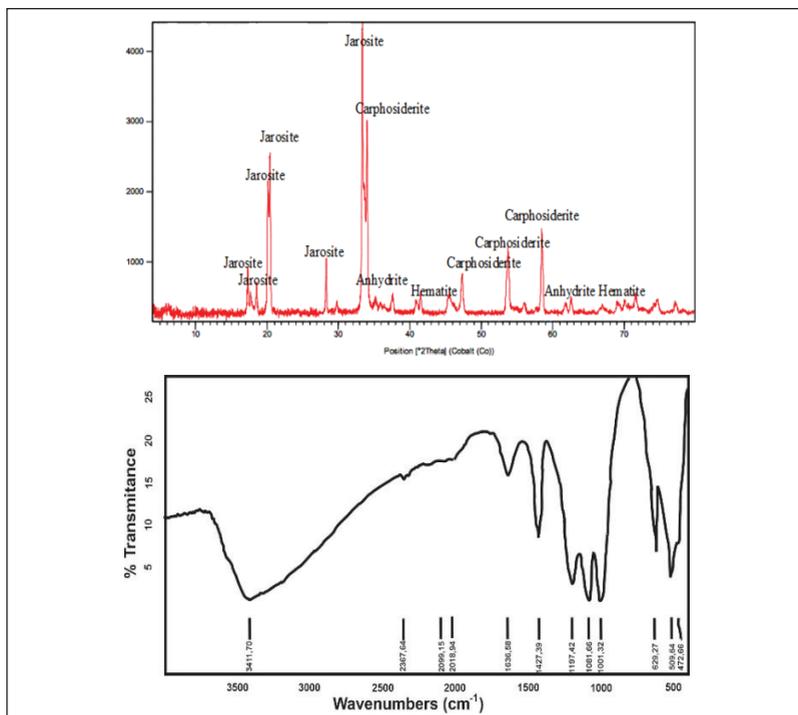
**Gambar 3.7** Mineral Jarosit dalam Profil Tanah yang Terbentuk Akibat Retakan dan pada Permukaan Tanah Sulfat Masam yang Telah Teroksidasi

Teori lainnya tentang pembentukan jarosit dikemukakan oleh Eftekhari et al. (2020) yang menyatakan bahwa prekursor untuk pembentukan jarosit adalah Fe, SO<sub>4</sub>, sumber kation, dan bakteri pengoksidasi Fe<sup>3+</sup>, serta suhu dan pH yang kondusif untuk pengendapan jarosit. Teori ini menunjukkan tahapan yang lebih detail tentang pembentukan jarosit yang berasal dari Fe<sup>2+</sup>. Langkah pertama dalam pembentukan/presipitasi Fe adalah oksidasi Fe<sup>2+</sup>. Dalam reaksi tersebut, diketahui terjadi konsumsi ion H<sup>+</sup> yang menyebabkan peningkatan pH (Persamaan 3.11). Selanjutnya, reaksi tersebut disangga oleh hidrolisis Fe<sup>3+</sup> (Persamaan 3.12) (Daoud & Karamanev, 2006). Terlihat bahwa pH sistem sangat berpengaruh pada tingkat reaksi dengan terjadinya kompetisi antara proses oksidasi (Persamaan 3.12) dan hidrolisis (Persamaan 3.13). Kondisi yang sangat masam akan menyebabkan proses oksidasi atau pembentukan jarosit (Persamaan 3.13) menjadi lebih dominan. Sebaliknya, jika pH cenderung meningkat, proses hidrolisis/penyanggaan menjadi lebih dominan (Persamaan 3.12). Menurut Mensvoort dan Dent (1998), ketika pH tanah >4, Fe<sup>3+</sup> menjadi tidak stabil sehingga mengendap dalam bentuk Fe(OH)<sub>3</sub> (Gambar 3.19).



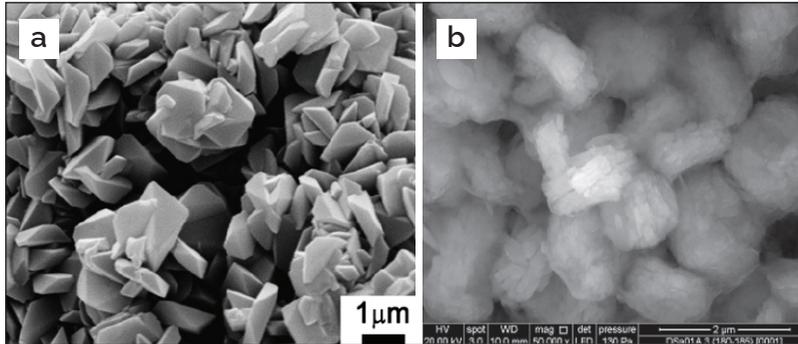
Menurut Bigham dan Nordstrom (2000) serta Cruells dan Roca (2022), grup mineral jarosit merupakan bagian dari super grup alunit. Rumus umum grup mineral jarosit adalah AB<sub>3</sub>(TO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(OH,H<sub>2</sub>O)<sub>6</sub> dengan sedikitnya terdapat 40 spesies mineral dalam grup tersebut. Jarosit berwarna kuning pucat (*hue* 2,5–5 Y, *value* ≥6 dan *chroma* ≥6 pada buku *Munsell Soil Colour Charts*) (Breemen, 1976; Rabenhorst et al., 2006; Sánchez-Marañón et al., 2015) dan berbentuk heksagonal (Shamshuddin et al., 2014). Keberadaan mineral jarosit dapat diidentifikasi menggunakan *X-ray diffraction* (XRD) dan spektrum *fourier-transform infrared* (FTIR) jarosit (Gambar 3.8). Adapun

morfologi mineral jarosit dapat diketahui menggunakan *electron photomicrographs* (Gambar 3.9). Penyebutan istilah jarosit ditentukan oleh unsur yang terkandung di dalamnya. Jika unsur K dalam jarosit digantikan oleh Na sehingga rumus molekulnya menjadi  $\text{NaFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ , itu disebut sebagai natro jarosit; jika K digantikan oleh  $\text{H}_3\text{O}$  sehingga rumus molekulnya menjadi  $(\text{H}_3\text{O})\text{Fe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ , ia disebut sebagai hidronium jarosit; jika K digantikan oleh  $\text{NH}_4$  sehingga rumus molekulnya menjadi  $\text{NH}_4\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ , ia disebut sebagai ammoniojarosit; dan jika K digantikan oleh Pb sehingga rumus molekulnya menjadi  $\text{PbFe}_6(\text{SO}_4)_4(\text{OH})_{12}$ , ia disebut sebagai plumbojarosit (Swayze et al., 2008).



Sumber: Eftekhari et al. (2020)

**Gambar 3.8** Pola X-ray Diffraction (XRD) dan Spektrum Fourier-Transform Infrared (FTIR) Jarosit

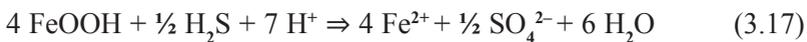
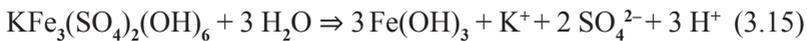
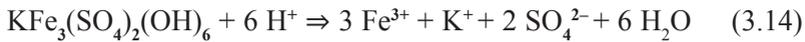


Sumber: (a) Johnston et al. (2011); (b) Fitzpatrick et al. (2017)

**Gambar 3.9** Morfologi Kristal Jarosit

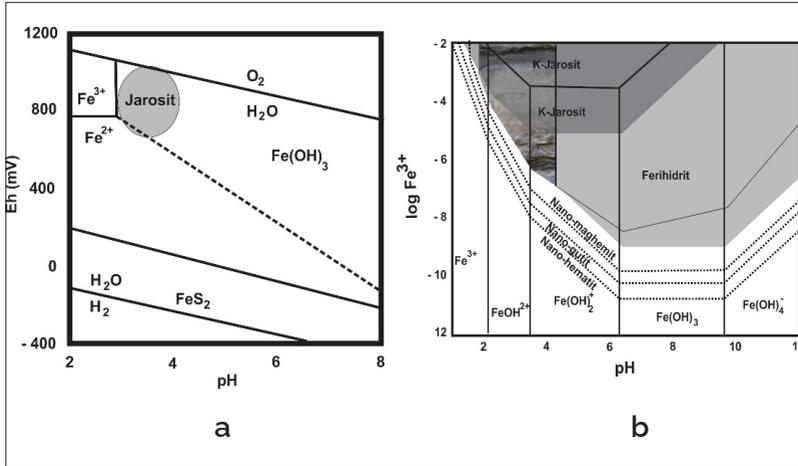
Jarosit terbentuk pada kondisi oksidatif dan sangat masam, salah satunya melalui oksidasi pirit yang terjadi pada pH 3–4. Jika pirit teroksidasi pada pH yang lebih tinggi, akan terbentuk mineral seperti gutit, lepidokrosit, atau hematit. Jarosit stabil dalam kondisi oksidatif ( $E_h > 400$  mV) dengan lingkungan yang sangat masam (pH 2–4) (Breemen, 1976; Rabenhorst et al., 2006). Perubahan kondisi lingkungan, seperti fluktuasi suhu, kondisi redoks, dan peningkatan pH tanah dapat menyebabkan instabilitas mineral jarosit (Gambar 3.10). Madden et al. (2012) dan Zahrai et al. (2013) membuktikan bahwa pelarutan jarosit terutama terjadi karena peningkatan pH dan penurunan suhu. Menurut Keene et al. (2010) dan Johnston et al. (2011), proses penggenangan yang diikuti oleh peningkatan pH ataupun proses alamiah lainnya dapat menyebabkan jarosit menjadi tidak stabil. Walaupun Madden et al. (2012) menemukan bahwa penurunan pH dapat pula menyebabkan jarosit tidak stabil, tetapi pelarutannya dikatakan tidak konsisten karena secara berangsur ion  $H^+$  dikonsumsi sehingga terjadi peningkatan pH. Di sisi lain, pelarutan jarosit yang terjadi pada pH yang sangat masam dapat menyebabkan terjadinya konsumsi ion  $H^+$  (Persamaan 3.14), walaupun pada keseimbangannya, pH tanah kembali turun karena ion  $Fe^{3+}$  yang dihasilkan kembali mengendap membentuk Fe-oksihidrooksida dan melepaskan ion  $H^+$  (Welch et al., 2008). Jarosit dapat mengalami transformasi menjadi

Fe-oksihidrooksida (Persamaan 3.15) atau gutit (Persamaan 3.16), atau fase metastabil, seperti schwertmannit atau ferihidrit (*intermediate mineral*) (Acero et al., 2006) ataupun kemudian gutit melarut menjadi sumber  $\text{Fe}^{2+}$  (Persamaan 3.17), dan dapat menjadi sumber  $\text{Fe}^{3+}$  jika kondisi lingkungan sangat masam (Persamaan 3.14) (Welch et al., 2008; Johnston et al., 2011; Madden et al., 2012). Kondisi ini ditunjukkan pada Gambar 3.19.



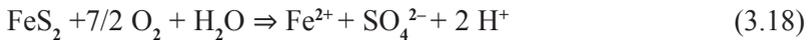
Faktor-faktor alamiah yang berperan dalam pembentukan jarosit secara tidak langsung dapat menjadi faktor pembatas pembentukan mineral tersebut, seperti kondisi yang sangat oksidatif dan sangat masam atau keberadaan mineral Fe, K, dan Na. Menurut Chu et al. (2006), Smith et al. (2006), Welch et al. (2007), Welch et al. (2008), Zhu et al. (2008), dan Kendall et al. (2013), beberapa faktor yang memengaruhi stabilitas jarosit adalah pH, bahan organik, serta keberadaan kation dan anion. Dinamika kondisi redoks tanah dan kemasaman tanah sangat memengaruhi stabilitas mineral jarosit (Gambar 3.10).

Tanah basah dengan drainase yang jelek dan kandungan bahan organik tinggi cenderung lebih reduktif (Eh rendah). Menurut Fahmi dan Sarwani (2013), bahan organik yang segar menyebabkan tanah menjadi lebih reduktif dibandingkan bahan organik yang telah mengalami dekomposisi lanjut. Pada kondisi demikian, saat pirit teroksidasi, hanya akan membentuk  $\text{Fe-SO}_4$  (tidak membentuk jarosit), sebagaimana digambarkan dalam Persamaan 3.18. Selain itu, pada kondisi yang reduktif akan menyebabkan  $\text{Fe}^{3+}$  dalam jarosit berubah menjadi  $\text{Fe}^{2+}$  yang lebih larut sehingga membentuk mineral Fe-oksida (Fanning & Burch, 2006) atau gutit (Persamaan 3.19) (Van Oploo et al., 2008).



Sumber: (a) Diolah dari Virtanen (2017); (b) Diolah dari Maden et al. (2012)

**Gambar 3.10** Diagram (a) hubungan Eh/pH yang menunjukkan kondisi stabilitas mineral jarosit, dan (b) stabilitas beberapa mineral hasil pelarutan jarosit berdasarkan pH lingkungannya.



Walaupun demikian, jarosit dapat pula ditemukan pada tanah yang tidak memiliki pH ekstrem masam, bahkan pada tanah yang mengandung cukup karbonat (Carson et al., 1982). Tanah itu disebut sebagai tanah sulfat masam pascaaktif, yaitu tanah sulfat masam yang secara pedogenesis telah mengalami perkembangan berupa pelapukan sehingga pH-nya meningkat dan hal tersebut juga diakibatkan oleh adanya penambahan karbonat akibat erosi angin. Adapun jarosit yang ada pada lingkungan tersebut tetap dalam keadaan stabil karena kondisi yang terus-menerus teroksidasi (Rabenhorst et al., 2006).

#### d. Bahan Penetrasi

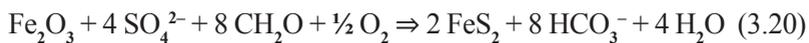
Daya sangga kemasaman tanah adalah kemampuan tanah bertahan terhadap perubahan keseimbangan asam atau basa. Tanah menjadi

masam karena proses netralisasi kemasaman (penyanggaan) mengonsumsi lebih sedikit kemasaman dibandingkan proses-proses yang menghasilkan kemasaman, demikian pula sebaliknya. Pemasaman tanah terjadi ketika jumlah asam yang dihasilkan melebihi daya sangga tanah. Menurut Dent (1986), setiap satu mol pirit yang teroksidasi disangga oleh tiga mol  $\text{CaCO}_3$ . Dear et al. (2014) menyatakan bahwa dalam lingkungan tanah sulfat masam, mekanisme penyanggaan kemasaman tanah adalah reaksi mineral karbonat tanah terhadap kemasaman yang dihasilkan akibat oksidasi pirit. Oksidasi pirit yang terjadi di tanah sulfat masam menyebabkan penurunan pH tanah. Magnitudo perubahan nilai pH tanah yang terjadi sangat ditentukan oleh ketersediaan karbonat yang biasanya berbentuk kalsit ( $\text{CaCO}_3$ ) atau dolomit ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) yang mampu menetralkan kemasaman (Ritsema et al., 1992). Komponen daya sangga kemasaman tanah di larutan tanah adalah karbonat, asam organik terlarut, dan karbon dioksida (Essington, 2015). Menurut Pons dan Van Breemen (1981) dan Dent (1986), daya sangga tanah tergantung pada jumlah basa tukar, mineral silikat, dan karbonat yang mudah lapuk.

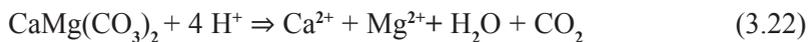
Bentuk sebuah proses penyanggaan dapat berupa proses pelarutan, pengendapan, dan pembentukan atau transformasi mineral. Secara lebih detail, proses penyanggaan kemasaman di tanah sulfat masam dapat terjadi melalui proses pelarutan karbonat dan silikat, pengendapan mineral sekunder, serta pelarutan mineral phyllosilikat. Proses penyanggaan kemasaman tanah terjadi melalui pelarutan karbonat dan silikat dengan mengonsumsi proton dan kation, seperti Ca, Mg, K, dan Al (Blodau, 2006), termasuk juga pertukaran ion, reaksi pelarutan organik, atau pelapukan klei (Simpson et al., 2018). Menurut Essington (2015), proses penyanggaan kemasaman tanah oleh mineral primer adalah melalui konsumsi proton selama proses pelapukan. Menurut Zakiah dan Fahmi (2020), perubahan pH tanah sulfat masam juga ditentukan oleh tingkat perkembangan tanah, kondisi hidrologis lahan, dan kadar  $\text{Fe}^{2+}$  di tanah sulfat masam.

Sifat tanah di lahan rawa sangat dipengaruhi oleh kualitas air yang ada di sekitar lahan rawa tersebut. Adapun mineral-mineral

yang terbentuk dipengaruhi oleh proses pengendapan yang terjadi saat ini maupun ribuan tahun yang lalu. Tanah-tanah di lahan pasang surut adalah tanah yang selama proses pembentukannya dipengaruhi, antara lain oleh sedimentasi bahan-bahan marine berupa  $\text{SO}_4$  maupun karbonat. Pada sebagian besar tanah sulfat masam, sekitar 99% asam sulfat diinaktivasi oleh unsur alkali (karbonat) terlarut yang dihasilkan melalui proses pelapukan atau pertukaran ion di larutan tanah (Breemen, 1973). Dalam hal ini, keberadaan karbonat memiliki peranan utama terhadap proses penyanggaan kemasaman tanah sulfat masam (Persamaan 3.20). Menurut Ritsema et al. (1992), rendahnya kandungan karbonat dalam tanah sulfat masam dari Kalimantan menyebabkan penurunan pH tanah yang lebih besar akibat oksidasi pirit dibandingkan tanah sulfat masam dari Belanda.



Persamaan reaksi tersebut menunjukkan bahwa karbonat yang terdapat di tanah dapat berasal dari reaksi pembentukan pirit. Teroksidasinya pirit menyebabkan pembentukan asam sulfat dan Fe-oksihidrooksida yang selanjutnya menyebabkan pH tanah turun mencapai 1,3–3,0 (Subagyo, 2006). Jika di larutan tanah terdapat cukup besar senyawa-senyawa penyangga, seperti ion  $\text{OH}^-$ ,  $\text{CaCO}_3$ , basa-basa dapat tukar, dan mineral-mineral silikat yang mudah melapuk, pH tanah tidak akan sampai turun di bawah pH 4,0, sebagaimana reaksi yang diajukan oleh Ritsema dan Groenenberg (1993) (Persamaan 3.21 dan 3.22).



Ion karbonat dalam tanah dapat pula berasal dari proses reduksi  $\text{Fe}^{3+}$  dan  $\text{SO}_4$ . Reduksi  $\text{Fe}^{3+}$  (Fe-oksihidrooksida) menghasilkan  $\text{Fe}^{2+}$  dalam kisaran Eh <100 mV (Persamaan 3.23) (Reddy & DeLaune, 2008). Dalam reaksi tersebut, terjadi peningkatan pH karena di-

hasilkan senyawa hidrokarbonat dalam larutan tanah. Secara tidak langsung, peningkatan pH larutan tanah bersifat menstabilkan reduksi  $\text{Fe}^{3+}$  sehingga dihasilkan ion  $\text{Fe}^{2+}$  dalam konsentrasi tinggi. Kondisi lingkungan akan makin tereduksi seiring dengan makin banyak  $\text{Fe}^{3+}$  yang tereduksi. Selanjutnya, pada nilai Eh antara -100 mV sampai 200 mV dan  $\text{pH} > 5,0$ , mulai terjadi reduksi  $\text{SO}_4$  yang banyak mengonsumsi ion  $\text{H}^+$  dan  $\text{SO}_4$ . Walaupun demikian, menurut Konsten et al. (1990), reduksi  $\text{SO}_4$  juga dapat terjadi pada pH 2,8–3,4. Sulfida yang terbentuk bereaksi dengan  $\text{Fe}^{2+}$  membentuk senyawa  $\text{Fe}^{2+}$ -sulfida. Terjadinya reduksi  $\text{SO}_4$  pada lapisan tanah ditandai dengan adanya karatan  $\text{FeS}$  yang berwarna hitam dan terkadang adanya bau (busuk)  $\text{H}_2\text{S}$ .



Beberapa uraian tersebut menjelaskan bahwa ketersediaan karbonat menjadi salah satu faktor pembatas utama dalam proses penyanggaan kemasaman tanah sulfat masam. Di sisi lain, proses penyanggaan kemasaman tanah dapat pula terjadi melalui proses pertukaran kation yang dipengaruhi pH. Hasil penelitian Ritsema et al. (1992) membuktikan bahwa salah satu proses penyanggaan kemasaman tanah sulfat masam di Kalimantan terjadi melalui pertukaran kation. Menurut Breemen (1973), ada tiga mekanisme penyanggaan kemasaman tanah, yaitu:

- 1) jika terdapat  $\text{CaCO}_3$  di dalam tanah, mineral tersebut akan menyangga kemasaman dan pH tidak akan turun di bawah 7;
- 2) terjadi pertukaran antara kation basa dan kation masam pada tapak pertukaran; serta
- 3) jika kedua fungsi penyanggaan tersebut menurun dan  $\text{pH} < 4,5$ , terjadi pelarutan silika ke larutan tanah.

Pada tingkat kemasaman tanah sulfat masam yang umum ( $\text{pH}$  3–4), adanya keseimbangan antara mineral monmorilonit dan mineral kaolinit menjadi penting, sehubungan dengan adanya mineral silikat amorf yang berperan pada proses penyanggaan kemasaman tanah.

Madden et al. (2012), Moesley et al. (2017), dan Trueman et al. (2020) menyatakan bahwa proses pelarutan jarosit juga merupakan sebuah reaksi penyanggaan kemasaman tanah. Adapun menurut Sukitprapanon et al. (2015), jarosit menahan (*retain*) kemasaman akibat oksidasi mineral sulfida. Secara detail, peranan jarosit dalam reaksi penyanggaan kemasaman tanah akan dikemukakan pada subbab tentang kemasaman tanah sulfat masam.

## 2. Pembentukan Tanah Sulfat Masam

Luas tanah sulfat masam di dunia diperkirakan mencapai 17 juta ha, dengan sekitar 10 juta ha terdapat di daerah tropis (Andriesse & Meensvoort, 2006). Luas tanah sulfat masam di Indonesia diperkirakan mencapai 6,7 juta ha (Noor, 2004). Luasan ini makin bertambah seiring dengan terjadinya degradasi tanah gambut yang memiliki lapisan bahan sulfidik di bawahnya. Sebagian besar tanah sulfat masam terdapat pada dataran pantai, sekitar danau, dan aliran sungai (Dent, 1986; Fitzpatrick & Shand, 2008).

Secara umum, tanah sulfat masam berasosiasi dengan berbagai lingkungan tergenang air/anaerobik dan/atau dikeringkan (didrainase) karena ideal untuk pembentukan mineral sulfida, terutama pirit. Tanah sulfat masam terbentuk pada daerah/lingkungan sekitar pantai atau rawa mangrove dalam kondisi tergenang (reduktif). Walaupun demikian, selain ditemukan dalam lingkungan tersebut, Fitzpatrick et al. (1998) melaporkan bahwa adanya tanah sulfat masam yang terbentuk pada daerah non-pasang surut yang disebutnya sebagai "*inland acid sulphate soil*" serta daerah sekitar pertambangan atau "*mine site acid sulphate soil*".

Tanah sulfat masam yang terbentuk pada daerah/lingkungan sekitar pantai atau rawa mangrove merupakan hasil endapan marine pada masa ribuan tahun silam. Proses pengendapan yang berlangsung ribuan tahun ini berkaitan dengan perubahan lingkungan bumi, yaitu peningkatan permukaan air laut akibat mencairnya lapisan es di bagian kutub utara yang terjadi karena peningkatan suhu pada permukaan bumi. Diperkirakan sekitar 2 juta tahun yang lalu, pada era glasial

akhir periode pleistosen, peningkatan muka air laut mencapai 3–4 m setiap seribu tahun. Tinggi muka air laut pada periode pleistosen diperkirakan 60 m di bawah permukaan air laut sekarang. Kemudian pada pertengahan periode pleistosen, permukaan laut mulai menurun hingga mencapai terendah yang menyebabkan hampir semua daratan tersingkap. Sekitar 12.000 tahun silam permukaan air laut mencapai titik terendah, hal ini mengakibatkan sebagian daratan di Indonesia tersingkap. Ini ditandai dengan menyatunya daratan antara Jawa, Bali, Kalimantan, Sumatra, dan Palawan. Kemudian sampai pada sekitar 1.000 tahun silam, permukaan air laut kembali menaik yang diperkirakan posisinya di atas permukaan laut saat ini (Pons et al., 1982). Bersamaan dengan peningkatan kembali permukaan air laut, terjadilah pembentukan dataran pantai yang disusul dengan sedimen berpotensi masam. Garis pantai mulai bergeser maju (*transgresi*) dengan meningkatnya sedimentasi dari bagian atas (hulu) membentuk dataran pantai.

Menurut Noor (2004), proses pengendapan sedimen marine sebagai bagian dari pembentukan tanah sulfat masam adalah sebagai berikut. Endapan baru berupa daratan terbentuk akibat peningkatan muka air laut yang membawa hasil erosi oleh sungai-sungai, adanya pengaruh pasang dengan periode yang panjang, dan didukung oleh curah hujan yang tinggi dan drainase yang jelek, serta topografi yang cekung membuat terbentuknya pertumbuhan rawa mangrove (*marsh*) di atas daratan. Secara perlahan, dataran pantai terus bertambah maju ke arah laut (*regresi*) dan menuju ke zona pasang surut akibat laju mineralisasi yang lebih lambat daripada akumulasinya. Secara ringkas, dapat dijelaskan bahwa pembentukan tanah sulfat masam merupakan serangkaian proses pengendapan bahan sedimen marine yang berhubungan dengan penurunan permukaan air laut atau pengangkatan daratan. Sedimen marine yang banyak mengandung sulfida atau polisulfida hasil reduksi  $\text{SO}_4$  selama proses pengendapannya bereaksi dengan Fe membentuk Fe-sulfida. Selanjutnya, seiring dengan berjalannya waktu, adanya vegetasi yang tumbuh dan berkembang di atas hamparan sedimen ini tergantung pada kemampuan adaptasi

atau ketahanannya terhadap kondisi lingkungan, seperti kemasaman atau salinitas yang tinggi. Adapun luapan pasang yang terjadi secara berkala secara terus-menerus membawa sedimen baru dan membentuk lapisan baru di atas lapisan marine sebelumnya yang diikuti oleh suksesi vegetasi secara bertahap.

### 3. Identifikasi Tanah Sulfat Masam di Lapangan

Tanah sulfat masam sering dikelompokkan menjadi beberapa kelompok. Berdasarkan sifatnya yang ditemui di lapangan, diketahui bahwa beberapa kelompok tersebut tidak menunjukkan perbedaan sifat yang jelas karena sifat tanah sulfat masam secara hakiki lebih dipengaruhi oleh kondisi hidrologis lahan. Hanhart dan Ni (1993) yang melaksanakan pengamatan selama satu tahun di sekitar Delta Mekong menemukan bahwa pH tanah sulfat masam tertinggi dapat mencapai 7,0 dan terendah berkisar 3,0 (Gambar 3.15). Padahal, dinyatakan oleh beberapa peneliti bahwa salah satu syarat kriteria tanah sulfat masam aktual memiliki pH tanah  $<4,0$ , sedangkan pH tanah sulfat masam potensial  $>4,0$ . Artinya, tanah pada daerah tersebut dapat berubah kelompoknya jika dilakukan karakterisasi pada waktu pengamatan yang berbeda sehingga dalam hal ini penulis lebih sepakat dengan pendapat Alihamsyah et al. (2004) dan Noor (2004) bahwa secara praktis tanah sulfat masam aktual dan potensial lebih tepat dibedakan dengan memperhatikan keberadaan pirit dari permukaan tanah. Walaupun demikian, menurut Janssen et al. (1992), waktu yang paling tepat untuk melakukan karakterisasi tanah sulfat masam adalah saat akhir musim kemarau, di mana pH tanah berada pada titik terendah.

Salah satu cara praktis dan sering digunakan dalam mengidentifikasi tanah sulfat masam di lapangan adalah menggunakan larutan  $H_2O_2$  30%. Caranya adalah dengan mengambil tanah segar kira-kira  $5\text{ cm}^3$  dan dimasukkan ke dalam cawan porselin atau plastik yang kemudian diberikan larutan  $H_2O_2$  sebanyak 20 ml. Jika bahan tanah tersebut mengandung pirit, reaksi yang muncul setelah beberapa detik atau menit adalah adanya gelembung atau busa dan asap putih

(Gambar 3.11). Hal ini terjadi karena pemberian  $H_2O_2$  terhadap pirit menyebabkan terbentuknya asam sulfat, mineral Fe sulfat, dan panas. Menurut Fanning (2006), Alihamsyah et al. (2001), dan Noor (2004), jika lapisan tanah yang mengandung pirit ditemukan berada pada kedalaman  $>50$  cm dari permukaan tanah akan dinyatakan bahwa tanah tersebut adalah tanah sulfat masam potensial, tetapi jika pirit ditemukan pada lapisan tanah dengan kedalaman  $<50$  cm dari permukaan tanah, dinyatakan bahwa tanah tersebut adalah tanah sulfat masam aktual. Selanjutnya, reaktivitas dan waktu munculnya gelembung/busa dan asap putih merupakan suatu indikasi dari tingginya kandungan pirit. Menurut Noor (2004), makin cepat dan banyak gelembung/busa dan asap putih yang muncul, kandungan piritnya juga makin tinggi. Secara lebih detail, kandungan pirit dalam suspensi tersebut dapat diestimasi dengan melakukan pengukuran pH larutan. Jika pH larutan  $<2,5$ , ini merupakan indikasi kandungan pirit yang sangat tinggi (Notohadiprawiro, 1985).



Foto: Arifin Fahmi (2021)

**Gambar 3.11** Gelembung dan Asap Putih yang Muncul Setelah Ditetesi Peroksida ( $H_2O_2$  30%) pada Lapisan Tanah yang Mengandung Bahan Sulfidik

## B. Klasifikasi Tanah Sulfat Masam

Tanah sulfat masam berdasarkan Soil Survey Staff (2010; 2022) dapat diklasifikasikan sebagai ordo entisol, inceptisol, ataupun histosol yang

didasarkan pada keberadaan lapisan bahan sulfidik atau horizon sulfurik dalam profilnya. Menurut IUSS Working Group WRB (2014), tanah sulfat masam termasuk dalam kategori tanah jenis *thionic fluvisols*, *thionic gleysols*, dan *thionic histosols*. Istilah ‘thionic’ sendiri berasal dari kata ‘*theion*’ (Yunani) yang berarti sulfur. Adapun istilah ‘*fluvi*’ (*fluviatil*) menunjukkan arti sebagai hasil endapan (marine) dan ‘*gley*’ menunjukkan kadar klei yang tinggi, sedangkan ‘*histo*’ menunjukkan adanya lapisan gambut di permukaan tanah.

Beberapa peneliti telah mengelompokkan tanah sulfat masam berdasarkan beberapa kategori, seperti kondisi mineral sulfida (Widjaja-Adhi et al., 1992; Fanning, 2006) dan kedalaman horizon sulfurik (Breemen & Pons, 1978). Berdasarkan kendala dan sifat tanahnya (pirit), tanah sulfat masam dapat dibedakan menjadi enam tipe lahan dalam Tabel 3.1.

**Tabel 3.1** Kriteria dan Tipe Tanah Sulfat Masam Berdasarkan Jenis dan Kondisi Pirit

Kode	Tipe	Kedalaman Pirit (cm)	Kondisi
SMP-1	Alluvial bersulfida dangkal	<50	Menunjukkan adanya bahan sulfidik, pH 3,5–4,0
SMP-2	Alluvial bersulfida dalam	50–100	Menunjukkan adanya bahan sulfidik, pH >4,0
SMP-3	Alluvial bersulfida sangat dalam	>100	Menunjukkan adanya bahan sulfidik, pH 4,0–4,5
SMA-1	Alluvial bersulfat-1	<100	Belum adanya ciri horizon sulfurik, pH >3,5, dan tampak bercak pirit
SMA-2	Alluvial bersulfat-2	<100	Menunjukkan adanya ciri horizon sulfurik, pH <3,5
SMA-3	Alluvial bersulfat-3	>100	Menunjukkan adanya ciri horizon sulfurik, pH <3,5

Sumber: Widjaja-Adhi et al. (1992)

Fanning (2006) mengelompokkan tanah sulfat masam berdasarkan tingkat oksidasi bahan sulfidik menjadi tiga kelompok.

- 1) Tanah sulfat masam potensial (*potential acid sulfate soil*). Tanah-tanah yang mengandung mineral sulfida yang dapat teroksidasi menghasilkan asam sulfat (belum teroksidasi). Bahan sulfidik tersebut berada pada kedalaman kurang dari 50 cm dari permukaan tanah.
- 2) Tanah sulfat masam aktif (*active acid sulfate soil*). Tanah-tanah dengan bahan sulfidik yang telah teroksidasi (berada pada lapisan yang dekat permukaan) menghasilkan asam sulfat yang kemasaannya melebihi daya sangga tanah sehingga menyebabkan pH tanah yang sangat masam. Horizon sulfurik terdapat pada kedalaman kurang dari 50 cm dari permukaan tanah.
- 3) Tanah sulfat masam pascaaktif (*post active acid sulfate soil*) atau tanah sulfat masam matang (*ripe*). Tanah-tanah yang telah menunjukkan kondisi mineral sulfidanya telah teroksidasi secara sempurna. Tanah ini tidak lagi memiliki bahan sulfida dan S dalam solurnya dan memiliki nilai pH  $>4$ , kondisi yang umumnya terjadi akibat pengapuran atau drainase. Tanah ini memiliki bercak merah dan masih dapat mengalami peningkatan kemasaman tanah karena tingginya kandungan Al terlarut (Bigham & Nordstrom, 2000).

Adapun Breemen dan Pons (1978) mengelompokkan tanah sulfat masam berdasarkan kedalaman horizon sulfurik sebagai berikut.

- 1) Tanah sulfat masam potensial, yaitu tanah yang cirinya antara lain batas atas horizon sulfurik pada kedalaman  $>50$  cm dari permukaan tanah. Menurut Soil Survey Staff (2014), tanah ini digolongkan ke dalam kelompok besar (*great group*) *sulfaquent* yang dicirikan oleh warna kelabu dan masih mentah ( $n >0,7$ ).
- 2) Tanah sulfat masam aktual, yaitu tanah yang cirinya antara lain berwarna kecoklatan, cukup matang ( $n <0,7$ ), dan sangat masam (pH  $<3,5$ ). Tanah ini memiliki batas atas horizon sulfurik pada kedalaman  $<50$  cm dari permukaan tanah. Menurut Soil Survey

Staff (2014), tanah ini digolongkan ke dalam kelompok besar *sulfaquept*.

Department of Environment Regulation, Australia (2015a) menyatakan bahwa tanah sulfat masam potensial adalah tanah atau sedimen yang mengandung Fe sulfida dan atau mineral sulfida lainnya yang belum teroksidasi dan dalam keadaan tidak terganggu memiliki  $\text{pH} > 4$ . Adapun tanah sulfat masam aktual adalah tanah atau sedimen yang mengandung Fe sulfida dan atau mineral sulfida lainnya yang sebelumnya telah teroksidasi menghasilkan asam sulfat. Hal ini menyebabkan kemasaman ( $\text{pH} < 4$ ) dan terdapat bercak kuning dan/atau merah (jarosit/Fe oksida) dalam profil tanah. Tanah sulfat masam aktual umumnya juga mengandung residu Fe sulfida yang belum teroksidasi atau kemasaman potensial.

Walaupun demikian, Alihamsyah et al. (2004) dan Noor (2004) menyebut bahwa tanah sulfat masam potensial menjadi “lahan potensial” yang memiliki pengertian lahan pasang surut yang tanahnya mengandung bahan sulfidik  $< 2\%$  dan berada pada kedalaman  $> 50$  cm dari permukaan tanah. Adapun tanah sulfat masam aktual adalah lahan pasang surut yang tanahnya mengandung pirit  $> 2\%$  dan berada pada kedalaman  $< 50$  cm dari permukaan tanah. Pembagian kelompok tanah sulfat masam tersebut dibedakan berdasarkan tingkat kendala menurut potensi pengembangannya.

### C. Sifat Tanah Sulfat Masam

Istilah tanah sulfat masam diberikan kepada tanah yang mengandung mineral sulfida (terutama pirit) atau mineral hasil oksidasi sulfida (Dent, 1986). Mineral sulfida maupun mineral hasil oksidasinya menjadi komponen tanah yang sangat menentukan sifat tanah sulfat masam aktual maupun potensial (Pons, 1973; Dent, 1986; Dent & Pons, 1995). Menurut Dent (1986) dan Shamshuddin et al. (2014), tanah sulfat masam bersifat masam sampai sangat masam, mengandung unsur potensial meracun, seperti Fe, dengan konsentrasi sangat tinggi, dan memiliki ketersediaan hara yang rendah, terutama fosfat.

Hal ini menjadikan tanah sulfat masam memiliki tingkat kesuburan yang rendah. Berdasarkan penjelasan tersebut, pembahasan sifat tanah sulfat masam dalam bab ini lebih difokuskan pada sifat kimia tanahnya, sedangkan sifat fisika dan biologi tanah hanya dibahas singkat.

### 1. Sifat Kimia Tanah

Walaupun tanah sulfat masam sering dikelompokkan menjadi beberapa kelompok, tetapi kondisi di lapangan menunjukkan tidak banyak perbedaan sifat karena lebih dipengaruhi oleh kondisi hidrologis lahan (Tabel 3.2 dan 3.3). Kondisi hidrologis lahan adalah faktor utama yang menentukan perubahan sifat kimia tanah sulfat masam. Menurut Fageria et al. (2011), perubahan utama yang terjadi akibat terjadinya penggenangan tanah di lahan rawa adalah kondisi redoks, kemudian diikuti oleh reduksi  $Fe^{3+}$  dan  $Mn^{4+}$ . Besarnya pengaruh pasang surut air laut/sungai dan turun atau naiknya muka air tanah akibat pengaruh curah hujan yang terjadi secara musiman (berulang) menyebabkan dinamika sifat kimia tanah sulfat masam secara alamiah dan konsisten membentuk pola tertentu. Sifat tanah seolah membentuk siklus musiman. Hal ini berhubungan dengan terjadinya oksidasi dan pengendapan pada musim kemarau, kemudian pada musim hujan terjadi kondisi yang reduktif dan pelarutan dari hasil oksidasi musim sebelumnya (Hicks et al., 2009).

**Tabel 3.2** Sifat Kimia Tanah Sulfat Masam pada Beberapa DIR di Daerah Aliran Sungai (DAS) Barito

DIR	pH	DHL ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	Ca	Mg	K	Na	KTK	Al	H
			(mg/100g)						
Lupak luar	6,1	1,85	4,7	13,7	1,0	11,8	28,0	0,6	0,1
Tabunganen	5,1	1,57	4,3	10,7	0,8	3,9	25,8	1,7	0,5
Jelapat	5,5	0,12	6,9	8,2	0,2	1,1	21,2	0,8	0,1
Conoco	4,3	0,43	1,5	4,2	0,2	0,3	26,7	11,9	2,4
Serapat	4,0	0,28	1,4	4,6	0,3	0,6	27,8	11,5	1,5

DIR	pH	DHL ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	Ca	Mg	K	Na	KTK	Al	H
			(mg/100g)						
Tatas	4,2	0,11	0,3	1,3	0,3	0,1	28,8	11,3	1,0
Belawang	3,6	0,77	1,0	5,4	0,2	0,5	30,5	17,1	3,3
Sakalagun	4,8	0,08	1,2	5,0	0,2	0,7	24,1	8,5	0,8
Berambai	3,7	0,45	1,3	2,8	0,2	0,3	29,8	18,0	4,2
Talaran	3,5	0,88	1,3	1,7	0,2	0,3	25,9	20,4	4,0

Sumber: Konsten et al. (1990)

**Tabel 3.3** Sifat Kimia Tanah Sulfat Masam Potensial dan Aktual di Kalimantan Berdasarkan Kedalaman Tanah

Sifat-Sifat tanah*	Sulfat Masam Potensial		Sulfat Masam Aktual	
	0–50 cm	50–200 cm	0–50 cm	50–200 cm
pH H <sub>2</sub> O (1:5)	4,3	3,5	3,6	2,8
DHL (dS/m)	7,25	7,32	5,69	4,34
C-organik (%)	9,16	6,61	10,93	7,51
N-total (%)	0,59	0,28	0,49	0,22
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> HCl (mg/100 g)	115	33	45	17
K <sub>2</sub> O HCl(mg/100 g)	32	29	81	73
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Bray II (ppm)	17,7	15,2	19,3	12,6
Ca-dd (cmol/kg)	5,11	4,61	4,12	3,49
Mg-dd (cmol/kg)	7,05	8,02	9,25	8,30
K-dd (cmol/kg)	0,56	0,43	0,89	0,37
Na-dd (cmol/kg)	6,01	4,91	14,87	9,70
KTK (cmol/kg)	31,5	28,9	37,2	33,5
Kejenuhan basa (%)	49	55	42	40
Kejenuhan Al (%)	35	47	71	67
Pirit (%)	1,12	1,35	1,07	2,38

dd = Dapat ditukar

Sumber: Subagyo (2006)

## a. Kemasaman Tanah

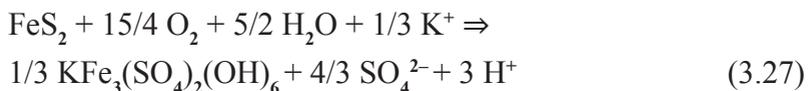
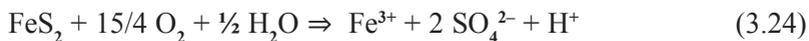
Reaksi tanah sulfat masam tergolong masam sampai sangat masam, yakni berkisar antara 4 untuk ordo entisol dan <4 untuk ordo inceptisol (Hairani & Susilawati, 2013). Akan tetapi, tanah sulfat masam yang tergenang dapat mempunyai pH tanah yang lebih tinggi, yaitu  $\text{pH} > 4,5$  (Fahmi et al., 2012). Reaksi tanah sulfat masam dipengaruhi oleh faktor-faktor, seperti keberadaan senyawa S tereduksi, mineral Fe oksida-hidrooksida,  $\text{SO}_4$ , bahan organik, bahan penetral, kelembapan tanah, dan kondisi hidologis lahan. Menurut Karimian et al. (2017), besarnya perubahan kemasaman tanah sulfat masam akibat oksidasi Fe sulfida ditentukan oleh kadar senyawa S tereduksi dan daya sangga kemasaman tanah.

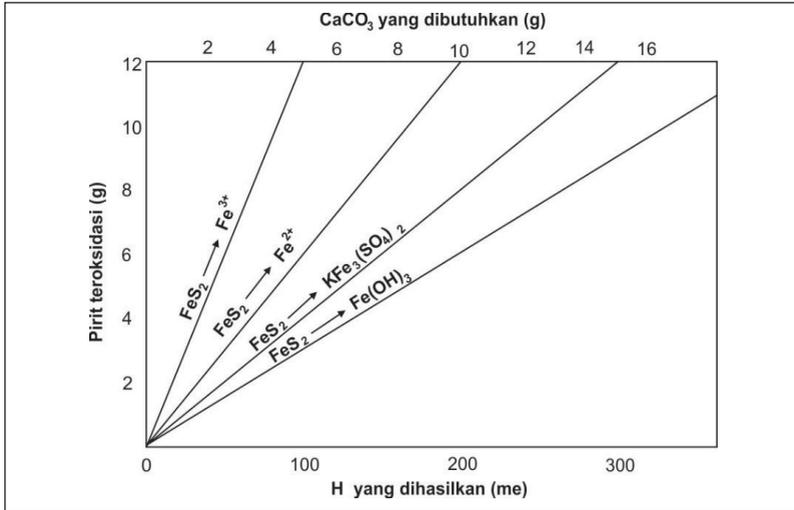
Tanah sulfat masam mengandung banyak senyawa S tereduksi, seperti pirit (Bloomfield, 1973; Hicks et al., 1999), markasit, dan Fe monosulfida (Bush et al., 2004; Boman et al., 2010). Beberapa mineral dilaporkan berpotensi menjadi sumber kemasaman bagi tanah sulfat masam, seperti pirit, gregit ( $\text{Fe}_3\text{S}_4$ ), dan mackinawit (FeS) (Dent, 1986; Fanning, 2006; Ahern et al., 2004). Pirit adalah salah satu pencirikan tanah sulfat masam sebagaimana dijelaskan sebelumnya bahwa pirit terbentuk pada kondisi anaerob yang sangat reduktif. Adanya perubahan atau gangguan seperti drainase atau fluktuasi tinggi muka air tanah dapat menyebabkan pirit teroksidasi (Fitzpatrick et al., 2017). Peningkatan kemasaman pada tanah sulfat masam, baik secara langsung maupun tidak langsung, utamanya disebabkan oleh teroksidasinya pirit. Boman et al. (2006) menyimpulkan bahwa pirit dan fraksi Fe sulfida lainnya yang tidak stabil merupakan sumber utama kemasaman untuk air, tanah sulfat masam, dan daerah sekitarnya. Menurut Cook et al. (2004), laju oksidasi pirit dengan *output* berupa asam sulfat pada proses transformasi tanah sulfat masam potensial menjadi tanah sulfat masam aktual dapat mencapai 10 t/ha/th. Secara detail, Fitzpatrick et al. (1998) menyatakan bahwa setiap 1.000 kg pirit yang teroksidasi akan menghasilkan 1.600 kg asam sulfat.

Pirit terbentuk pada kondisi anaerob yang sangat reduktif. Perubahan nilai Eh dan atau pH akan menyebabkan pirit teroksidasi

sehingga akan terjadi kembali proses pemasaman tanah. Banyak hasil penelitian yang menunjukkan bahwa oksidasi pirit didorong dengan kuat oleh kondisi yang sangat masam, di mana penurunan pH menyebabkan peningkatan kecepatan oksidasi pirit. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi lingkungan atau pH tanah itu sendiri memiliki pengaruh yang penting terhadap proses penyanggaan atau pemasaman tanah sulfat masam. Ward (2004) melaporkan bahwa laju oksidasi pirit sangat dipengaruhi oleh ketersediaan  $O_2$  dan pH tanah. Hasil penelitian Brown dan Jurinak (1989) serta Moses dan Herman (1991) membuktikan bahwa  $O_2$  dan  $Fe^{3+}$  adalah oksidator yang utama terhadap pirit pada kondisi alamiah. Molekul  $O_2$  bertindak sebagai oksidator dominan pada awal reaksi yang berjalan secara lambat pada pH sekitar netral. Ketika terbentuk  $Fe^{3+}$  pada pH yang lebih rendah,  $Fe^{3+}$  menjadi oksidator utama (Persamaan 3.28 sampai 3.31).

Menurut Breemen (1973), tingkat kemasaman tanah akibat oksidasi pirit tergantung pada Fe (Gambar 3.12). Jika semua  $Fe^{2+}$  teroksidasi dan tetap dalam larutan, setiap mol pirit yang teroksidasi menghasilkan 1 mol  $H^+$  dan  $Fe^{3+}$  (Persamaan 3.24). Akan tetapi, ketika oksidasi pirit menghasilkan  $Fe^{2+}$  terlarut, dihasilkan 2 mol  $H^+$  (Persamaan 3.25) dan jumlah mol  $H^+$  yang dihasilkan akan lebih banyak (4 mol  $H^+$ ) jika seluruh  $Fe^{2+}$  dioksidasi dan terhidrolisis menjadi Fe-oksihidrooksida (Persamaan 3.26). Adapun oksidasi pirit yang menyebabkan terbentuknya mineral jarosit menghasilkan lebih sedikit  $H^+$ , yaitu 3 mol (Persamaan 3.27). Artinya, pembentukan mineral jarosit merupakan bentuk sebuah reaksi keseimbangan di dalam tanah yang secara langsung menyangga pemasaman tanah yang lebih lanjut.





Sumber: Diolah dari Bremen (1973)

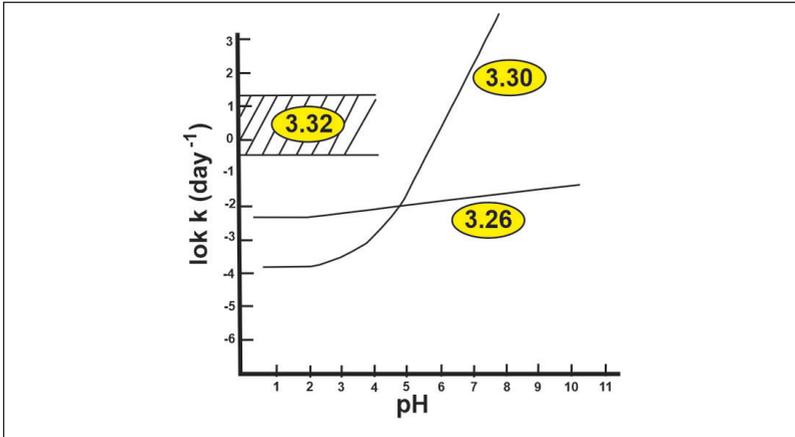
**Gambar 3.12** Produksi Asam Akibat Oksidasi Pirit

Selain ion  $H^+$ , selama proses oksidasi pirit oleh  $O_2$  dihasilkan juga  $Fe^{2+}$  dan  $SO_4$  (Persamaan 3.25). Setiap  $Fe^{2+}$  yang dihasilkan akan dioksidasi kembali oleh  $O_2$  dengan bantuan mikroorganisme yang kemudian menghasilkan 2 mol  $H^+$  (Persamaan 3.28). Proses ini menyebabkan penurunan kandungan  $O_2$  dalam tanah. Hal ini dapat terjadi jika tanah memiliki drainase yang buruk dan kandungan bahan organik yang tinggi (Van Mensvoort & Dent, 1998). Di sisi lain,  $Fe^{2+}$  dapat dioksidasi oleh  $O_2$  menjadi  $Fe^{3+}$  (Persamaan 3.29). Proses oksidasi  $Fe^{2+}$  menjadi  $Fe^{3+}$  dibantu oleh bakteri *thiobacillus ferrooxidans*. Sifat  $Fe^{3+}$  yang dihasilkan sangat tergantung pH tanah. Jika pH tanah  $>4,0$ ,  $Fe^{3+}$  akan mengalami hidrolisis yang kemudian membentuk Fe-oksihidroksida (mengendap) dan ion  $H^+$  (Persamaan 3.30), tetapi ketika pH  $<4,0$ , maka  $Fe^{3+}$  akan tetap dalam bentuk tersebut di larutan tanah.  $Fe^{3+}$  dapat kembali mengoksidasi pirit secara langsung dengan bantuan *thiobacillus ferrooxidans* dan menghasilkan  $H^+$ ,  $SO_4$ , serta  $Fe^{2+}$  (Persamaan 3.31) (Nordstrom, 1982; Dent, 1986; Cook et al., 2004). Reaksi ini hanya terjadi pada pH sangat rendah

karena bakteri *thiobacillus ferrooxidans* hanya hidup pada kisaran pH 2,8–3,5 dan  $\text{Fe}^{3+}$  hanya larut pada pH <3,0 (Kirk, 2004) dengan Eh >700 mV (Rose & Cravotta, 1998). Reaksi oksidasi ini berjalan lebih cepat dibandingkan oksidasi pirit oleh  $\text{O}_2$  (Breemen, 1973; Nordstrom, 1982). Menurut Ritchie (1994), reaksi oksidasi pirit oleh  $\text{Fe}^{3+}$  dapat mencapai puluhan bahkan ratusan kali lebih cepat dibandingkan oksidasi pirit oleh  $\text{O}_2$ . Pada kondisi ini, pemanfaatan  $\text{Fe}^{3+}$  sebagai oksidator oleh mikrobial lebih efisien dibandingkan  $\text{O}_2$  karena pada pH yang sangat masam tersebut kelarutan  $\text{Fe}^{3+}$  adalah sangat tinggi. Proses oksidasi pirit oleh  $\text{Fe}^{3+}$  dapat terus terjadi sehingga tanah tetap masam dan menjadi makin masam. Walaupun demikian, menurut Dent (1986), sebagian besar kemasaman yang dihasilkan dari oksidasi pirit oleh  $\text{Fe}^{3+}$  (Persamaan 3.31) akan dikonsumsi kembali dalam oksidasi  $\text{Fe}^{2+}$  menjadi  $\text{Fe}^{3+}$  (Persamaan 3.29) sehingga proses oksidasi pirit secara keseluruhannya menghasilkan Fe-oksihidrooksida,  $\text{SO}_4$ , dan  $\text{H}^+$  (Persamaan 3.26).



Reaksi oksidasi pirit oleh  $\text{Fe}^{3+}$  merupakan proses pemasaman tanah yang sangat penting. Menurut Nordstrom (1982), pemasaman tanah akibat oksidasi pirit oleh  $\text{Fe}^{3+}$  dapat disebut “proses abadi” (*self-perpetuating process*). Hal ini terkait dengan reduksi  $\text{Fe}^{3+}$  oleh pirit dengan bantuan bakteri *thiobacillus ferrooxidans* yang berjalan lebih cepat daripada oksidasi  $\text{Fe}^{2+}$  oleh  $\text{O}_2$  (Persamaan 3.31 dan 3.29; serta Gambar 3.13) dan terus-menerus terjadi karena kondisi tanah yang makin masam atau tetap masam. Ion  $\text{Fe}^{3+}$  yang dihasilkan dari proses tersebut akan kembali dan secara kontinu mengoksidasi pirit.



Sumber: Diolah dari Nordstrom (1982)

**Gambar 3.13** Perbandingan laju konstanta sebagai fungsi pH untuk oksidasi pirit oleh  $\text{Fe}^{3+}$  (Persamaan 3.31), oksidasi pirit oleh  $\text{O}_2$  (Persamaan 3.25), dan oksidasi  $\text{Fe}^{2+}$  oleh  $\text{O}_2$  (Persamaan 3.29).

Selain tergantung pada pirit, kemasaman tanah juga sangat dipengaruhi oleh keberadaan jenis mineral  $\text{Fe}^{3+}$  yang terbentuk. Hal ini berkaitan dengan terjadinya oksidasi  $\text{Fe}^{3+}$ -sulfida yang membentuk mineral  $\text{Fe}^{3+}$ , seperti jarosit dan schwermannit (berpotensi menjadi sumber kemasaman) (Persamaan 3.34 dan 3.35) (Fitzpatrick et al., 2009b; Vithana, 2014). Mineral tersebut bersifat amorf, metastabil, dan agak larut, serta pada kondisi lingkungan tertentu, mineral-mineral tersebut akan mengalami transformasi menjadi gutit. Selama proses tersebut berlangsung, terjadi pelepasan asam ke larutan tanah (Gambar 3.19) (Fanning, 2006; Ahern et al., 2004).

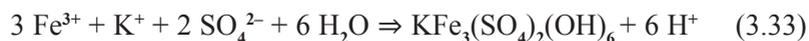
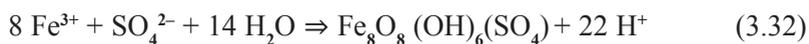
Selain berperan sebagai sumber kemasaman dalam reaksi oksidasi pirit pada  $\text{pH} < 3$  (Persamaan 3.31) (Bonnissel-Gissing et al., 1998) dan melalui reaksi hidrolisis (Persamaan 3.30), keberadaan mineral  $\text{Fe}^{3+}$  juga dapat menjadi faktor pembatas terhadap reaksi pemasaman tanah. Artinya, ini berdampak positif terhadap kemasaman tanah sulfat masam. Mineral  $\text{Fe}^{3+}$  di larutan tanah menentukan besaran peningkatan pH akibat penggenangan tanah sulfat masam.

Menurut Kirk (2004) serta Reddy dan DeLaune (2008), perubahan pH karena reaksi redoks dalam tanah ditentukan oleh keberadaan dan ketersediaan mineral Fe oksida-hidroksida. Sahrawat (2015) menyatakan bahwa peningkatan pH tanah-tanah masam di lahan rawa secara kuantitatif sangat terkait dengan sistem  $\text{Fe}(\text{OH})_3\text{-Fe}^{2+}$ . Hal ini disebabkan tanah-tanah tersebut kaya akan  $\text{Fe}^{3+}$  yang dapat tereduksi (Ponnamperuma, 1972; Narteh & Sahrawat, 1999).  $\text{Fe}^{3+}$  berperan penting sebagai penerima elektron pada reaksi reduksi yang terjadi di tanah sulfat masam dalam suasana reduktif. Hasil penelitian Konsten et al. (1994) menunjukkan bahwa rendahnya kandungan  $\text{Fe}^{3+}$  dalam tanah sulfat masam di Kalimantan menyebabkan pH tanah tidak dapat naik setelah digenangi, reduksi 1%  $\text{Fe}^{3+}$ -oksida mengonsumsi 8 H (cmol/kg).

Oleh sebab itu, dibandingkan tanah mineral umumnya, kecepatan reduksi pada tanah sulfat masam yang digenangi lebih lambat karena faktor kemasaman yang tinggi serta rendahnya ketersediaan hara dan bahan organik yang mudah terdekomposisi, atau kombinasi dari kondisi-kondisi tersebut. Kondisi lingkungan tersebut mengakibatkan bakteri anaerob kurang mampu berkembang. Kondisi ini biasanya terjadi pada tanah sulfat masam tua yang mengandung kristal gutit dan hematit (bersifat stabil) sehingga sulit direduksi. Adapun tanah sulfat masam muda yang umumnya kaya akan koloid Fe akan lebih mudah direduksi sehingga cenderung lebih mudah mengalami peningkatan pH ketika digenangi. Hasil penelitian Konsten et al. (1990) menunjukkan bahwa pada tanah yang mempunyai kandungan  $\text{Fe}^{3+}$ -oksida yang rendah tidak terjadi peningkatan pH, meskipun telah digenangi. Dengan demikian, dapat dinyatakan bahwa tingkat kelarutan  $\text{Fe}^{2+}$  dan kenaikan pH sangat dipengaruhi oleh ketersediaan Fe yang dapat direduksi, bahan organik, dan suasana anaerob.

Selain pirit, keberadaan mineral Fe polisulfida lainnya, seperti jarosit dan schwertmannit, adalah bahan sulfurik yang berpotensi menjadi sumber kemasaman tanah atau sebaliknya menjadi penyangga peningkatan pH tanah, baik selama proses pembentukannya, hidrolisisnya, maupun pelarutannya. Mineral jarosit dan schwertmannit

adalah produk dari oksidasi mineral Fe sulfida yang terbentuk pada kondisi yang sangat oksidatif (Eh >400 mV) dan pH yang sangat masam pH 1,7–4,0 (Breeman, 1976; Zahrai et al., 2013). Selama proses pembentukan kedua mineral tersebut, terjadi pelepasan ion H<sup>+</sup> (Persamaan 3.32 dan 3.33). Jika jumlah ion H<sup>+</sup> yang dilepaskan ke larutan tanah melebihi daya sangga tanah, akan terjadi pemasaman tanah (Breeman, 1976; Pons et al., 1982; Dent, 1986; Ahern et al., 2004). Sebaliknya, jika terjadi hidrolisis untuk menuju keseimbangan pada pH tanah yang meningkat (pH >5), ion H<sup>+</sup> juga akan dilepaskan ke larutan tanah sebagaimana persamaan 3.34 dan 3.15 (Regenspurg, 2002; Ahern et al., 2004; Burton et al., 2007; 2008; Karimian et al., 2018). Akibatnya, pH tanah akan tetap berada dalam keseimbangan <5 (Trueman et al., 2020).



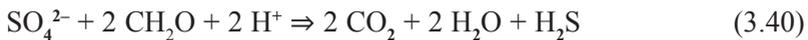
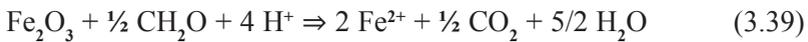
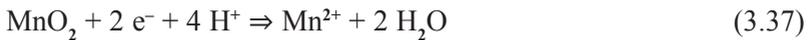
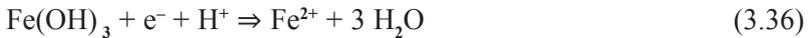
Sebagaimana telah disebutkan sebelumnya, keberadaan mineral jarosit dapat berperan sebagai agen daya sangga pH tanah. Menurut Mosley et al. (2017), pH tanah sulfat masam dapat tidak mengalami peningkatan disebabkan adanya proses penyanggaan dari mineral jarosit. Madden et al. (2012) menggambarkan reaksi penyanggaan yang terjadi pada pelarutan jarosit pada pH yang lebih rendah (Persamaan 3.14) atau pH lebih tinggi dari 3,5 (Persamaan 3.35).



Tanah sulfat masam di Indonesia umumnya terdapat di lahan pasang surut. Artinya, lahan tersebut secara periodik dapat mengalami penggenangan. Beberapa saat setelah penggenangan, O<sub>2</sub> yang mengisi pori-pori tanah digantikan oleh molekul air. Menurut Reddy dan DeLaune (2008), pada kondisi anaerob, laju difusi O<sub>2</sub> adalah 10.000 kali lebih lambat daripada kondisi aerob. Jumlah O<sub>2</sub> menjadi dapat

mendekati nol (0) hanya dalam beberapa jam penggenangan. Menurut Reddy et al. (1980), dua proses konsumsi  $O_2$  terpenting pada tanah yang anaerob adalah: (1) reaksi oksidasi  $Fe^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ , dan  $NH_4^+$  dan (2) respirasi mikroorganisme tanah. Makin lama tergenang, tanah cenderung makin tereduksi sehingga selanjutnya digunakanlah unsur anorganik lainnya sebagai penerima elektron oleh mikroorganisme. Urutan unsur tereduksi tergantung pada afinitas penerima elektron dan energi yang dihasilkan dalam aktivitas tersebut (Gambar 3.24).

Penggenangan tanah akan meningkatkan konsumsi elektron dan proton. Menurut Reddy & DeLaune (2008), pada kondisi tertentu, rasio konsumsi proton dan elektron dapat  $>1$ . Hal ini mendorong peningkatan pH tanah melalui reaksi reduksi maupun terjadinya pelarutan karbonat atau bikarbonat pada saat tergenang (Fageria et al., 2011; Fahmi et al., 2012a; Wang, Liu, Butterly et al., 2013). Peningkatan pH akibat reaksi reduksi  $Fe^{3+}$ ,  $Mn^{4+}$ , dan  $SO_4$  yang memanfaatkan bahan organik sebagai donor elektron (Konsten et al., 1994; Dent & Pons, 1995; Reddy & DeLaune, 2008) adalah sebagai berikut:



Besarnya peningkatan pH yang terjadi akibat penggenangan tanah sulfat masam dipengaruhi oleh banyak faktor, antara lain lama genangan, pH tanah awal, bahan organik, konsentrasi unsur sebagai penerima elektron, seperti  $Fe^{3+}$ ,  $Mn^{4+}$ , dan  $SO_4$ , serta ketersediaan bahan penetral. Setiap faktor tersebut saling berinteraksi membentuk kondisi-kondisi yang spesifik. Perubahan pH akan makin besar terjadi pada tanah yang lebih masam dibandingkan tanah yang mendekati

netral (Butterly et al., 2010; Zakiah & Fahmi, 2020). Magdoff et al. (1987) menyatakan bahwa suatu tanah memiliki daya sangga yang lebih baik pada pH >7,0 atau <4,0 dibandingkan pada kisaran pH 4,0–7,0. Hubungan peningkatan pH dengan kondisi Eh tanah dapat dilihat dari hasil penelitian Yu dan Patrick (2003) yang menunjukkan bahwa diperlukan penurunan Eh tanah sekitar 94 mV untuk peningkatan satu unit pH. Tanah-tanah yang mengalami peningkatan pH relatif cepat adalah tanah sulfat masam muda dengan kandungan bahan organik yang belum terdekomposisi lanjut, kemasamaan-total yang rendah, dan kejenuhan basa yang tinggi (Breemen & Pons, 1978; Prade et al., 1986).

Faktor lainnya yang memengaruhi pH tanah sulfat masam adalah bahan organik (Yuan, Fitzpatrick et al., 2015; Yuan, Mosley et al., 2016). Menurut Michael (2020), aplikasi bahan organik efektif meningkatkan pH tanah sulfat masam aktual dan mampu mencegah oksidasi tanah sulfat masam potensial. Bahan organik memiliki peranan penting terhadap reaksi redoks dan proses khelatisasi Fe dalam tanah. Selain itu, bahan organik memiliki pengaruh langsung terhadap pH tanah melalui proses pelarutan asam-asam organik yang berpotensi memasamkan tanah. Bahan organik dapat menjadi faktor utama perubahan pH tanah sebagaimana dilaporkan oleh Sarwani et al. (2006) bahwa keberadaan Fe<sup>3+</sup>-oksida tidak berpengaruh terhadap peningkatan pH tanah sulfat masam setelah digenangi. Hal ini disebabkan bahan organik yang diberikan memiliki kualitas yang rendah. Ketika jumlah dan kualitas bahan organik dalam tanah rendah, tidak akan terjadi peningkatan pH tanah (Sarwani et al., 2006; Yuan, Mosley et al., 2015).

Pengaruh aplikasi bahan organik terhadap peningkatan pH tanah sulfat masam ditentukan oleh beberapa faktor, salah satunya adalah kualitas bahan organik (Yuan, Fitzpatrick et al., 2015; Yuan, Mosley et al., 2016). Dang et al. (2015) melaporkan bahwa aplikasi bahan organik dengan kualitas yang berbeda-beda menyebabkan perbedaan pH tanah sulfat masam. Bahan organik yang relatif mudah terdekomposisi akan cenderung menyebabkan tanah lebih reduktif selama proses penggenangan (Fahmi & Sarwani, 2013) dan

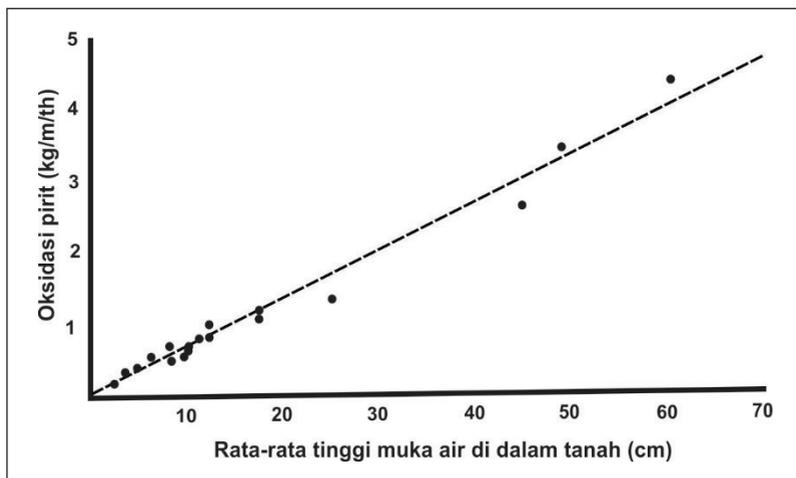
pH tanah akan lebih mudah meningkat (Kölbl et al., 2017; Michael, 2020). Pemberian bahan organik yang memiliki C/N rendah–sedang dapat menyebabkan peningkatan pH tanah selama penggenangan dan mempertahankan nilai pH tanah, walaupun pada kondisi yang lebih oksidatif (Jayalath, Fitzpatrick et al., 2016; Jayalath, Mosley et al., 2016; Yuan, Mosley et al., 2016; Michael, 2020). Akan tetapi, jika ameliorasi tanah dengan senyawa organik sederhana atau senyawa yang mengandung  $\text{NO}_3$  atau  $\text{NH}_4$  ataupun senyawa yang hanya mengandung C saja, berpotensi memasamkan atau tidak akan efektif dalam meningkatkan pH tanah sulfat masam (Michael, 2020). Reid dan Butcher (2011) menyimpulkan bahwa aplikasi bahan organik untuk meningkatkan pH tanah sulfat masam hanya efektif pada kondisi yang tergenang. Bahan organik yang diberikan pada kondisi anaerob akan menyebabkan meningkatnya aktivitas mikrobial tanah yang secara tidak langsung dapat menurunkan kadar  $\text{O}_2$  sehingga terjadi penurunan Eh tanah (Michael et al., 2015; Jayalath, Mosley et al., 2016). Beberapa mikroba yang berkembang pada kondisi ini, yaitu *Desulfovibrio* (Michael, 2018), *Paraferrimonas*, dan *Geobacter* (Ling et al., 2015).

Salah satu faktor yang sering diabaikan pada saat membahas tentang kemasaman tanah sulfat masam adalah keberadaan tanaman atau tumbuhan. Seperti telah diketahui secara umum bahwa salah satu proses penyerapan hara (bentuk kation) oleh akar tanaman adalah dengan melepaskan ion  $\text{H}^+$  ke larutan tanah atau mekanisme pelepasan  $\text{O}_2$  pada sekitar perakarannya yang berdampak pada teroksidasinya pirit atau  $\text{Fe}^{2+}$  (Michael & Reid, 2018). Proses oksidasi tersebut tentunya akan berpengaruh pada tingkat kemasaman tanah sulfat masam. Reid dan Butcher (2011) berpendapat bahwa tanaman *Phragmites* mempercepat pengeringan tanah dan menyebabkan kerejakan yang luas dan pemasaman. Bahkan, pada kondisi basah-kering, baik *Phragmites* maupun rumput meningkatkan pemasaman tanah.

Kemasaman tanah sulfat masam dipengaruhi oleh banyak faktor, seperti keberadaan pirit, mineral Fe oksida-hidrooksida,  $\text{SO}_4$ , bahan organik, bahan penetral, keberadaan tanaman, dan kondisi hidologis

lahan atau kelembapan tanah (Gambar 3.14). Setiap faktor secara kumulatif saling berinteraksi sehingga menyebabkan adanya dinamika kemasaman tanah. pH tanah dapat tidak berubah ataupun berubah secara tidak nyata karena besarnya daya sangga tanah ataupun adanya mekanisme lain yang membatasi reaksi keseimbangan kimia tanah. Keberadaan pirit dalam lapisan tanah memiliki peranan besar dalam menentukan terjadinya proses pemasaman tanah karena turunnya muka air tanah. Menurut Blunden (2000), jumlah asam yang dihasilkan akibat oksidasi pirit ditentukan oleh posisi lapisan tanah yang mengandung pirit terhadap tinggi muka air tanah. Walaupun demikian, kondisi hidrologis lahan dapat tidak berpengaruh nyata pada dinamika kemasaman tanah karena faktor-faktor yang dipengaruhi dari perubahan redoks berada dalam kuantitas atau kualitas yang rendah, misalnya kandungan  $Fe^{3+}$  dan bahan organik yang rendah. Hal ini sebagaimana dilaporkan oleh Konsten et al. (1994) dan Hicks et al. (1999).

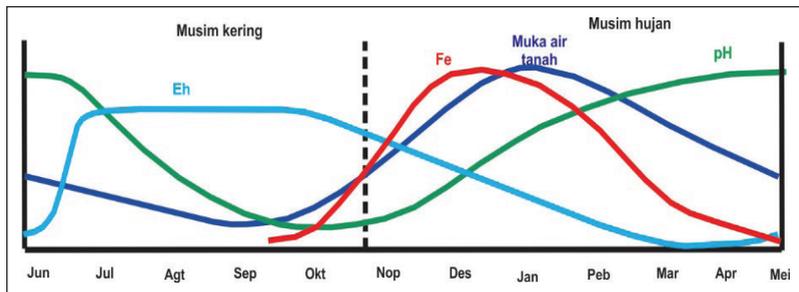
Pasang-surutnya air laut/sungai dan curah hujan adalah faktor yang memengaruhi kondisi hidrologis lahan rawa. Kondisi hidologis



Sumber: Diolah dari Bronswijk et al. (1995)

**Gambar 3.14** Laju Oksidasi Pirit Berdasarkan Tinggi Muka Air dalam Tanah

lahan atau kelengasan tanah adalah faktor yang paling menentukan kondisi redoks tanah sehingga besar-kecilnya pengaruh dari setiap faktor lainnya tergantung pada kondisi hidrologis lahan. Menurut Mosley, Fitzpatrick et al. (2014), perubahan pH air atau tanah sulfat masam ditentukan kondisi redoks tanah. Telah dilaporkan oleh banyak peneliti bahwa penggenangan tanah sulfat masam menyebabkan peningkatan pH tanah (Unger, Motavalli et al., 2009; Fageria et al., 2011; Fahmi et al., 2012; dan Wang, Liu, Butterly et al., 2013a). Demikian pula sebaliknya, menurunnya permukaan air tanah akibat kekeringan dan musim kemarau dapat menyebabkan penurunan pH tanah (Mosley, Palmer et al., 2014). Dinamika kemasaman air dan tanah sulfat masam di lahan pasang surut dilaporkan oleh Hanhart dan Ni (1993), Phong (2008), serta Karimian et al. (2017) membentuk suatu pola musiman sesuai fluktuasi muka air tanah sepanjang tahun. Mereka menunjukkan adanya peningkatan kemasaman tanah pada akhir musim kemarau dan mencapai puncak terendah pada awal musim hujan. Penurunan pH tanah pada awal periode penggenangan ini juga dilaporkan oleh Mosley, Shand et al. (2014). Sebaliknya, kemasaman tanah mulai meningkat kembali pada beberapa bulan setelah musim hujan dimulai dan kemudian mencapai puncak tertinggi pada saat musim hujan mulai berakhir. Dinamika kemasaman tanah ini berhubungan dengan kondisi redoks tanah, proses pelarutan, dan pencucian di larutan tanah (Gambar 3.15). Kemasaman tanah



Sumber: Diolah dari Hanhart dan Ni (1993)

**Gambar 3.15** Pola Dinamika Ph dan Eh Tanah Musiman di Tanah Sulfat Masam

tertinggi terjadi pada saat tanah sulfat masam berada dalam kondisi yang lebih oksidatif dan terjadinya pelarutan hasil oksidasi tersebut. Adapun kemasaman tanah terendah terjadi pada saat tanah sulfat masam berada dalam kondisi yang lebih reduktif dan terjadinya pengendapan dan pelarutan material hasil redoks di larutan tanah. Tanda-tanda alam di lapangan yang mengindikasikan kondisi kemasaman ataupun tingginya konsentrasi Fe dalam air dapat dilihat pada Gambar 3.16.



Foto: Arifin Fahmi (2014)

**Gambar 3.16** Warna air yang jernih di tanah sulfat masam menunjukkan kondisi yang sangat masam dan warna kemerahan menunjukkan tingginya kandungan Fe.

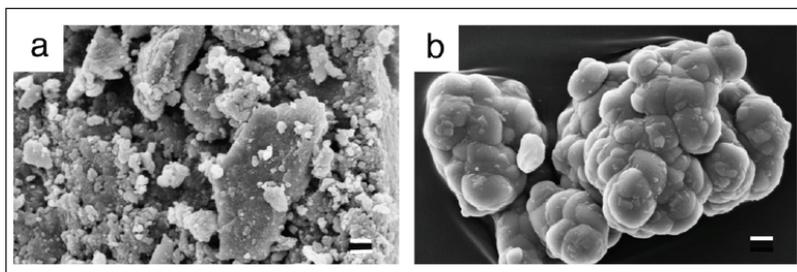
## b. Besi

### 1) Sifat dan Dinamika Kelarutan Besi

Besi adalah salah satu mineral yang sangat reaktif terhadap perubahan kondisi lingkungan atau tanah. Pelarutan, reaktivitas, dan transformasi Fe juga ditentukan oleh faktor internal mineral itu sendiri. Seperti dijelaskan sebelumnya bahwa reaktivitas Fe sangat ditentukan oleh derajat kristalisasi dan luas permukaannya. Makin rendah derajat kristalisasinya (lebih amorf), Fe cenderung makin reaktif. Besi yang memiliki derajat kristalisasi rendah biasanya memiliki luas permukaan yang besar. Menurut Zachara et al. (1998) dan Bonneville et al. (2009), reduksi  $\text{Fe}^{3+}$  ditentukan oleh derajat kristalisasi dan luas permukaannya. Di sisi lain, diketahui bahwa fluktuasi redoks tanah sangat menentukan derajat kristalisasi mineral Fe (Winkler et al., 2018).

Besi adalah unsur terbanyak keempat yang ditemukan di bumi setelah Al (Stucky, 2006). Besi adalah unsur esensial bagi makhluk hidup dan unsur yang terlibat dalam reaksi redoks di tanah. Besi di alam, khususnya di tanah, dapat terbentuk sebagai oksida, sulfida, karbonat, dan  $\text{SO}_4$  (Stucky, 2006). Di dalam tanah, Fe dapat terlarut melalui reaksi protolisis atau reduksi karena Eh yang rendah (Schwertmann & Taylor, 1989). Besi (hidro)oksida yang terdapat dalam tanah dapat berasal dari mineral primer, seperti olivin dan piroksin (Breemen & Buurman, 2002). Menurut Liu (1999), Fe yang terlarut dapat membentuk spesies baru di mana komposisi, fase, dan distribusinya dapat berubah-ubah sesuai dengan kondisi lingkungannya. Misalnya, mineral Fe-amorf dominan terdapat pada lingkungan yang jenuh air (Fiedler & Sommer, 2004) ataupun proses transformasi jarosit dan schwertmannit menjadi gutit yang sangat dipengaruhi oleh kondisi hidrologis/kelengasan tanah (Vithana et al., 2015). Proses biogeokimia Fe bersifat sangat kompleks dan terkait dengan banyak proses, baik biotik maupun abiotik. Misalnya, proses reduksi  $\text{Fe}^{3+}$  dan bahan organik yang terjadi secara bersamaan sangat memengaruhi siklus unsur lainnya.

Besi dalam tanah pada prinsipnya berada dalam dua kondisi bilangan oksidasi, yaitu feri ( $\text{Fe}^{3+}$ ) dan fero ( $\text{Fe}^{2+}$ ), tergantung kondisi lingkungan (Kyuma, 2004). Beberapa spesies mineral Fe yang umum ditemui di alam adalah pirit ( $\text{FeS}_2$ ), markasit ( $\text{FeS}_2$ ; orthorhombik), makinawit ( $\text{FeS}_{0,9}$ ), greigit ( $\text{Fe}_3\text{S}_4$ ), gutit ( $\alpha\text{-FeOOH}$ ), lepidokrosit ( $\gamma\text{-FeOOH}$ ), hematit ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ), maghemit ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ), magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), limonit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3 \text{H}_2\text{O}$ ), ferihidrit ( $\text{Fe}_5\text{HO}_8 \cdot 4 \text{H}_2\text{O} / 5 \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 9 \text{H}_2\text{O}$ ), siderit ( $\text{FeCO}_3$ ), trolit ( $\text{FeS}$ ), strengit ( $\text{FePO}_4$ ), schwertmannit ( $\text{Fe}_8\text{O}_8 (\text{OH})_6 (\text{SO}_4)_2$ ), dan vivianit ( $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2$ ) (Breemen, 1975; Sullivan & Bush, 1997; Bush, 2000; Bush & Sullivan, 1997; Bush et al., 2000; Reddy & DeLaune, 2008; Mosley, Fitzpatrick et al., 2014). Morfologi mineral Schwertmannit dan jarosit menggunakan SEM dapat dilihat pada Gambar 3.17. Menurut Kyuma (2004), hematit dan maghemit jarang ditemui di tanah rawa. Adapun siderit dan vivianit dapat ditemukan pada tanah yang sangat reduktif dengan kandungan bahan organik yang tinggi. Menurut Kojima dan Kawaguchi (dalam Kyuma, 2004), gutit banyak ditemukan dalam tanah dari lahan rawa tropis.

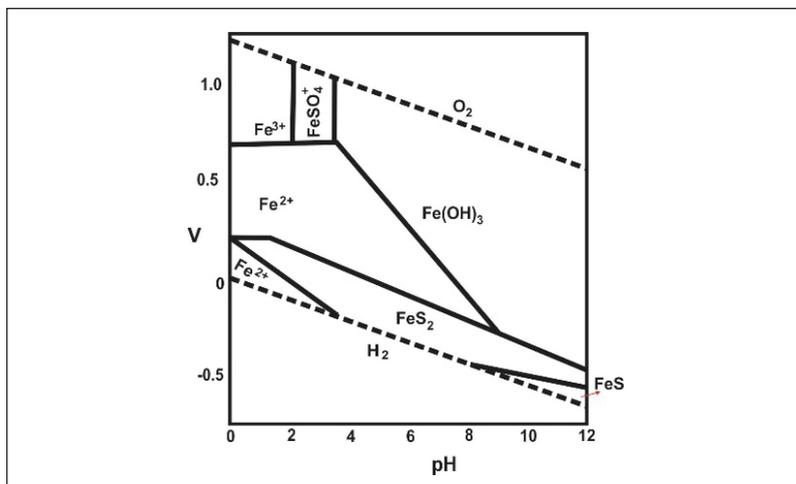


Sumber: Vithana et al. (2015)

**Gambar 3.17** Morfologi (a) Mineral Schwertmannit dan (b) Jarosit Menggunakan SEM

Besi yang berbentuk oksida, hidroksida, oksihidroksida, dan sulfida adalah logam yang paling banyak ditemukan di dalam tanah. Bentuk-bentuk tersebut di lahan rawa bersifat larut, dapat tukar, dapat direduksi, dan residual (Reddy & DeLaune, 2008). Di tanah sulfat

masam, mineral Fe dapat dijumpai sebagai guttit, pirit, lepidokrosit, schwertmannit, ferihidrit, jarosit, siderit, vivianit, dan strengit (Nue & Lin, 1989; Burton et al., 2007; Oxmann et al., 2008; Johnston et al., 2011). Stabilitas, sifat, dan keberadaan dari setiap mineral tersebut sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor lingkungan, seperti Eh, pH (Gambar 3.18), bahan organik, kelembapan/kadar lengas tanah, mikroorganismenya, dan keberadaan anion (Reddy & DeLaune, 2008). Selain itu, dapat juga dipengaruhi oleh sifat mineral itu sendiri, seperti luas permukaan spesifik dan kelarutannya (Poggenburg et al., 2018) serta sistem pengelolaan lahan (Sukitprapanon et al., 2016).



Sumber: Diolah dari Rose dan Cravotta (1998)

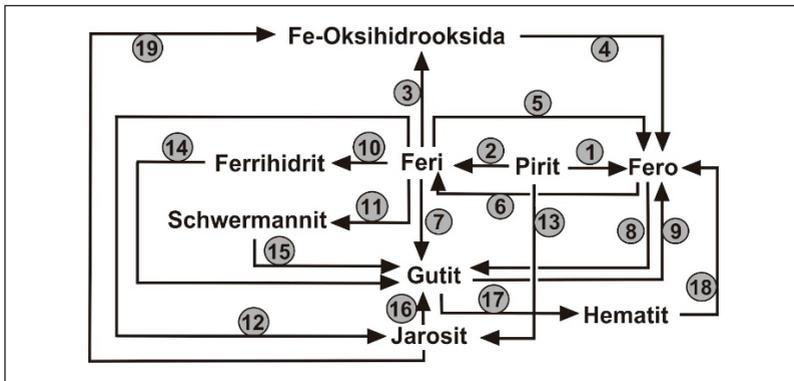
**Gambar 3.18** Diagram Stabilitas Beberapa Mineral Fe Berdasarkan Nilai pH dan Eh

Besi adalah salah satu unsur logam yang paling banyak ditemukan di tanah sulfat masam. Keberadaannya dan kelarutannya sangat menentukan sifat tanah. Di lahan rawa seperti tanah sulfat masam, keberadaan Fe sering dihubungkan dengan terjadinya gejala keracunan. Hal ini disebabkan konsentrasinya yang sangat besar, khususnya pada kondisi yang tergenang. Menurut Fahmi et al. (2009), konsentrasi Fe<sup>2+</sup> dapat mencapai 4.500 ppm di tanah sulfat masam yang

tergenang. Di sisi lain, kelarutan Fe di dalam tanah sulfat masam juga sangat tergantung kondisi lingkungan dan sifat mineral Fe itu sendiri. Beberapa faktor yang memengaruhi dinamika kelarutan Fe di tanah sulfat masam akan dibahas lebih detail pada bagian berikutnya.

## 2) Kemasaman dan Redoks Potensial Tanah

Kemasaman tanah, Eh, dan bahan organik tanah adalah faktor utama yang menentukan sifat geokimia Fe di lahan rawa. Perubahan pH dan atau Eh tanah akan cenderung mengubah spesies Fe yang aktif di larutan tanah. Menurut Sahrawat (2015), pH dan Eh adalah variabel utama yang menentukan sifat elektrokimia tanah. Berdasarkan Gambar 3.18, diketahui bahwa pada pH <2,0 dan Eh >700 mV, Fe yang aktif adalah Fe<sup>3+</sup>. Adapun penurunan Eh <800 mV (pada pH yang sama) membuat spesies Fe yang aktif adalah Fe<sup>2+</sup> (Kolling et al., 1999; Reddy & DeLaune, 2008). Oksidasi pirit dapat menghasilkan Fe<sup>2+</sup> dan SO<sub>4</sub>. Kedua ion tersebut secara cepat teroksidasi kembali membentuk beberapa mineral baru sesuai kondisi lingkungan. Beberapa senyawa Fe yang terbentuk akibat oksidasi pirit disajikan dalam Gambar 3.19.



Keterangan:

- 1)  $\text{FeS}_2 + \text{H}_2\text{O} + 7/2 \text{O}_2 \Rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2 \text{SO}_4^{2-} + 2 \text{H}^+$
- 2)  $\text{FeS}_2 + 15/4 \text{O}_2 + 1/2 \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{Fe}^{3+} + 2 \text{SO}_4^{2-} + \text{H}^+$
- 3)  $\text{Fe}^{3+} + 3 \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 + \text{H}^+$

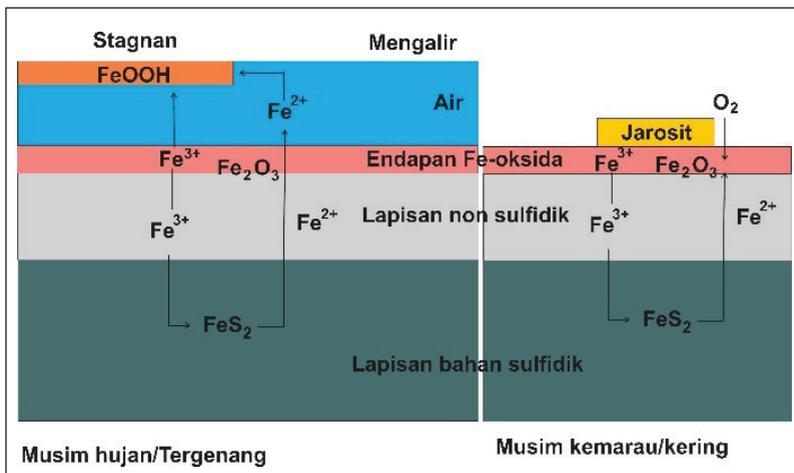
Ketika pH tanah >4, Fe<sup>3+</sup> menjadi tidak stabil sehingga mengendap dalam bentuk Fe(OH)<sub>3</sub> (Mensvoort & Dent, 1998)

- 4)  $\text{Fe}(\text{OH})_3 + 1/4 \text{CH}_2\text{O} + 2 \text{H}^+ \Rightarrow \text{Fe}^{2+} + 1/4 \text{CO}_2 + 11/4 \text{H}_2\text{O}$
- 5)  $8 \text{Fe}^{3+} + \text{CH}_3\text{COOH} + 2 \text{H}_2\text{O} \Rightarrow 2 \text{CO}_2 + 8 \text{Fe}^{2+} + 8 \text{H}^+$   
Terjadi jika tersedia bahan atau senyawa organik yang mudah terdekomposisi.  
 $14 \text{Fe}^{3+} + \text{FeS}_2 + 8 \text{H}_2\text{O} \Rightarrow 15 \text{Fe}^{2+} + 2 \text{SO}_4^{2-} + 16 \text{H}^+$   
Ketika pH tanah <3,  $\text{FeS}_2$  akan mereduksi  $\text{Fe}^{3+}$  (Kirk, 2004).
- 6)  $\text{Fe}^{2+} + 1/4 \text{O}_2 + \text{H}^+ \Rightarrow \text{Fe}^{3+} + 1/2 \text{H}_2\text{O}$   
Pada pH yang rendah (pH 2,0–3,5/4), *Thiobacillus ferrooxidans* mengoksidasi S tereduksi dan  $\text{Fe}^{2+}$  (Dent, 1986).
- 7)  $\text{Fe}^{3+} + 2 \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{FeOOH} + 3 \text{H}^+$   
Ketika pH tanah >4, drainase yang buruk, dan kandungan bahan organik yang tinggi, maka  $\text{Fe}^{3+}$  tidak stabil sehingga mengendap dalam bentuk FeOOH (Mensvoort & Dent, 1998).
- 8)  $\text{Fe}^{2+} + 1/4 \text{O}_2 + 3/2 \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{FeOOH} + 2 \text{H}^+$
- 9)  $4 \text{FeOOH} + 1/2 \text{H}_2\text{S} + 7 \text{H}^+ \Rightarrow 4 \text{Fe}^{2+} + 1/2 \text{SO}_4^{2-} + 6 \text{H}_2\text{O}$   
Terjadi karena penurunan pH dan peningkatan  $\text{H}_2\text{S}$  (Wilkin & Barnes, 1996).
- 10)  $5 \text{Fe}^{3+} + 6 \text{H}_2\text{O} + 3 \text{O}_2 \Rightarrow \text{Fe}_5\text{HO}_8 4 \text{H}_2\text{O} + 3 \text{H}^+$   
Terjadi ketika pH meningkat, sering mengalami fluktuasi redoks, dan kaya bahan organik.
- 11)  $8 \text{Fe}^{3+} + \text{SO}_4^{2-} + 14 \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{Fe}_8\text{O}_8 (\text{OH})_6 (\text{SO}_4) + 22 \text{H}^+$   
Terjadi pada konsentrasi  $\text{SO}_4$  berkisar 1000–3000  $\mu\text{g}/\text{ml}$  dengan pH 2,5–4,5 (sedikit lebih tinggi daripada terbentuknya jarosit) (Bigham et al., 1990; Bigham & Murad dalam Fanning et al., 2002).
- 12)  $3 \text{Fe}^{3+} + \text{K}^+ + 2 \text{SO}_4^{2-} + 6 \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6 + 6 \text{H}^+$   
Kondisi lingkungan; pH 3–4, konsentrasi  $\text{SO}_4 > 3000 \mu\text{g}/\text{ml}$  (Bigham & Murad dalam Fanning et al., 2002).
- 13)  $\text{FeS}_2 + 15/4 \text{O}_2 + 5/2 \text{H}_2\text{O} + 1/3 \text{K}^+ \Rightarrow 1/3 \text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6 + 4/3 \text{SO}_4^{2-} + 3 \text{H}^+$   
Terjadi pada kondisi yang sangat oksidatif (Eh >400 mV) dan pH 1,7–4,0 (Dent, 1986; Zahrai et al., 2013).
- 14)  $\text{Fe}_5\text{HO}_8 4 \text{H}_2\text{O} \Rightarrow 5 \text{FeOOH} + 2 \text{H}_2\text{O}$   
Terjadi pada kisaran pH yang lebar, tetapi utamanya pada pH yang mendekati netral (4,0–5,6) di mana ferihidrit bersifat lebih mudah larut (Schwertmann & Murad, 1983)
- 15)  $\text{Fe}_8\text{O}_8 (\text{OH})_6 (\text{SO}_4) + 2 \text{H}_2\text{O} \Rightarrow 8 \text{FeOOH} + \text{SO}_4^{2-} + 2 \text{H}^+$   
Terjadi karena peningkatan pH, konsentrasi  $\text{SO}_4$ , dan karbon organik terlarut menurun.
- 16)  $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6 \Rightarrow 3 \text{FeOOH} + \text{K}^+ + 2 \text{SO}_4^{2-} + 3 \text{H}^+$   
Terjadi karena peningkatan pH dan kadar  $\text{SO}_4$  yang menurun (Dent, 1986).
- 17)  $2 \text{FeOOH} \Rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$
- 18)  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 1/2 \text{CH}_2\text{O} + 4 \text{H}^+ \Rightarrow 2 \text{Fe}^{2+} + 1/2 \text{CO}_2 + 5/2 \text{H}_2\text{O}$
- 19)  $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6 + 3 \text{H}_2\text{O} \Rightarrow 3 \text{Fe}(\text{OH})_3 + \text{K}^+ + 2 \text{SO}_4^{2-} + 3 \text{H}^+$

**Gambar 3.19** Proses Transformasi Pirit menjadi Mineral Fe Sekunder

### 3) Kadar Lengas Tanah

Kadar lengas tanah memiliki keterkaitan yang sangat kuat terhadap kondisi redoks dan pH tanah. Seperti dijelaskan sebelumnya bahwa kelarutan Fe sangat ditentukan oleh kondisi redoks tanah, sedangkan kondisi redoks tanah sangat berhubungan dengan fluktuasi kadar lengas tanah. Tanah yang kering bersifat oksidatif sehingga sebagian besar Fe berada dalam bentuk  $\text{Fe}^{3+}$  atau mineral Fe sekunder, seperti jarosit (Gambar 3.20). Sebaliknya, jika tanah dalam kondisi basah atau tergenang,  $\text{Fe}^{3+}$  akan tereduksi menjadi  $\text{Fe}^{2+}$ . Tanah sulfat masam yang berada di lingkungan pasang surut secara lazim akan mengalami fluktuasi kondisi lengas. Menurut Sahrawat (2004a), perubahan dramatis secara kimiawi akibat terjadinya penggenangan tanah adalah reduksi Fe-oksihidrooksida menjadi  $\text{Fe}^{2+}$  (Persamaan 3.23). Sarwani et al. (2006) melaporkan bahwa adanya dinamika perubahan konsentrasi  $\text{Fe}^{2+}$  yang terjadi karena tanah mengalami penggenangan. Patrick dan Reddy (1978) melaporkan bahwa jumlah  $\text{Fe}^{3+}$  yang tereduksi dapat mencapai 10 kali lipat lebih besar dibandingkan unsur lainnya, konsentrasinya dari 0,1 mg/l meningkat menjadi ribuan mg/l setelah beberapa minggu penggenangan (Ponnamperuma, 1973; Rorison,



**Gambar 3.20** Ilustrasi Proses Oksidasi Pirit Saat Tergenang dan Kering

1973; Breemen, 1976). Kondisi ini menyebabkan perubahan warna tanah dari coklat menjadi abu-abu (Sahrawat, 2004a). Penggenangan tanah sulfat masam meningkatkan pH tanah menuju netral. Pada kondisi tersebut, Fe terlarut yang lebih aktif di larutan tanah adalah  $Fe^{2+}$ . Ion tersebut dapat mendesak basa tukar lainnya sehingga menjenuhi permukaan kompleks pertukaran. Di sisi lain,  $Fe^{2+}$  dapat hilang dari larutan tanah melalui beberapa cara, yaitu pengendapan, terjerap pada permukaan klei atau  $Fe^{3+}$  oksida, teroksidasi menjadi  $Fe^{3+}$ , dan terbawa bersama air drainase (Breemen & Buurman, 2002).

Walaupun demikian, pola kelarutan Fe sepanjang tahun lebih dipengaruhi oleh kelengasan tanah secara luas. Hasil penelitian Hanhart dan Ni (1992) menunjukkan bahwa pola kelarutan Fe secara alamiah mengikuti tingkat/perubahan kelengasan tanah (Gambar 3.15). Diketahui bahwa konsentrasi  $Fe^{2+}$  akan meningkat mulai sekitar bulan ke dua memasuki musim penghujan dan mencapai puncaknya pada pertengahan musim hujan. Dinamika konsentrasi ini disebabkan oleh hal-hal berikut, antara lain:

- 1) terjadinya pelindian (*flushing*) secara intensif pada awal musim hujan setelah sebelumnya mengalami oksidasi pada musim kemarau;
- 2) reaksi reduksi  $Fe^{3+}$  adalah reaksi yang lebih lambat daripada oksidasinya dan reaksi reduksi  $Fe^{3+}$  terjadi setelah reduksi  $O_2$ ,  $NO_3$ , dan  $Mn^{4+}$  (Kirk, 2004; Reddy & DeLaune, 2008);
- 3) setelah tereduksi secara penuh dan dalam jumlah yang cukup jenuh, maka Fe cenderung mengendap dan terjerap pada kompleks pertukaran (Kirk, 2004); dan
- 4) penggenangan akan meningkatkan pH tanah; pada pH yang relatif mendekati netral, Fe cenderung mengendap.

Besarnya pengaruh kelengasan tanah terhadap sifat Fe di dalam tanah juga menentukan distribusi, fraksi, serta tingkat kristalinitasnya (Tabel 3.4). Perubahan pH, Eh, maupun kelengasan tanah yang disebabkan kondisi pasang-surutnya air di tanah sulfat masam menyebabkan terbentuknya pola zonasi bentuk/spesies Fe di dalam

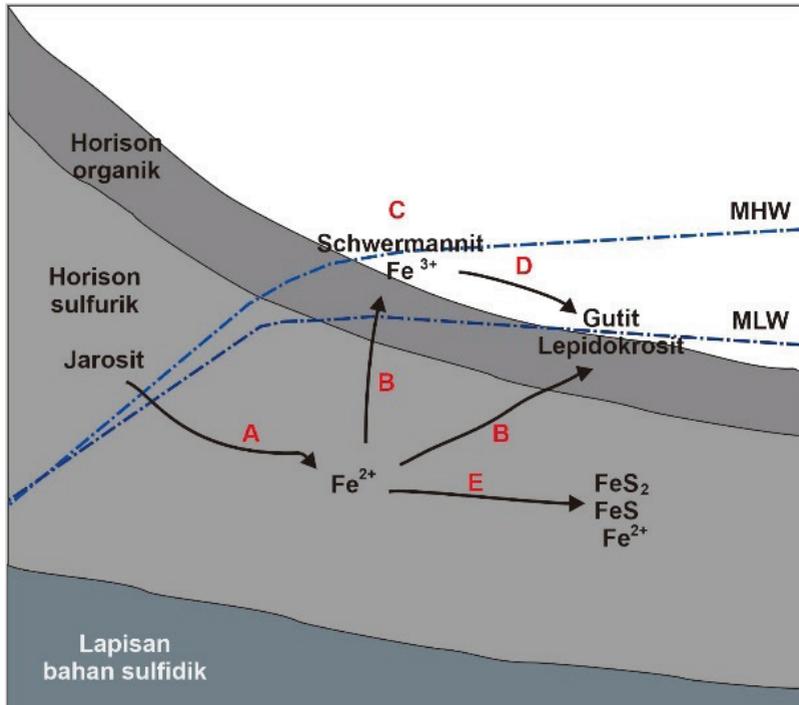
tanah (Gambar 3.21) (Johnston et al., 2011). Sukitprapanon et al. (2016) melaporkan bahwa lebih banyak mineral Fe kristalin pada lapisan tanah atas maupun bawah yang sering teroksidasi.

**Tabel 3.4** Kadar Beberapa Mineral Fe dalam Profil Tanah dan Kondisi Redoks Lapisan Tanah Sulfat Masam Potensial, Tanah Sulfat Masam Aktual, dan Tanah Sulfat Masam Pascaaktif

Tanah	Lapisan	Kedalaman	Pirit	Jarosit	Gutit	Hematit	Gipsum
Sulfat masam potensial	<i>Top soil</i>	0–20	-	-	x	-	-
	Tereduksi	20–50	x	-	-	-	-
		50–82	xx	x	-	-	-
		82– ...	xx	-	-	-	-
Sulfat masam aktual	<i>Top soil</i>	0–20		x	x	-	x
	Sebagian teroksidasi	20–50	-	xx	x	-	xxx
		50–75	-	xx	x	-	xx
		75–170	-	xx	x	-	xx
	Tereduksi	170–200	xx	-	-	-	-
Sulfat masam pasca-aktif	<i>Top soil</i>	0–17	-	-	x	x	x
	Sebagian teroksidasi	17–50	-	-	xx	xxx	xx
		50–90	-	-	xx	xxx	xx
		90–170	-	xx	xx	xx	x
	Tereduksi	170–200	xx	-	-	-	-

Keterangan: XXX= 20%–40%, XX = 5%–20%, X = <5%

Sumber: Sukitprapanon et al. (2016)



Keterangan: (A) Pelarutan jarosit yang menghasilkan  $\text{Fe}^{2+}$ ; (B) pengaruh air pasang menyebabkan  $\text{Fe}^{2+}$  bergerak ke atas; (C) oksidasi  $\text{Fe}^{2+}$  menghasilkan  $\text{Fe}^{3+}$  dan schwermannit; (D) membentuk gutit dan lepidokrosit; dan (E) endapan  $\text{Fe}^{2+}$  termasuk juga membentuk  $\text{FeS}$  dan  $\text{FeS}_2$ .

Sumber: Diolah dari Johnston et al. (2011)

**Gambar 3.21** Konsep Model Zonasi Geokimia Fe di Tanah Sulfat Masam Lahan Pasang Surut.

#### 4) Keberadaan Anion

Transformasi Fe dan jenis mineral yang terbentuk dipengaruhi oleh banyak faktor lingkungan. Beberapa faktor yang menentukan keberadaan mineral Fe sekunder di tanah sulfat masam, antara lain pH, konsentrasi  $\text{SO}_4$ , mikroorganisme, keberadaan kation basa, dan ion klorida ( $\text{Cl}^-$ ). Adanya K atau Na akan menyebabkan pembentukan

mineral jarosit atau natrojarosit jika pirit teroksidasi pada pH yang sangat masam dan kandungan  $\text{SO}_4$  yang sangat tinggi ( $>3000 \mu\text{l/ml}$ ) (Gambar 3.19) (Bigam & Murad dalam Fanning et al., 2002). Keberadaan anion di alam akan menentukan reduksibilitas, stabilitas, dan arah mineralisasi Fe. Reduksi ferihidrit menurun akibat peningkatan P dan mendorong pembentukan mineral *green rust carbonat* dan *vivianit* (Kukkadapu et al., 2004; Borch et al., 2007). Akan tetapi, jika P berada dalam jumlah yang sangat terbatas di larutan tanah, mineral Fe sekunder yang terbentuk adalah mineral *green rust*, magnetit, dan gutit (Borch et al., 2007).

#### 5) Bahan organik

Besi adalah salah satu unsur yang sangat banyak ditemui di tanah sulfat masam, proses reaksi redoks terhadap Fe berkaitan dengan kegiatan oksidasi bahan organik oleh mikroorganisme. Menurut Johnston et al. (2014),  $\text{Fe}^{3+}$  memiliki peran penting dalam dekomposisi bahan organik. Pada kondisi reduktif, mikroorganisme menggunakan  $\text{Fe}^{3+}$  sebagai penerima elektron sehingga konsentrasi  $\text{Fe}^{2+}$  meningkat (Reddy et al., 1980) (Tabel 3.5). Dalam kondisi tersebut, diketahui keberadaan bahan organik sangat menentukan laju proses reduksi  $\text{Fe}^{3+}$  (Luo et al., 2018). Bahan organik dapat berperan dalam meningkatkan ataupun menghambat proses reduksi  $\text{Fe}^{3+}$  melalui proses khelatisasi (Ye et al., 2009), mencegah atau menghambat pembentukan mineral sekunder (Davranche et al., 2013), mengganggu proses kristalisasi (Wilson et al., 2013), serta menentukan bentuk, ukuran dan kerapatan mineral Fe-oksihidrooksida (Pedrot et al., 2011). Di sisi lain, peranan senyawa organik terhadap Fe sangat ditentukan oleh jenis dan tingkat dekomposisi bahan organik. Makin terdekomposisi bahan organik, proses reduksi akan makin menurun karena kapasitas penyediaan elektronnya menurun (De-Yin et al., 2010). Dalam tahap awal proses dekomposisi jerami padi di tanah tergenang, dihasilkan senyawa organik yang dapat berperan sebagai penerima elektron dalam suatu reaksi redoks. Menurut Kyuma (2004), oksidasi asam asetat selalu bersamaan dengan reduksi  $\text{Fe}^{3+}$ . Reddy dan Delaune (2008) serta Kyuma (2004) menunjukkan persamaan reaksi yang menggambarkan

peranan senyawa organik pada reaksi reduksi  $\text{Fe}^{3+}$  yang meningkatkan konsentrasi  $\text{Fe}^{2+}$  dalam tanah, yakni:



**Tabel 3.5** Konsentrasi  $\text{Fe}^{2+}$  dalam Tanah Akibat Pemberian Bahan Organik

Perlakuan Bahan Organik	2 MST	4 MST	6 MST	8 MST
	$\text{Fe}^{2+}$ (mg/kg)			
Tanpa	253	390	1392	740
Ditambahkan	710	1314	4560	3887

Keterangan: MST = minggu setelah tanam

Sumber: Fahmi et al. (2009)

Keberadaan bahan organik di dalam tanah, selain sebagai sumber energi bagi mikroorganisme, juga menentukan bentuk Fe yang dominan di dalam tanah. Bahan organik menyebabkan mineral Fe yang terbentuk bersifat lebih amorf. Sebaliknya, pada lingkungan yang rendah kadar bahan organiknya, akan cenderung terbentuk mineral Fe yang bersifat lebih kristalin (Reddy & Delaune, 2008; Wilson et al., 2013). Hal ini disebabkan bahan organik akan mengganggu proses kristalisasi (Henneberry et al., 2012; Karlsson & Persson, 2012; Wilson et al., 2013). Menurut Karlsson dan Persson (2012), keberadaan bahan organik mendorong pembentukan ferihidrit, yaitu mineral Fe mikrokristalin yang strukturnya tidak berkembang sempurna.

Salah satu sumber muatan negatif tanah adalah bahan organik tanah. Asam humat dan asam fulvat adalah fraksi bahan organik tanah yang sangat reaktif karena merupakan fraksi utama yang banyak menyumbangkan muatan negatif tanah. Menurut Eltantawy dan Bavarez (1978), asam humat dapat memiliki total kemasaman sekitar 500–900 meq/100 g dan asam fulvat memiliki total kemasaman 1400 meq/100 g, sedangkan KPK dari senyawa humat dapat mencapai 150–300 cmol/kg (Bohn et al., 2001). Menurut Catrouillet et al. (2014), bentuk ikatan

antara bahan humat dan Fe dapat berbentuk kompleks monodentate, bidentate, atau tridentate.

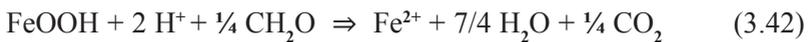
Keberadaan senyawa humat dapat meningkatkan reaktivitas terhadap ion ataupun sebaliknya, dapat menurunkan reaktivitas terhadap ion oleh permukaan mineral (Harter & Naidu, 1995). Hal ini sangat ditentukan oleh kondisi lingkungan, seperti pH, jenis, dan konsentrasi unsur yang akan dijerap, serta jenis mineral Fe (Weng et al., 2008; Fahmi, 2011). Pengaruh keberadaan senyawa humat terhadap reaktivitas mineral Fe meningkat manakala proses yang terjadi berada pada pH yang rendah, di mana Fe cenderung bermuatan positif, sedangkan asam fulvat memiliki muatan negatif. Menurut Grave et al. (2001), jerapan gutit terhadap logam arsenik pada kisaran pH 3,0–8,0 menurun akibat adanya asam humat dan fulvat, di mana penurunannya lebih besar akibat adanya asam fulvat. Menurut Chen et al. (2014), interaksi antara Fe dan bahan organik tanah akan menurunkan reaktivitas Fe, interaksi antara Fe, dan bahan organik yang menyebabkan menurunnya readsorpsi Fe dan laju pelarutan Fe (Davranche et al., 2013). Pembentukan kompleks Fe-asam humat menurunkan kapasitas jerapan Fe terhadap P (Yan et al., 2016).

Jika bahan organik makin terdekomposisi, kandungan senyawa organik dengan berat molekul besar makin tinggi. Asam humat dan asam fulvat adalah senyawa-senyawa yang memiliki berat molekul besar. Makin besar molekul, senyawa organik cenderung mengandung lebih banyak gugus fungsional dengan muatannya yang bersifat variabel. Hal ini menyebabkan senyawa organik tersebut mampu menjerap ataupun melakukan pertukaran ion dengan senyawa lainnya sehingga membentuk kompleks, jembatan ion, atau jembatan logam. Interaksi antara Fe dan senyawa organik membuat Fe menjadi lebih *mobile*. Menurut Tan (2008), diperlukan agen pembawa agar mineral Fe menjadi lebih *mobile*, yaitu melalui pembentukan kompleks Fe-senyawa organik (Wolt, 1994; Krachler et al., 2005). Senyawa organik adalah agen pembawa logam utama di dalam tanah (Weerd, 2000). Adapun menurut Kolka (2001), pergerakan logam di tanah organik sangat ditentukan oleh interaksinya dengan senyawa organik.

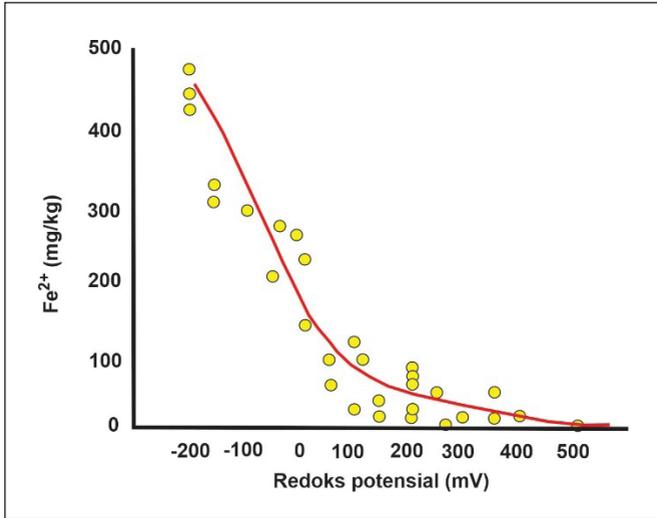
## 6) Reduksi-Oksidasi Fe

Tanah sulfat masam yang sebagian besar terdapat di lahan pasang surut akan mengalami fluktuasi redoks akibat terjadi turun-naiknya muka air tanah. Besi adalah logam yang paling banyak terlibat dalam sebuah reaksi redoks di muka bumi. Besi merupakan unsur utama pada tanah tergenang yang mengalami reduksi (Kyuma, 2004). Menurut Patrick dan Reddy (1978), jumlah  $\text{Fe}^{3+}$  yang tereduksi dapat mencapai 10 kali lipat lebih besar dari unsur lainnya. Feri mulai mengalami reduksi pada kondisi agak reduktif (<180 sampai 150 mV) (Patrick & Jungsujinda, 1992). Penggenangan menyebabkan terjadinya reduksi  $\text{Fe}^{3+}$  dan peningkatan konsentrasi Fe yang bersifat reaktif (Johnston, Keene et al., 2009; Johnston et al., 2010). Sebaliknya, pada kondisi aerob,  $\text{Fe}^{2+}$  cenderung mengalami oksidasi. Kondisi lingkungan yang secara terus-menerus mengalami fluktuasi redoks dapat menyebabkan transformasi mineral Fe.

Siklus pasang surut akan berpotensi menyebabkan terjadinya penggenangan tanah yang kemudian mendorong terjadinya reduksi  $\text{Fe}^{3+}$ . Saat tanah tergenang, jumlah  $\text{O}_2$  sangat terbatas yang ditandai dengan penurunan nilai Eh sehingga menyebabkan peningkatan konsentrasi  $\text{Fe}^{2+}$  di larutan tanah (Gambar 3.22). Reaksi reduksi  $\text{Fe}^{3+}$  terjadi karena mikroorganisme menggunakan  $\text{Fe}^{3+}$  sebagai penerima elektron dalam kegiatan oksidasi bahan organik. Breemen dan Buurman (2002) mengilustrasikan reaksi reduksi  $\text{Fe}^{3+}$  menjadi  $\text{Fe}^{2+}$  dengan bahan organik sebagai donor elektron melalui Persamaan 3.42.



Terjadinya reduksi  $\text{Fe}^{3+}$  merupakan suatu refleksi dari adanya kegiatan mikroorganisme yang melakukan metabolisme untuk bertahan hidup di dalam tanah pada kondisi anaerob. Sebaliknya, pada kondisi tertentu, proses reduksi  $\text{Fe}^{3+}$  dapat pula terjadi tanpa bantuan mikroorganisme secara langsung. Proses reduksi  $\text{Fe}^{3+}$  dapat dikelompokkan menjadi dua, yaitu reduksi biotik dan reduksi abiotik (Reddy & DeLaune, 2008).

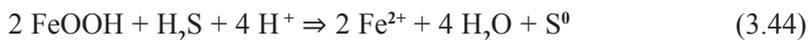
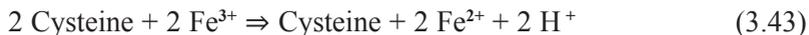


Sumber: Diolah dari Patrick dan Henderson (1981)

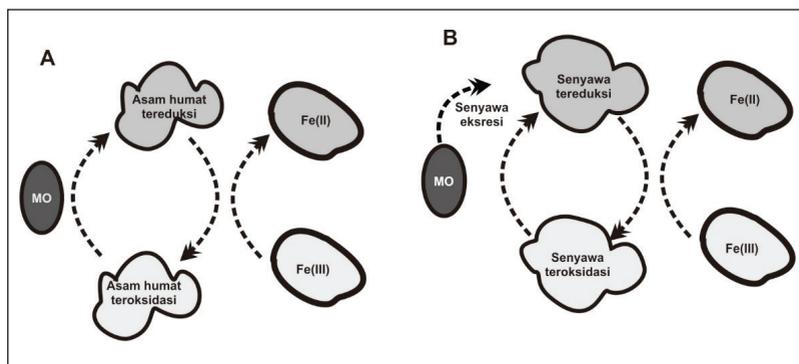
**Gambar 3.22** Pengaruh Redoks Terhadap Konsentrasi Fe<sup>2+</sup>

Mikroorganisme mereduksi Fe<sup>3+</sup> menjadi Fe<sup>2+</sup> secara biotik melibatkan enzim Fe-reduktase. Beberapa hasil reduksi dari mikroorganisme tersebut, antara lain mineral Fe dalam bentuk vivianit, pirit, dan siderit. Adapun spesies Fe<sup>3+</sup> biasanya dalam bentuk amorf dan kristalin yang sukar larut, seperti strengit, gutit, dan hematit. Menurut Ottow dan von Klopotek (1969), kapasitas reduksi beberapa mineral Fe berkurang menurut urutan: FePO<sub>4</sub> > Fe(OH)<sub>3</sub> > FeOOH > Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Mineral-mineral tersebut, jika berada pada pH yang rendah, bersifat larut (Reddy & DeLaune, 2008), tetapi pada pH yang mendekati netral, bersifat sukar larut sehingga mikroorganisme harus melakukan kontak secara fisik dengan mineral tersebut untuk mereduksinya (Lovley, 1987). Batas kritis reduksi Fe<sup>3+</sup> terjadi antara 300 mV sampai 100 mV pada pH 6 dan 7, serta -100 mV pada pH 8, dengan puncak reduksi terjadi pada 300 mV dengan pH 5 (Gotoh & Patrick, 1976). Interaksi (reduksi) ini tentunya sangat tergantung pada spesies mikroorganisme, donor elektron, dan Fe<sup>3+</sup> (Konsten et al., 1994; Reddy & DeLaune, 2008).

Reduksi  $\text{Fe}^{3+}$  dapat dimediasi oleh beberapa produk hasil ekskresi bakteri anarob, seperti sitrat, format, piruvat, dan malat, serta senyawa-senyawa antropogenik aromatik yang dapat mereduksi  $\text{Fe}^{3+}$  pada kondisi pH rendah (Lovley, 1991). Reaksi nonenzimatik ini hanya dapat terjadi pada kondisi masam. Pada tanah sulfat masam yang kaya akan  $\text{SO}_4$ , reduksi abiotik  $\text{Fe}^{3+}$  dapat terjadi dengan adanya sulfida yang dihasilkan dari reduksi  $\text{SO}_4$  (Reddy & DeLaune, 2008).



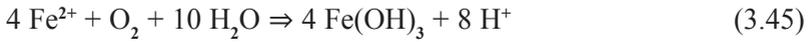
Beberapa hasil penelitian terakhir membuktikan bahwa reduksi abiotik dapat terjadi pada lingkungan yang memiliki kandungan bahan organik telah terdekomposisi lanjut. Bahan humat, seperti asam humat, dapat digunakan sebagai penerima elektron dalam proses oksidasi asam asetat dan laktat (Kappler et al., 2004; Reddy & DeLaune, 2008; Rakshit et al., 2009; Fahmi et al., 2010) (Gambar 3.23). Menurut Poggenburg et al. (2018), peran sebagai *shuttle electron* pada reduksi  $\text{Fe}^{3+}$  dapat terjadi pada konsentrasi senyawa organik  $>2 \text{ mg C/l}$ .



Sumber: Diolah dari Nevin dan Lovley (2002)

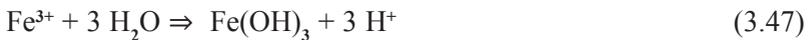
**Gambar 3.23** Ilustrasi peranan senyawa organik sebagai *shuttle electron* dalam reaksi redoks Fe; reduksi  $\text{Fe}^{3+}$  melalui (A) *shuttle electron* asam humat dan (B) reduksi  $\text{Fe}^{3+}$  melalui *shuttle electron* senyawa organik hasil ekskresi mikroorganisme.

Ketika teroksidasi,  $\text{Fe}^{2+}$  dapat berubah mejadi Fe–oksihidrook-sida, reaksi ini sangat sensitif terhadap perubahan pH sehingga peningkatan satu unit pH dapat meningkatkan reaksi menjadi 100 kali lipat (Kirk, 2004).



Pada tanah sulfat masam, oksidasi  $\text{Fe}^{2+}$  dapat terjadi pada kondisi aerob maupun anaerob. Fero stabil pada kondisi di mana  $\text{SO}_4$  masih tereduksi dan akan cepat teroksidasi pada kondisi di mana  $\text{O}_2$  dan  $\text{NO}_3$  masih tereduksi. Sebagaimana reaksi reduksi, oksidasi  $\text{Fe}^{2+}$  juga dapat terjadi secara biotik dan abiotik. Menurut Nordstrom dan Southam (1997), oksidasi  $\text{Fe}^{2+}$  dan pirit dapat terjadi secara biotik dan abiotik. Oksidasi biotik tentunya menyangkut keterlibatan mikroorganismenya secara langsung, sedangkan oksidasi abiotik terjadi melalui senyawa atau asam organik tertentu dalam tanah yang dapat pula dihasilkan oleh mikroorganismenya. Menurut Nordstrom dan Southam (1997), kecepatan reaksi oksidasi  $\text{Fe}^{2+}$  secara biotik ( $5 \times 10^{-7}$  mol/l/S) lebih cepat daripada secara abiotik ( $3 \times 10^{-12}$  mol/l/S). Walaupun demikian, kedua reaksi tersebut memiliki peranan dan saling keterkaitan yang masih belum dapat dijelaskan secara detail (Reddy & DeLaune, 2008).

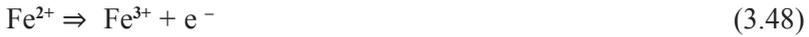
Ketika tanah sulfat masam mengalami drainase, terjadi oksidasi  $\text{Fe}^{2+}$  secara aerob. Dengan adanya  $\text{O}_2$ , maka oksidasi  $\text{Fe}^{2+}$  bersifat spontan (kondisi pH yang mendekati netral). Pada kondisi ini,  $\text{Fe}^{3+}$  bersifat tidak stabil dan berubah menjadi Fe-oksihidrooksida yang mengendap dengan runtutan reaksi sebagai berikut (Kyuma, 2004).



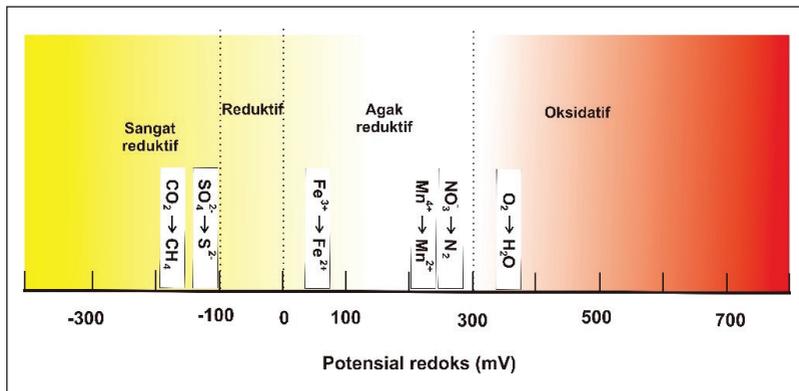
### c. Reduksi-Oksidasi Tanah

Redoks potensial atau Eh adalah sebuah ukuran kuantitatif dari intensitas reaksi redoks, biasanya dinyatakan dalam volt (V) atau mili volt (mV). Reduksi adalah sebuah proses melepaskan  $\text{O}_2$  dan menerima

elektron atau H (hidrogenasi). Sebaliknya, oksidasi adalah suatu proses menerima  $O_2$  dan melepaskan elektron atau H.



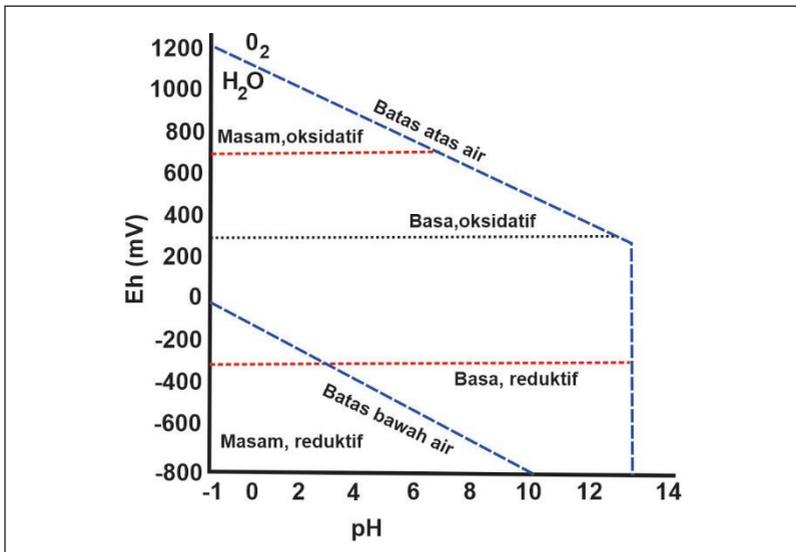
Skala Eh menggambarkan tekanan/gradien elektron dalam sebuah sistem secara kimiawi ataupun biologi. Fiedler et al. (2007) serta Reddy dan DeLaune (2008) membagi kategori kondisi redoks tanah menjadi oksidatif ( $Eh \geq 300$  mV), agak reduktif ( $Eh$  300 sampai 0 mV), reduktif ( $Eh$  0 sampai -100 mV), dan sangat reduktif ( $Eh < -100$  sampai -400 mV) (Gambar 3.24). Menurut Reddy dan DeLaune (2008), nilai Eh di lahan rawa berkisar antara 700 sampai -300 mV. Nilai positif menunjukkan rendahnya aktivitas elektron dan kondisi yang aerob sampai agak anaerob. Kondisi ini sering ditemui pada daerah transisi dari lahan kering ke lahan rawa. Adapun nilai negatif menunjukkan tingginya aktivitas elektron dan kondisi yang anaerob, sering ditemui pada daerah permanen tergenang. Tanah yang oksidatif memiliki Eh berkisar 700 sampai 400 mV, sedangkan tanah-



Sumber: Diolah dari Reddy dan DeLaune (2008)

**Gambar 3.24** Skematis Kategori Kondisi Eh Tanah di Lahan Rawa dan Batasan Nilai Redoks Potensial untuk Reaksi Reduksi Beberapa Unsur Penerima Elektron

tanah tergenang memiliki nilai Eh -250 sampai -300 mV (Patrick & Mahapatra, 1968). Berdasarkan kondisi redoks dan pH tanah, Michael (2018) melaporkan kisaran nilai redoks permukaan tanah sulfat masam dalam empat kelas, yaitu masam-oksidatif, basa-oksidatif, basa-reduktif, dan masam-reduktif (Gambar 3.25). Kondisi redoks memiliki peranan penting terhadap sistem tanah-tanaman di tanah sulfat masam. Ketersediaan unsur hara dan kelarutan unsur meracun sangat dipengaruhi oleh kondisi redoks tanah. Menurut Sahrawat (2015), Eh bersamaan dengan pH adalah parameter kunci dalam suatu perubahan elektrokimia yang menentukan kesuburan tanah.



Sumber: Diolah dari Michael (2018)

**Gambar 3.25** Klas Redoks; Masam-Oksidatif, Basa-Oksidatif, Masam-Reduktif, dan Basa-Reduktif Berdasarkan Kisaran Eh-pH

Tanah sulfat masam biasanya dapat dijumpai pada daerah dataran rendah dengan topografi yang umumnya datar dan terletak pada daerah sekitar pantai atau sungai-sungai besar. Daerah tersebut

biasanya masih mendapat pengaruh dari pasang-surutnya air laut/sungai sehingga dalam suatu periode waktu tertentu tanah sulfat masam dapat mengalami fluktuasi kelengasan tanah. Nilai Eh pada tanah yang tergenang berkisar antara 200 sampai -300 mV. Nilai ini tergantung pada sifat tanah, seperti kualitas bahan organik serta keberadaan dan konsentrasi unsur penerima elektron (Sahrawat, 2015). Satu hal yang paling utama terjadi pada saat tanah digenangi adalah menurunnya ketersediaan  $O_2$ , sedangkan  $O_2$  diperlukan oleh mikroorganisme untuk melakukan aktivitasnya. Menurut Patrick dan Mikkelsen (1971), setelah 6–10 jam penggenangan, jumlah  $O_2$  dapat mendekati 0 (nol). Menurunnya jumlah  $O_2$  tersebut akan diikuti oleh peningkatan gas lainnya, seperti  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $N_2$ , dan  $H_2$  dengan persentase 1–20%  $CO_2$ , 10–95%  $N_2$ , 15–75%  $CH_4$ , dan 0–10%  $H_2$ . Variasi dari nilai-nilai tersebut sangat tergantung, antara lain pada mikroorganisme dan senyawa anorganik.

Berdasarkan tingkat efisiensi energi yang dibutuhkan,  $O_2$  merupakan unsur yang paling efisien sebagai penerima elektron. Ketika konsentrasinya menurun atau sangat rendah, mikroorganisme tertentu memiliki kemampuan menggunakan penerima elektron lainnya menggantikan  $O_2$  untuk mengoksidasi bahan organik. Urutan pergantian unsur sebagai penerima elektron sangat ditentukan oleh afinitas unsur tersebut dan energi yang dihasilkan. Adapun kecepatan pergantian unsur sebagai penerima elektron ditentukan oleh konsentrasinya, senyawa organik, dan mikroorganisme (Reddy & DeLaune, 2008). Secara berurutan, pergantian unsur redoks berpasangan adalah  $O_2/H_2O$ ,  $NO_3^-/N_2$ ,  $Mn(4^+, 3+)/Mn^{2+}$ ,  $Fe^{3+}/Fe^{2+}$ ,  $SO_4/H_2S$ ,  $CO_2/CH_4$ . Lebih jelas, dapat dilihat pada Gambar 3.24.

Oksidasi unsur tereduksi yang bersamaan dengan perombakan bahan organik akan menghasilkan/melepaskan elektron. Hal ini akan menimbulkan tekanan atau intensitas elektron di dalam sistem. Jika terdapat  $O_2$ , tekanan tersebut dapat dengan mudah dihilangkan. Jika tidak ada  $O_2$ , tetapi terdapat  $NO_3^-$ , tekanan elektron menjadi sedikit lebih besar sehingga digunakanlah  $NO_3^-$  untuk menghilangkan (menerima) elektron dari sistem. Jika  $NO_3^-$  telah habis digunakan untuk

mengatasi kondisi tersebut, peningkatan tekanan elektron berkembang untuk menggunakan  $Mn^{4+}$  sebagai penerima elektron. Demikianlah seterusnya untuk unsur-unsur penerima elektron, seperti  $Fe^{3+}$ ,  $SO_4$ , dan  $CO_2$  akan digunakan sebagai penerima elektron seiring dengan meningkatnya tekanan elektron.

Kondisi hidrologis lahan adalah faktor utama yang menentukan sifat biogeokimia tanah sulfat masam sehingga secara umum, kondisi redoks di tanah sulfat masam sangat berfluktuatif dan memiliki pola yang mengikuti kondisi muka air tanah sulfat masam. Hal ini sebagaimana yang dilaporkan oleh Hanhart dan Ni (1993) yang menyatakan bahwa kondisi redoks tanah sulfat masam dapat dibagi menjadi tiga periodik.

- 1) Kondisi oksidatif, terjadi dalam keadaan tanah mulai kering, biasanya terjadi selama musim kemarau.
- 2) Kondisi oksidasi-reduksi (secara bergantian), keadaan ini biasanya terjadi pada saat awal musim hujan.
- 3) Kondisi reduktif, keadaan ini terjadi selama permukaan tanah tergenang.

Ketiga kondisi redoks ini terus-menerus berulang sepanjang tahun selama tidak ada perubahan kondisi lingkungan secara ekstrem (Gambar 3.15).

Walaupun demikian, pada lingkungan yang sangat spesifik, faktor lainnya, seperti bahan organik tanah, kelarutan unsur tereduksi-teroksidasi, dan tekstur tanah dapat pula menentukan besaran perubahan kondisi redoks tanah sulfat masam. Fahmi (2008) melaporkan bahwa pemberian bahan organik jerami padi sisa panen mampu menurunkan nilai Eh tanah sulfat masam. Pengaruh bahan organik terhadap nilai Eh tanah sulfat masam sangat ditentukan oleh kualitas dan kuantitas bahan organik yang terdapat di tanah. De-Campos et al. (2009) menyatakan bahwa perbedaan pola reaksi redoks di tanah salah satunya ditentukan oleh kualitas dan kuantitas bahan organik. Pemberian bahan organik yang masih relatif mentah dan bersifat mudah terdekomposisi cenderung mendorong terjadinya reduksi.

Sebaliknya, jika bahan organik tanah telah mengalami dekomposisi lanjut, bisa saja menyebabkan lapisan tanah relatif oksidatif atau agak oksidatif walaupun dalam kondisi tergenang (Fahmi, 2012).

#### d. Bahan organik

Tanah sulfat masam yang terdapat di lahan pasang surut dapat menjadi anaerob yang menghambat perombakan bahan organik. Hal ini disebabkan oleh menurunnya biomassa mikroorganisme (Unger, Kennedy et al., 2009). Sebaliknya, jika permukaan tanah menjadi kering/aerob, kondisi menjadi oksidatif sehingga mendorong percepatan proses perombakan bahan organik. Sahrawat (2004c) menyatakan bahwa akumulasi bahan organik di lahan rawa terjadi karena rendahnya kadar  $O_2$  dan konsentrasi unsur penerima elektron pada kondisi tergenang. Walaupun demikian, secara umum tanah sulfat masam memiliki kandungan bahan organik yang relatif tinggi karena kondisi tanah yang marginal. Hal ini disebabkan proses dekomposisi menjadi terhambat, tidak hanya dikarenakan oleh kondisi anaerob, tetapi juga disebabkan oleh kemasaman tanah dan rendahnya ketersediaan unsur hara tanah.

Bahan organik memiliki peranan kunci terhadap proses biogeokimia tanah sulfat masam. Bahan organik di tanah sulfat masam dapat berperan sebagai sumber hara dan donor elektron dalam proses redoks serta agen khelatisasi unsur logam. Menurut Sahrawat (1998) serta Sahrawat dan Narteh (2001), bahan organik bersamaan dengan  $Fe^{3+}$  yang dapat tereduksi memiliki peranan yang penting terhadap dinamika kesuburan tanah di lahan rawa. Hasil penelitian Fahmi et al. (2015) menunjukkan bahwa pengembalian jerami sisa panen ke tanah dapat menyumbangkan 15–26 kg N, 21 kg P, dan 30 kg K / ha. Adapun Malik et al. (2012) melaporkan bahwa bahan organik (khususnya bahan yang mengandung P tinggi) dapat menjadi sumber P yang bersifat *slow release*.

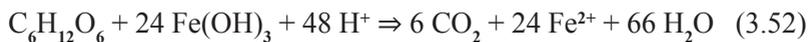
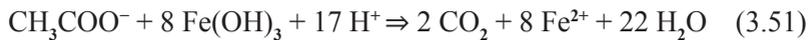
Di sisi lain, aplikasi bahan organik, seperti jerami sisa panen, juga mampu mendorong terjadinya peningkatan kelarutan  $Fe^{2+}$ . Akan tetapi, jika bahan organik telah terdekomposisi lanjut, keberadaan

bahan organik tersebut cenderung menyebabkan proses khelatisasi Fe sebagaimana yang dilaporkan oleh Fahmi et al. (2009) serta Fahmi dan Sarwani (2013). Proses khelatisasi akan mendorong peningkatan ketersediaan P. Bahan organik mampu menekan fiksasi P oleh Fe dengan cara pembentukan kompleks Fe-bahan organik (Sundman et al., 2016). Menurut Davranche et al. (2013), bahan organik memiliki peranan kunci terhadap kelarutan Fe.

Selain kualitas, kuantitas bahan organik juga memiliki peran yang penting di tanah. Rendahnya kandungan bahan organik dapat mendorong oksidasi pirit atau sebaliknya, menekan oksidasi pirit melalui konsumsi  $O_2$  oleh bakteri heterotrop, khelatisasi  $Fe^{3+}$ , dan pirit (Bronswijk et al., 1993; Brown & Jurinak, 1989; Ward et al., 2004; Rigby et al., 2006). Jumlah bahan organik yang tinggi dan bersifat mudah terdekomposisi akan menyebabkan peningkatan kelarutan  $Fe^{2+}$  yang berpotensi meracuni tanaman, tetapi berpotensi pula meningkatkan pH tanah saat terjadi proses reduksi tersebut (Fahmi & Sarwani, 2013; Yuan, Mosley et al., 2016). Xu et al. (2006) menyatakan bahwa aplikasi bahan organik berpotensi meningkatkan pH tanah melalui proses dekarboksilasi anion organik (Yan et al., 1996) dan pelepasan kation basa selama proses dekomposisinya (Noble & Randall, 1999). Dengan kata lain, akan terjadi peningkatan pH tanah jika bahan organik yang diberikan mengandung kation basa yang lebih banyak dari anionnya (Xu et al., 2006). Peran kunci bahan organik terhadap sifat biogeokimia tanah sulfat masam sangat ditentukan oleh kualitas dan kuantitas bahan organik, sifat spesifik tanah sulfat masam, dan kondisi hidrologis lahan (Fahmi & Sarwani, 2013; Yuan, Fitzpatrick et al., 2015; Yuan, Mosley et al., 2016).

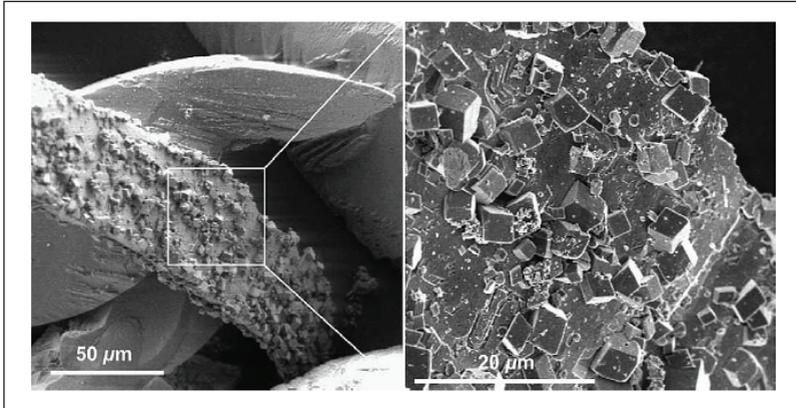
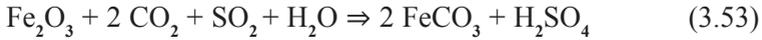
Bahan organik, baik yang telah ada di tanah maupun ditambahkan ke tanah, tentunya akan mengalami proses dekomposisi. Setiap tahapan dari proses dekomposisi akan memberikan pengaruh spesifik terhadap tanah. Beberapa unsur sebagai hasil akhir suatu proses dekomposisi bahan organik, yaitu antara lain  $CO_2$  dan  $CH_4$ . Beberapa faktor eksternal atau lingkungan yang memengaruhi proses dekomposisi, seperti pH tanah, mikroorganisme, suhu, dan ketersediaan unsur

hara maupun unsur lainnya yang terlibat, seperti Fe. Keberadaan Fe pada tanah yang sering mengalami fluktuasi penggenangan berperan penting dalam proses dekomposisi atau mineralisasi. Hall dan Silver (2013) menyatakan bahwa aplikasi mineral Fe meningkatkan mineralisasi C sampai 270%. Proses reduksi  $\text{Fe}^{3+}$  menyumbang sekitar 65% dari oksidasi C di lahan rawa yang anaerob (Roden & Wetzel, 1996). Faktor lingkungan lainnya, baik yang secara langsung maupun tidak langsung berhubungan dengan proses dekomposisi adalah proses redoks. Proses reduksi  $\text{Fe}^{3+}$  secara tidak langsung akan meningkatkan proses dekomposisi (Breemen & Buurman, 2002; Kyuma, 2004) sebagaimana persamaan reaksi berikut:



Proses dekomposisi bahan organik di lahan rawa yang berjalan secara anaerob memerlukan beberapa unsur sebagai penerima elektron. Besi adalah salah satu oksidator yang dominan di lahan rawa, khususnya pada kondisi tergenang. Menurut Kyuma (2004),  $\text{Fe}^{3+}$  merupakan oksidator utama pada tanah tergenang dan jumlahnya dapat mencapai sepuluh kali lipat lebih besar dari unsur lainnya (Patrick & Reddy, 1978). Saat proses dekomposisi, akan dilepaskan elektron yang ditangkap oleh  $\text{Fe}^{3+}$  sehingga  $\text{Fe}^{3+}$  tereduksi menjadi  $\text{Fe}^{2+}$  (Persamaan 3.42, 3.50, 3.51, dan 3.52). Berdasarkan reaksi tersebut, diketahui bahwa pada kondisi yang anaerob, proses dekomposisi bahan organik yang melibatkan Fe akan menghasilkan  $\text{CO}_2$ . Johnston et al. (2014) menyatakan bahwa terdapat hubungan positif antara jumlah  $\text{Fe}^{2+}$  dan jumlah  $\text{CO}_2$  yang terbentuk pada awal proses dekomposisi di tanah yang tergenang. Di sisi lain, keberadaan  $\text{Fe}^{3+}$ -oksida di dalam tanah memiliki peran penting dalam pengurangan emisi  $\text{CO}_2$  ke atmosfer. Menurut Palandri et al. (2005),  $\text{Fe}^{3+}$  dapat menangkap  $\text{CO}_2$  dalam reaksi oksidasi parsial S yang membentuk siderit sebagaimana

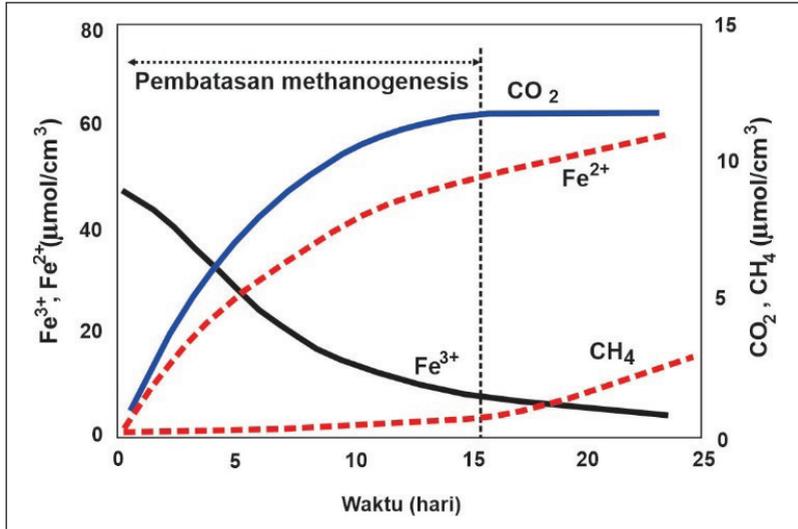
ditunjukkan pada Persamaan 3.53. Adapun Gambar 3.26 menunjukkan mineral siderite yang terbentuk pada permukaan mineral hematit. Besi menstabilkan C tanah di saat terjadi penurunan muka air tanah (Wang et al., 2107).



Sumber: Palandri et al. (2005)

**Gambar 3.26** Mineral Siderit yang Terdapat pada Permukaan Hematit

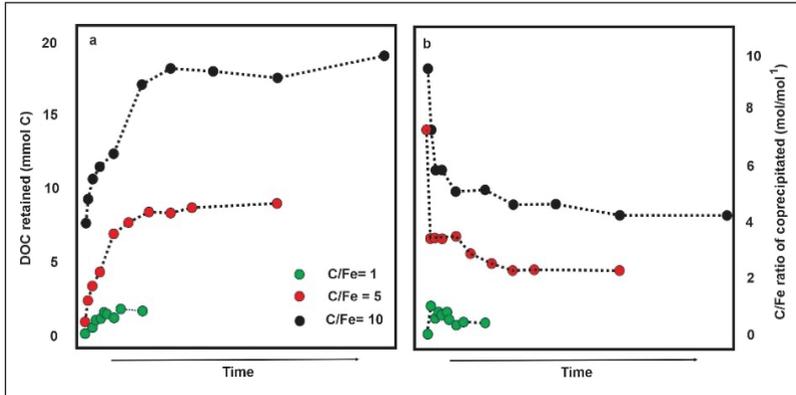
Selain mampu mengikat C yang dihasilkan dari proses dekomposisi dalam bentuk  $\text{CO}_2$ , Fe mampu menurunkan pelepasan C ke udara, khususnya dalam bentuk gas  $\text{CH}_4$ . Menurut Bodegom et al. (2004), reduksi  $\text{Fe}^{3+}$  oleh bakteri methanogen dapat berpotensi mengurangi emisi gas  $\text{CH}_4$  karena bakteri pereduksi  $\text{Fe}^{3+}$  dan bakteri methanogen berkompetisi untuk substrat, seperti asetat. Diketahui bahwa bakteri pereduksi  $\text{Fe}^{3+}$  mampu memanfaatkan substrat tersebut secara lebih efisien dibandingkan methanogen sehingga laju produksi  $\text{CH}_4$  jadi terbatas (Gambar 3.27).



Sumber: Roden & Wetzel (1996)

**Gambar. 3.27** Reduksi Fe<sup>3+</sup>, Produksi CH<sub>4</sub>, Produksi CO<sub>2</sub>, dan Akumulasi Fe<sup>2+</sup> di Lahan Rawa

Beberapa mekanisme pengikatan C seperti yang telah dijelaskan sebelumnya adalah bukti pentingnya peran Fe terhadap pemendaman C dalam tanah. Hal ini utamanya terjadi pada tanah dengan rasio C/Fe yang tinggi, seperti lahan bergambut. Peningkatan rasio C/Fe akan meningkatkan jumlah C yang diikat berdasarkan fungsi waktu, demikian pula sebaliknya (Sodano et al., 2017) (Gambar 3.28). Bentuk pemendaman C oleh Fe tidak hanya dalam bentuk selaput (*occluded*) Fe oleh bahan organik, tetapi juga dalam bentuk pengendapan dari kompleks Fe-DOC (*dissolved organic carbon*). Lindgren et al. (2011) menyatakan bahwa pirit memiliki potensi yang besar untuk menjadi tempat terakumulasinya bahan organik. Proses tersebut utamanya juga terjadi pada lingkungan yang sering mengalami fluktuasi redoks.



Sumber: Diolah dari Sodano et al. (2017)

**Gambar 3.28** Variasi (a) jumlah karbon terlarut (DOC) yang diikat oleh Fe dan (b) rasio C/Fe yang terendapkan sebagai fungsi waktu.

### e. Ketersediaan Nitrogen dan Fosfor

Selain pH tanah yang sangat masam, ketersediaan hara yang rendah adalah penyebab utama rendahnya kesuburan tanah sulfat masam. Attanandana dan Vacharotayan (1986) melaporkan tingkat ketersediaan beberapa unsur hara di tanah sulfat masam sebagaimana ditampilkan pada Tabel 3.6.

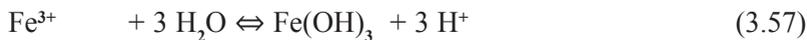
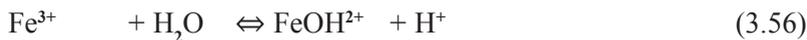
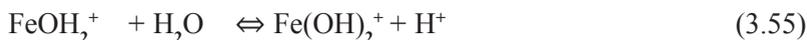
**Tabel 3.6** Beberapa Sifat Kimia Tanah Sulfat Masam

Sifat Tanah	Indonesia	Thailand	Filipina	Malaysia
pH	4,8	3,9	3,4	3,8
Bahan organik (%)	5,8	3,1	0,6	4,37
N (%)	0,2	-	0,05	0,1
P (ppm)	7,5	6,1	4,4	45,4
K (me/100 g)	0,5	0,2	0,1	0,2
Na (me/100 g)	0,1	3,7	0,2	1,4
Ca (me/100 g)	2,9	2,5	1,0	0,8
Mg (me/100 g)	1,5	5,6	0,5	0,4

Sumber: Attanandana & Vacharotayan (1986); Pei (1985); Sarwani et al. (2006); Fahmi et al. (2018)

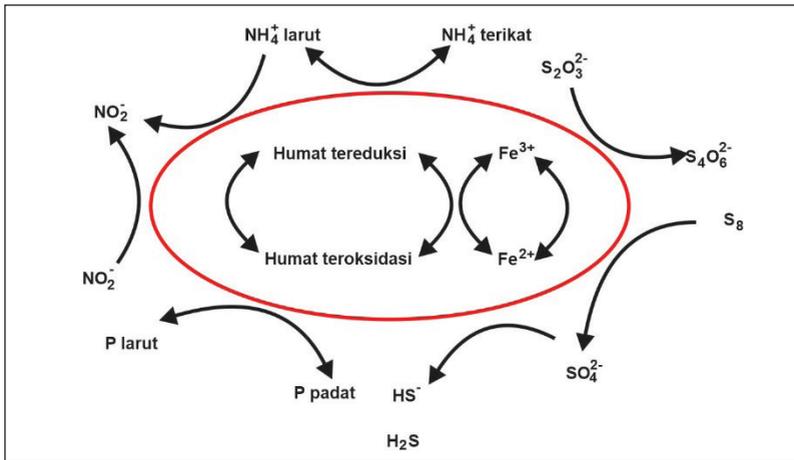
Besi merupakan unsur logam utama yang memiliki peranan penting terhadap sifat biogeokimia tanah rawa, khususnya pada kondisi yang tergenang ataupun yang mengalami fluktuasi redoks. Wei et al. (2019) menyatakan bahwa proses biogeokimia dari unsur-unsur kunci, seperti C, N, P, dan Fe di rhizosfir adalah mekanisme yang saling berkaitan.

Secara umum, diketahui bahwa Fe adalah salah satu unsur logam utama di lapisan kerak bumi. Keberadaan Fe di tanah-tanah masam sering dikaitkan dengan rendahnya kesuburan tanah, khususnya pada proses pemasaman tanah dan pengikatan P. Berdasarkan teori hidrolisis, dinyatakan bahwa kelarutan Fe di larutan tanah yang tinggi menyebabkan peningkatan kemasaman tanah (Lindsay, 1979; Bohn, 2001). Setiap satu mol ion  $\text{Fe}^{3+}$  yang terhidrolisis akan menghasilkan 3 mol ion  $\text{H}^+$ . Walaupun demikian, Bohn (2001) juga menyatakan bahwa Al adalah ion logam utama yang harus diperhitungkan pada proses pemasaman di tanah masam karena memiliki kemampuan menyangga setiap reaksi hidrolisis Fe. Selain proses oksidasi dan reduksi beberapa mineral Fe, seperti dalam penjelasan sebelumnya, menurut Yoshida dan Itoh (dalam Kyuma, 2004), pemasaman tanah rawa utamanya ditentukan oleh derajat kejenuhan  $\text{Fe}^{3+}$  dalam kompleks pertukaran, sebagaimana reaksi berikut.



Berdasarkan beberapa persamaan reaksi yang disebutkan sebelumnya, maka dalam perspektif ini dinyatakan bahwa Fe, khususnya  $\text{Fe}^{3+}$ , memiliki peran “negatif” terhadap kesuburan tanah karena berperan sebagai oksidator pirit pada  $\text{pH} < 3$  (Bonnissel-Gissing et al., 1998) dan sebagai sumber kemasaman dalam reaksi hidrolisis-

nya. Walaupun demikian, Fe juga memiliki peranan penting dalam siklus unsur C, N, P, dan S dalam tanah dan sedimen (Li et al., 2012) (Gambar 3.29) atau pada sistem tanah dan tanaman (Gambar 3.30). Hampir seluruh proses biogeokimia di tanah rawa berhubungan secara langsung atau tidak langsung dengan Fe sehingga Fe berperan penting terhadap tingkat kesuburan tanah dan upaya pelestarian lahan rawa (Sahrawat,1998; Sahrawat & Narteh, 2001).

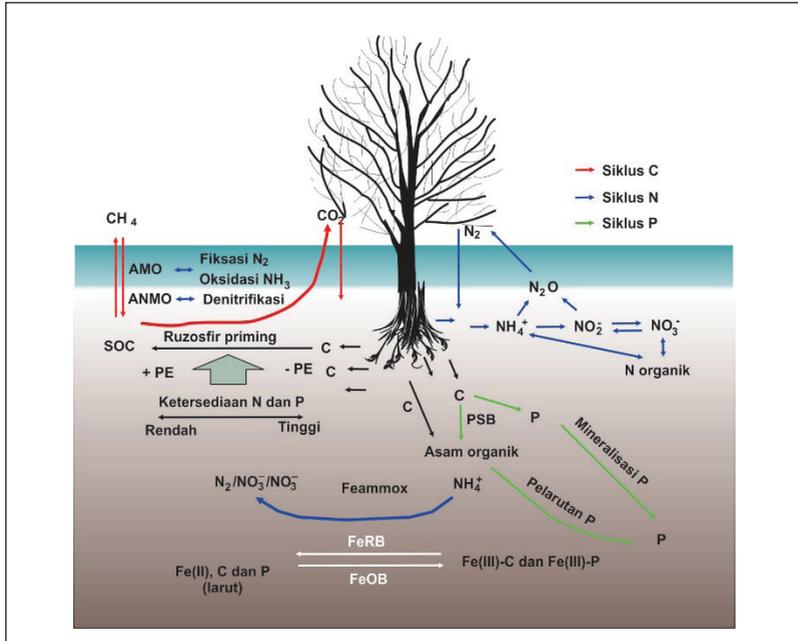


Sumber: Diolah dari Li, Yu et al. (2012)

**Gambar 3.29** Ilustrasi Model Hubungan Antara Tingkat Redoks Fe dan Siklus Unsur Hara C, N, S, dan P di Dalam Tanah

Tanah sulfat masam dikenal juga sebagai tanah yang bersifat marginal karena rendahnya kandungan unsur hara tersedia bagi tanaman, kemasaman tanah yang tinggi, luapan air yang sulit dikendalikan dan adanya potensi keracunan  $Fe^{2+}$  dan Al. Secara umum ketersediaan hara tanah sulfat masam akan meningkat seiring dengan kondisi tanah yang makin basah atau lembap, hal ini berhubungan dengan peningkatan pH tanah yang terjadi akibat proses reduksi yang mendorong pelarutan dan pelepasan hara dari mineral ataupun bahan organik. Peningkatan pH tanah akibat kondisi yang lebih basah/tergenang mendorong terjadinya peningkatan aktivitas mikroorganisme tertentu

Buku ini tidak diperjualbelikan.



Sumber: Diolah dari Wei et al. (2019)

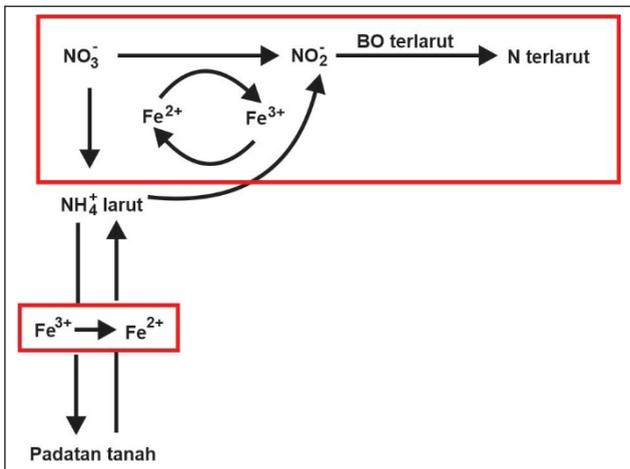
**Gambar 3.30** Ilustrasi Skematis Siklus C, N, P, dan Fe yang Terjadi secara Bersamaan pada Sekitar Daerah Perakaran Tanaman Padi

yang mampu beradaptasi dengan baik di lahan rawa, selanjutnya menyebabkan peningkatan proses mineralisasi ataupun pelarutan unsur hara dari bahan organik maupun mineral.

Walaupun demikian, penggenangan tanah tidak secara otomatis mampu meningkatkan pH tanah. Peningkatan muka air tanah yang terjadi pada awal musim hujan dapat menyebabkan penurunan pH tanah. Hal ini berhubungan erat dengan proses pelarutan dan pencucian secara intensif unsur hasil oksidasi dari musim kemarau sebelumnya. Saat musim kemarau, tanah sulfat masam berada dalam kondisi yang lebih oksidatif. Turunnya hujan menyebabkan pelarutan hasil oksidasi sehingga pada awal musim hujan biasanya nilai pH tanah berada pada titik terendah. Adapun nilai pH tanah tertinggi

terjadi pada beberapa minggu setelah musim hujan dimulai. Pada kondisi ini, tanah sulfat masam berada dalam kondisi yang lebih reduktif. Material hasil reaksi redoks di larutan tanah sebagian telah mengalami pengendapan serta terbawa jauh dari lingkungan tanah sulfat masam.

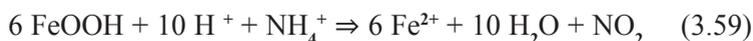
Nitrogen adalah unsur hara esensial utama yang memiliki peran kunci dalam pertumbuhan dan perkembangan tanaman di seluruh agroekosistem. Beberapa hasil penelitian menunjukkan bahwa kandungan N dalam tanah sulfat masam berkisar 0,22%–0,49% dan cenderung menurun makin ke lapisan bawah. Hal ini disebabkan makin rendahnya kadar bahan organik di lapisan bawah (Fahmi & Radjagukguk, 2013). Bentuk N di tanah sulfat masam dipengaruhi oleh kelembapan tanah atau kondisi hidrologis lahan. Dalam kondisi tergenang, N akan mengalami transformasi menjadi amonium ( $\text{NH}_4^+$ ). Bentuk ini sangat *mobile* sehingga mudah tercuci atau difiksasi oleh mineral klei serta mengalami volatilisasi setelah sebelumnya bertransformasi menjadi  $\text{NH}_3$ .



Sumber: Diolah dari Li, Yu et al. (2012)

**Gambar 3.31** Ilustrasi Model Hubungan Antara Redoks Fe dengan Siklus N di Dalam Tanah yang Anaerob

Secara umum, siklus unsur C, N, P, dan S dalam tanah dan sedimen sangat dipengaruhi oleh keberadaan Fe (Li, Yu et al., 2012). Reaksi redoks Fe memiliki peran penting terhadap dinamika kesuburan tanah melalui pelepasan unsur hara ke larutan tanah. Ketersediaan N di tanah sulfat masam sangat berhubungan dengan tingginya kadar Fe dalam tanah (Macdonald et al., 2010) karena dinamika  $\text{NH}_4^+$  di tanah tergenang yang dipengaruhi oleh reaksi redoks Fe (Gambar 3.31). Li, Yu et al. (2012) menyatakan bahwa reaksi redoks Fe, baik secara biotik maupun abiotik, berkaitan dengan siklus N dalam tanah. Yang et al. (2012) dan Clement et al. (2005) menyatakan bahwa oksidasi  $\text{NH}_4^+$  terjadi bersamaan dengan reduksi  $\text{Fe}^{3+}$  di lahan rawa, khususnya Fe-amorf (Persamaan 3.58 dan 3.59). Reduksi  $\text{Fe}^{3+}$  yang bersamaan dengan oksidasi  $\text{NH}_4^+$  menghasilkan  $\text{N}_2$ ,  $\text{NO}_3$  (Luther et al., 1997) dan  $\text{NO}_2$  (Clement et al., 2005). Reddy dan DeLaune (2008) menjelaskan bahwa pelepasan  $\text{NH}_4^+$  dari bahan organik bersamaan dengan reduksi  $\text{Fe}^{3+}$ . Selain itu,  $\text{Fe}^{2+}$  hasil reaksi reduksi dapat menyebabkan pelepasan  $\text{NH}_4^+$  dari permukaan klei melalui proses pertukaran (Sahrawat, 1979). Pentingnya peran bahan organik dan Fe-amorf yang melimpah dalam proses mineralisasi N juga telah dijelaskan oleh Sahrawat (2004b).



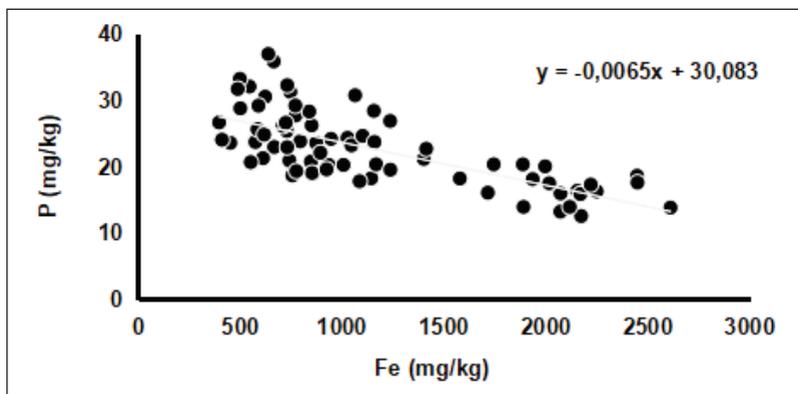
Fosfor di dalam tanah dapat berbentuk organik dan anorganik. Sifat geokimia P di tanah sulfat masam berbeda dengan di tanah masam (lahan kering). Hal ini disebabkan oleh sifat geokimia P sangat berhubungan dengan kondisi hidrologis lahan. Secara detail, bahkan sifat P pada kondisi tergenang berbeda dengan sifat P pada tanah yang mengalami fluktuasi pasang surut. Telah banyak penelitian membuktikan bahwa ketersediaan P di tanah sulfat masam berada dalam status rendah sampai sangat rendah. Konsentrasinya berkisar 12,6 sampai 19,3 ppm dengan kandungan P total bervariasi dari rendah sampai sangat tinggi, rata-rata 45 mg/100 g (Subagyo, 2006). Hal ini dihubungkan dengan kemasaman tanah yang tinggi dan tingginya

kelarutan Fe dan Al yang berpotensi memfiksasi P. Menurut Gu et al. (2019), peran Fe dan pH tanah dalam mengontrol kelarutan P sangat ditentukan oleh kadar Fe-oksihidrooksida dan kadar bahan organik dalam tanah, serta perubahan kondisi hidrologis lahan menjadi tergenang yang meningkatkan kelarutan P.

Menurut Zin et al. (2015), tingginya kandungan Fe menyebabkan distribusi fraksi P di tanah sulfat masam didominasi oleh Fe-P dengan urutan fraksi: Fe-P > Al-P > P larut pereduksi > P terikat lemah > Ca-P. Di antara fraksi tersebut, fraksi Fe-P memiliki pengaruh yang paling besar dalam menyediakan P untuk pertumbuhan tanaman di tanah sulfat masam. Besarnya fraksi Fe-P dibandingkan fraksi lainnya disebabkan proses redoks yang terjadi di tanah sulfat masam. Proses reduksi Fe<sup>3+</sup> menyebabkan pelepasan P yang difiksasinya secara simultan (Morris & Hesterberg, 2010) sehingga reduksi Fe<sup>3+</sup> selalu dapat dikaitkan dengan peningkatan kelarutan P (Prem et al., 2014). Loeb et al. (2008) dan Zak et al. (2010) melaporkan bahwa fraksi Fe-amorf memiliki peran penting terhadap pelarutan P di lahan rawa, khususnya pada tanah yang memiliki kandungan P rendah (Zhang & Huang, 2007).

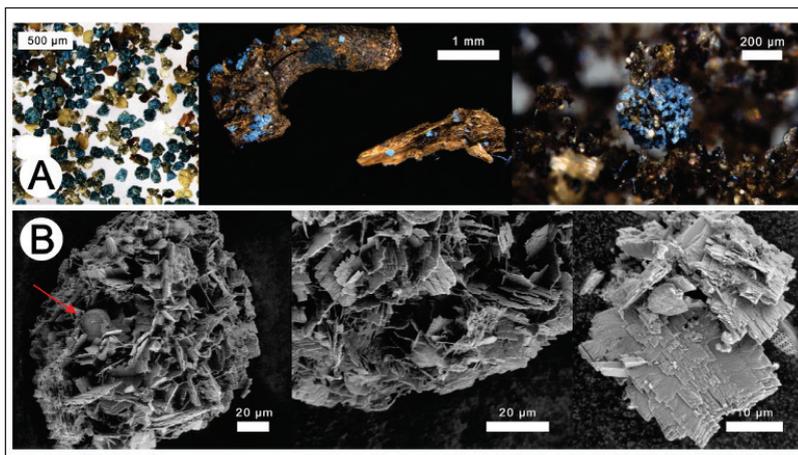
Konsentrasi Fe yang tinggi di tanah sulfat masam, khususnya pada kondisi anaerob (tergenang) menyebabkan seringnya muncul gejala keracunan Fe<sup>2+</sup> pada tanaman. Kondisi ini salah satunya berhubungan pula dengan menurunnya ketersediaan P bagi tanaman. Mayakaduwage et al. (2020) melaporkan penurunan fraksi P labil karena berikatan dengan Fe yang salah satunya diakibatkan oleh perubahan kondisi tanah menjadi lebih basah. Menurut Yin et al. (2018), faktor kunci yang menyebabkan perubahan fraksi P terjadi akibat perubahan bentuk lahan yang berpengaruh pada kondisi hidrologis lahan serta sifat kimia tanah lainnya yang memengaruhi sifat P. Hasil penelitian Fahmi et al. (2018) menunjukkan bahwa peningkatan kelarutan Fe<sup>2+</sup> menurunkan ketersediaan P di tanah sulfat masam (Gambar 3.32). Salah satu bentuk mineral Fe-P yang banyak ditemui di tanah sulfat masam adalah vivianit (Gambar 3.33). Kelarutan mineral tersebut tergantung pada pH tanah, Eh, dan kelarutan Fe. Menurut Rouzies dan Millet (1993), mineral vivianit stabil pada konsentrasi

Fe<sup>3+</sup> yang mencapai 50% dari jumlah Fe total. Adapun Li, Wang et al. (2012) melaporkan bahwa terjadinya peningkatan mineral vivianit ketika rasio antara Fe<sup>2+</sup> dan P lebih besar dari 1,5. Jika rasio Fe:P>15, terjadi penurunan jumlah P yang dilepaskan, tetapi jika Fe:P<10, tidak terjadi penjerapan P terlarut (Jensen et al., 1992).



Sumber: Diolah dari Fahmi et al. (2018)

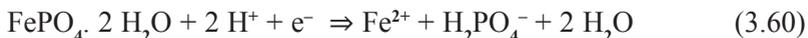
**Gambar 3.32** Hubungan Kelarutan Fe dan Konsentrasi P di Tanah Sulfat Masam



Sumber: Rothe et al. (2016)

**Gambar 3.33** Nodul vivianit yang terlihat dengan (A) mikroskop dan (B) SEM.

Selain itu, hasil penelitian lainnya juga membuktikan bahwa Fe di larutan tanah berperan dalam proses pelepasan P yang terjadi secara perlahan sebagaimana dilaporkan oleh Zin et al. (2015). Hal tersebut dijelaskan dengan proses reaksi reduksi  $\text{Fe}^{3+}$  pada Persamaan 3.60.



Konsentrasi atau kelarutan Fe yang dipengaruhi oleh pH dan redoks tanah sangat menentukan ketersediaan P di tanah sulfat masam (Aggenbach et al., 2013; Cusell et al., 2014; Baken et al., 2015). Beberapa faktor yang menentukan interaksi tersebut adalah konsentrasi, jenis, dan kelarutan mineral Fe, produksi, suplai, dan dekomposisi bahan organik, serta konsentrasi P anorganik (Rothe et al., 2016). Beberapa konsep mekanisme kunci yang menentukan kelarutan P dalam hubungannya dengan Fe di lahan rawa menurut Reddy dan DeLaune (2008) adalah sebagai berikut.

- 1) Ketika  $\text{Fe}^{3+}$ -P tereduksi menjadi  $\text{Fe}^{2+}$ -P, secara simultan P dilepaskan ke larutan tanah.
- 2) Pada pH yang tinggi,  $\text{HPO}_4^{2-}$  (berikatan dengan Fe) dapat digantikan oleh ion OH sehingga terjadi peningkatan ketersediaan P (pertukaran ligan).
- 3) Anion organik ( $\text{COO}^-$ ) dapat mengganti  $\text{HPO}_4^{2-}$  pada tapak jerapan Fe.
- 4) Pengendapan  $\text{Fe}^{2+}$  bersama  $\text{S}^{2-}$  menyebabkan peningkatan P.
- 5) Tanah dengan kandungan Fe oksida tinggi memiliki kapasitas jerapan P yang tinggi.

Ketersediaan P di tanah sulfat masam sangat berhubungan dengan konsentrasi atau kelarutan Fe. Kelarutan P di tanah sulfat masam juga dipengaruhi oleh derajat kristalisasi mineral Fe. Tanah sulfat masam yang berada pada zona yang sering mengalami penggenangan atau sering mengalami periodik kering-basah, seperti lahan pasang surut tipe A dan B, akan cenderung memiliki Fe-amorf yang lebih dominan. Hal ini sejalan dengan yang dinyatakan oleh Kinsman-Costello (2012) bahwa tanah yang mengalami periodik kering-basah memiliki

kadar Fe-amorf yang lebih tinggi. Mineral tersebut memiliki luas area jerapan yang lebih besar untuk mengikat P. Terjadi penurunan fraksi P labil dalam tanah karena diikat oleh Fe-amorf yang dihubungkan dengan terjadinya perubahan kondisi tanah menjadi lebih basah (Mayakaduwage et al., 2020).

Tanah sulfat masam dengan kandungan mineral Fe-kristalin yang tinggi dapat dihubungkan dengan kelarutan P yang lebih tinggi jika dibanding dengan tanah sulfat masam yang didominasi mineral Fe dalam bentuk amorf. Menurut Freese et al. (1992) dan Guzman et al. (1994), perbedaan jenis Fe-(hidr)oksida adalah faktor utama yang menentukan ketersediaan dan mobilitas P. Loeb et al. (2008), Zak et al. (2010), dan Wang, Liu, Tan et al. (2013) melaporkan Fe-amorf, seperti ferihidrit, memiliki peran yang penting terhadap pelarutan P di lahan rawa. Pada tanah yang bersifat redoksimorfik, Fe dapat berperan sebagai sink bagi P (Gasparatos et al., 2019).

Sebaliknya, tanah sulfat masam yang berada pada zona yang lebih kering atau aerob, seperti lahan pasang surut tipe luapan C dan D, akan cenderung memiliki kadar Fe-kristalin yang lebih tinggi. Johnston, Keene et al. (2009) melaporkan bahwa terjadi peningkatan kadar Fe-amorf pada permukaan tanah setelah digenangi. Hal-hal tersebut akan menyebabkan kelarutan P pada tanah sulfat masam potensial dari tipe luapan B lebih rendah daripada tanah sulfat masam potensial dari tipe luapan C sebagaimana yang dilaporkan Fahmi et al. (2018) serta Hairani dan Susilawati (2013). Walaupun demikian, diketahui bahwa penggenangan atau pembasahan kembali tanah dengan kadar Fe-amorf yang tinggi telah menyebabkan pelepasan P yang lebih besar dibandingkan tanah dengan kadar Fe-kristalin yang tinggi. Hal ini berhubungan dengan lebih mudahnya Fe-amorf mengalami reduksi dibandingkan Fe-kristalin (Reddy & Delaune, 2008).

Interaksi antara Fe dan P di tanah sulfat masam juga dipengaruhi oleh keberadaan bahan organik. Adanya bahan organik di larutan tanah dapat menurunkan atau meningkatkan kelarutan P dalam hubungannya dengan Fe di larutan tanah. Jerapan P oleh

Fe mengalami penurunan karena adanya pembentukan kompleks antara bahan organik dan Fe (Yan et al., 2016). Di sisi lain, diketahui juga bahwa aplikasi bahan organik, seperti jerami padi, berpotensi menyebabkan peningkatan konsentrasi atau fraksi mineral Fe-amorf yang memiliki kapasitas fiksasi besar terhadap P. Menurut Loeb et al. (2008) dan Zak et al. (2010), P yang difiksasi oleh Fe-amorf bersifat lebih mudah larut karena mineral Fe-amorf lebih sensitif terhadap fluktuasi redoks. Selain itu, berdasarkan kualitasnya, bahan organik dapat menjadi agen yang mendorong reaksi reduksi di dalam tanah. Hal tersebut tentunya akan mendorong terjadinya pelepasan P dari fiksasi Fe sebagaimana yang digambarkan dalam Persamaan 3.60.

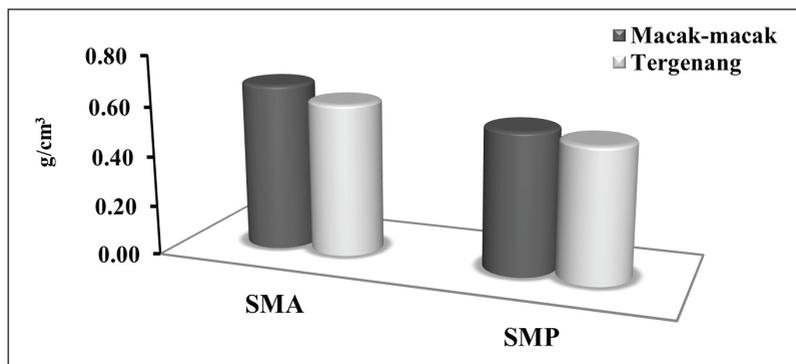
## 2. Sifat Fisika Tanah Sulfat Masam

Secara alamiah, tanah sulfat masam terbentuk antara lain pada daerah-daerah hilir sungai yang secara tidak langsung juga mendapat pengaruh dari air laut dengan ukuran partikel tanahnya terutama didominasi oleh fraksi klei dan diikuti oleh fraksi debu (Khan et al., 1993), khususnya pada tanah sulfat masam dengan perkembangan yang lebih lanjut (Tabel 3.7). Kandungan atau persentase fraksi klei yang tinggi akan menyebabkan tanah menjadi berat. Kondisi ini menyebabkan tanah sulfat masam memiliki permeabilitas yang rendah dan drainase yang buruk. Selanjutnya, pada tanah sulfat masam dengan porositas tanah rendah, tentu akan memiliki kerapatan massa yang tinggi. Artinya, makin tinggi kandungan kleinya, kerapatan massa akan makin meningkat. Beberapa sifat tanah tersebut saling berhubungan dan memengaruhi. Sifat fisika tanah lainnya, seperti porositas, permeabilitas, kemantapan agregat, kerapatan massa, dan berat jenis butiran tanah, sangat dipengaruhi oleh tekstur tanah (Gambar 3.34 dan 3.35) (Fahmi, Susilawati et al., 2014).

**Tabel 3.7** Perbandingan Sifat Fisika Tanah dan Kadar C Organik Antara Tanah Sulfat Masam Aktual dan Tanah Sulfat Masam Potensial

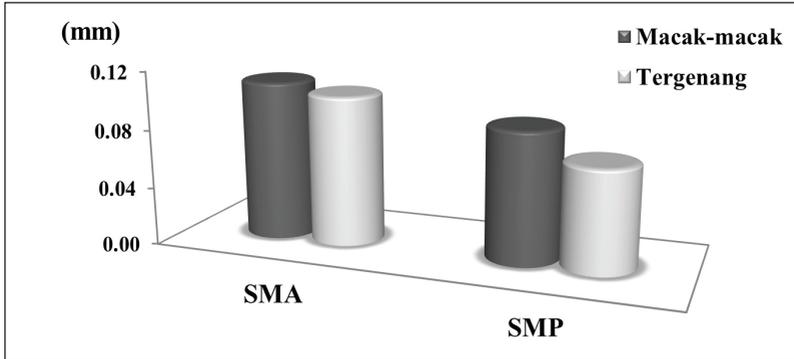
Sifat Tanah	Sulfat Masam Potensial	Sulfat Masam Aktual
C organik (%)	9,75	7,30
Tekstur		
Klei (%)	36	56
Debu (%)	61	43
Pasir (%)	3	1
Berat volume (g/cm <sup>3</sup> )	0,55	0,64
Berat jenis (g/cm <sup>3</sup> )	2,14	2,25
Permeabilitas (cm/det)	2,13	2,03
Porositas (%)	74,33	71,50
Kemantapan agregat (%)	0,08	0,11

Sumber: Fahmi, Susilawati et al. (2014)



Sumber: Fahmi et al. (2014)

**Gambar 3.34** Nilai Kerapatan Massa Tanah Sulfat Masam Aktual (SMA) dan Tanah Sulfat Masam Potensial (SMP) pada Kondisi Tergenang dan Macak-Macak



Sumber: Fahmi, Susilawati et al. (2014)

**Gambar 3.35** Nilai Kemantapan Agregat Tanah Sulfat Masam Aktual (SMA) dan Tanah Sulfat Masam Potensial (SMP) pada Kondisi Tergenang dan Macak-Macak.

Tanah sulfat masam yang berada di lahan pasang surut berpotensi mengalami penggenangan saat terjadi pasang. Hal ini dapat memengaruhi perubahan atau mengubah sifat fisiknya. Tanah sulfat masam yang mengalami penggenangan akan memiliki kemantapan agregat yang lebih rendah dan penurunan nilai kerapatan massa tanah atau berat volume tanah. Hal ini disebabkan mengembangnya mineral klei karena meningkatnya kandungan air dalam struktur mineral klei (Fahmi, Susilawati et al., 2014) dan peningkatan persentase air dibandingkan fraksi padatan tanah berdasarkan volumenya (Sudjianto et al., 2011). Menurut Heuscher et al. (2005), persentase klei dan kadar lengas memiliki pengaruh yang nyata terhadap sifat kerapatan massa tanah.

Sifat berat jenis butiran tanah berhubungan erat dengan kandungan klei tanah. Di sisi lain, fraksi klei memiliki kemampuan memegang air yang tinggi dibandingkan fraksi pasir dan debu. Hal ini menyebabkan menurunnya nilai kemantapan agregat tanah jika tanah sulfat masam mengalami penggenangan. Selain itu, menurunnya nilai kemantapan agregat akibat penggenangan berhubungan pula dengan permeabilitas yang meningkat akibat kondisi tanah yang makin poros serta terjadinya pelarutan agen-agen perekat struktur tanah, seperti mineral oksida dan Ca (Fahmi, Susilawati et al., 2014).

### 3. Sifat Biologi Tanah Sulfat Masam

Tanah sulfat masam umumnya ditemui di lahan rawa dan idealnya selalu dalam kondisi reduktif, khususnya untuk lapisan tanah yang mengandung pirit. Hal ini berhubungan dengan proses terbentuknya pirit dan pencegahan oksidasi pirit yang berlebihan. Perubahan kondisi redoks tanah yang disebabkan fluktuasi muka air tanah akan mendorong perubahan keseimbangan biogeokimia tanah. Mikroorganisme di tanah sulfat masam memiliki peran yang sangat vital terhadap sifat tanah sulfat masam. Keterlibatan mikroorganisme di tanah sulfat masam ini bahkan sudah diawali pada proses pembentukan tanah sulfat masam, mulai dari proses reduksi  $\text{SO}_4$  sampai dengan proses transformasi mineral Fe sekunder menjadi mineral lainnya.

Proses pembentukan tanah sulfat masam diawali dari proses pembentukan pirit yang terbentuk dari serangkaian reaksi antara hasil reduksi  $\text{SO}_4$  oleh mikroorganisme dan Fe. Mikroorganisme yang terlibat dalam oksidasi mineral sulfida, antara lain bakteri pengoksidasi S dan Fe. Menurut Fanning et al. (2017), proses pembentukan pirit menjadi lebih cepat oleh adanya mikroorganisme yang bersifat heterotrop dan kemoautotrof, seperti *Desulfovibrio desulfuricans* dan *Thiobacillus ferrooxidans*.

Secara biologis, karakteristik tanah sulfat masam tidak banyak berbeda dengan tanah-tanah di lahan rawa pada umumnya. Beberapa mikroorganisme yang umumnya ditemui di lahan rawa juga dapat ditemui di tanah sulfat masam. Beberapa jenis mikroorganisme berperan aktif di lahan rawa yang juga banyak ditemui di tanah sulfat masam, antara lain perombak bahan organik, pereduksi, dan pengoksidasi unsur, seperti  $\text{O}_2$ , N, Fe, dan  $\text{SO}_4$ . Salah satu bakteri yang paling banyak dikenal adalah *thiobacillus ferrooxidans*. Bakteri ini terlibat dalam oksidasi pirit maupun  $\text{Fe}^{2+}$ . Menurut Nordstrom (1982), keberadaan bakteri ini menjadikan reaksi oksidasi pirit oleh  $\text{Fe}^{3+}$  menjadi suatu “proses abadi yang cepat”. *Thiobacillus ferrooxidans* hidup optimum pada pH 2,0–3,5, tetapi dapat juga hidup pada maksimal pH 4,0. Peningkatan oksidasi pirit makin signifikan jika kondisi lingkungan mendekati pH optimum kebutuhan hidup bakteri tersebut (Bloomfield, 1973).

Selain bakteri pengoksidasi Fe, seperti *thiobacillus*, beberapa bakteri yang banyak diteliti dan ditemukan di tanah sulfat masam, antara lain bakteri pelarut P yang ditemukan pada tanah sulfat masam Kalimantan Selatan, seperti *burkholderia*, *streptacidiophilus*, *streptomyce*, *curtobacterium*, *ralstonia pickettii*, dan *Nitrosospira* (Purnomo et al., 2005); bakteri yang ditemukan di sekitar perakaran padi yang mampu memfiksasi N, seperti *sphingomonas* yang mampu hidup pada pH 2,5–3,5 (Hashidoko et al., 2006); serta bakteri pereduksi  $SO_4$ , seperti *Desulfovibrio* (Michael, 2018).

Tanah sulfat masam yang banyak terdapat di lingkungan lahan pasang surut secara periodik dapat mengalami penggenangan pada seluruh atau sebagian lapisan tanahnya. Secara umum, pada tanah yang tergenang terjadi penurunan biomassa mikroorganisme. Tanah yang tergenang menyebabkan mikroorganisme anaerob menjadi aktif. Adapun mikroorganisme aerob hanya aktif pada zona yang terbatas, di mana  $O_2$  masih tersedia. Secara teoritis, zona ini dinyatakan berada sekitar 10 mm dari permukaan air (Reddy & DeLaune, 2008). Perubahan ini terjadi utamanya disebabkan oleh keterbatasan  $O_2$  yang jumlahnya menurun drastis hanya dalam beberapa jam setelah terjadi penggenangan. Mikroorganisme aerob menggunakan  $O_2$  sebagai penerima elektron dalam aktivitas metabolismenya. Absennya  $O_2$  mengakibatkan proses respirasi aerobik menjadi terbatas dan aktivitas katabolik mikroba beralih ke respirasi anaerob. Selama proses ini, bakteri aerob mendapatkan energi dari oksidasi beberapa senyawa organik dan anorganik melalui pelepasan elektron. Elektron yang dilepaskan dari senyawa organik tereduksi melalui transfer rantai elektron yang mengandung beberapa pembawa elektron.

Oksigen adalah penerima elektron yang paling efisien bagi mikroorganisme. Ketika jumlah  $O_2$  menjadi sangat terbatas saat tanah tergenang, mikroorganisme tertentu mampu menggunakan oksidan lain. Beberapa bakteri aerob mampu beradaptasi menjadi fakultatif layaknya bakteri anaerob (Reddy & DeLaune, 2008). Selama proses tersebut berlangsung, bakteri menggunakan oksidan lain untuk respirasinya yang bersumber dari senyawa organik maupun

anorganik. Urutan unsur penerima elektron yang digunakan oleh mikroorganisme sangat tergantung pada afinitas elektron unsur tersebut, energi yang dihasilkan, dan enzim terkait. Laju konsumsi elektron sangat tergantung pada konsentrasi, bahan organik yang dapat dirombak, dan populasi mikroorganisme.

Salah satu penentu utama reaksi biogeokimia di dalam tanah adalah respirasi mikroorganisme yang melibatkan oksidasi bahan organik. Oksidasi senyawa tereduksi (seperti senyawa organik) menghasilkan elektron yang meningkatkan intensitas dan tekanan elektron dalam sistem. Jika di dalam sistem banyak terdapat  $O_2$ , elektron dengan mudah akan dihilangkan atau diturunkan. Akan tetapi, jika tidak ada  $O_2$  dan terdapat  $NO_3^-$ , tekanan elektron sedikit lebih tinggi dikembangkan. Ini memungkinkan bakteri fakultatif dan obligat menggunakan  $NO_3^-$  untuk menghilangkan elektron dari sistem atau penerima elektron. Jika  $NO_3^-$  telah dikonsumsi habis, lebih banyak tekanan elektron (intensitas reduksi) harus dikembangkan untuk memungkinkan reduksi  $Mn^{4+}$  agar menghilangkan elektron selama reduksinya, demikian seterusnya.  $Fe^{3+}$ ,  $SO_4^{2-}$ , dan  $CO_2$  digunakan sebagai oksidan serta diperlukan intensitas reduksi yang makin besar untuk dikembangkan ketika terjadi peningkatan tekanan elektron (Gambar 3.24). Intensitas reduksi tersebut dapat direkam dalam bentuk nilai Eh tanah dengan satuan mV.

Setiap mikroorganisme yang ditemui memiliki keterlibatan secara aktif dalam siklus beberapa unsur di lahan rawa. Mikroorganisme tanah memberikan pengaruh yang signifikan terhadap mineralisasi, pelarutan, pelepasan, dan fiksasi unsur hara. Beragam sifat maupun spesies dari bakteri yang terlibat dalam setiap proses, terutama Siklus N, seperti nitrifikasi, denitrifikasi, mineralisasi, dan fiksasi. Setiap proses tersebut juga mensyaratkan atau memerlukan kondisi lingkungan tertentu agar dapat berjalan dengan optimum. Lebih lanjut, Arth dan Frenzel (2000) menyatakan bahwa proses nitrifikasi terjadi pada sekitar 2 cm dari permukaan akar, sedangkan denitrifikasi terjadi pada 1,5–5,0 cm dari permukaan akar.



## Bab 4

# Tanah Gambut

Selain tanah sulfat masam, di lahan rawa dikenal pula tanah gambut yang banyak digunakan masyarakat sebagai lahan pertanian. Pemanfaatan lahan gambut, baik untuk kepentingan pertanian maupun kepentingan lainnya, dalam beberapa dekade terakhir ini menjadi sangat sensitif seiring dengan masifnya pembukaan lahan dan adanya isu tentang gas rumah kaca yang mendorong terjadinya perubahan iklim global. Tanah gambut adalah sumber daya alam yang tidak dapat diperbarui karena diperlukan waktu ribuan tahun untuk dapat membentuk tanah gambut dengan ketebalan dan kondisi tertentu. Diperlukan pemahaman yang mendalam dan pengetahuan yang luas serta sikap yang bijak untuk mengelola dan memanfaatkan sumber daya tersebut. Banyak pengalaman yang telah membuktikan bahwa kesalahan dalam eksplorasi dan pemanfaatan lahan gambut telah merusak lingkungan yang tidak hanya terjadi pada lingkungan sekitar, tetapi juga pada lingkungan yang lebih luas.

Istilah tanah gambut sejak lama dikenal dengan beragam sebutan atau kata dalam bahasa Indonesia. Menurut Noor (2001), sebutan

gambut masuk dalam kosakata bahasa Indonesia sekitar tahun 1970-an dan menjadi lebih populer sekitar tahun 1980-an, seiring dengan makin luasnya pemanfaatan dan dibukanya lahan gambut untuk pertanian dan pemukiman transmigran. Sebelumnya, tanah gambut disebut tanah humus dan di beberapa daerah disebut dengan istilah beragam, antara lain *sepuk* (Kalimantan Barat), *ambul* (Hulu Sungai, Kalimantan Selatan), *payo* (Jambi dan Sumatra Barat), *rawang* (Sumatra Selatan), dan tanah hitam (Jawa). Adapun istilah gambut di beberapa negara dikenal sebagai *fen* (Amerika Utara), *musked* (Kanada), *bog* (Irlandia, Rusia, dan Amerika), *mire* (Finlandia), dan *moor* (Jerman) (Sabiham, 2006). Tanah gambut makin banyak dikenal di Indonesia sehubungan dengan adanya Proyek PLG (Pembukaan Lahan Gambut) sejuta ha di Kalimantan Tengah tahun 1995/1996, tetapi kemudian pada tahun 1999 dihentikan karena kecaman dan kritik, baik dari dalam negeri maupun luar negeri, akibat dampak negatif yang ditimbulkannya.

Menurut Andriese (1988), secara tradisional, gambut didefinisikan sebagai jaringan tumbuhan yang terkarbonisasi sebagian melalui proses dekomposisi dalam kondisi basah. Definisi yang terbatas ini hanya meliputi bahan-bahan yang sepenuhnya berasal dari vegetasi (100%). Hal ini menjadi kontras dengan beberapa sistem klasifikasi tanah yang telah ada, di mana tanah gambut didefinisikan sebagai tanah yang memiliki bahan organik >65%. Oleh karena itu, untuk tujuan praktis, definisi tanah gambut yang digunakan dalam buku ini mencakup bahan yang jauh lebih luas daripada gambut sebagai material atau tanah gambut secara terbatas.

Berikut beberapa alasan mengapa dalam buku ini kami menggunakan definisi yang lebih luas daripada definisi tradisional yang telah diuraikan sebelumnya. Pertama, selain bertentangan dengan sistem klasifikasi tanah yang sudah ada, penggunaan istilah tanah gambut dengan pengertian yang terbatas akan bertentangan dengan tujuan penulisan buku ini, yaitu untuk menunjukkan cara-cara atau teknologi yang efektif untuk pengelolaan dan pengembangan lahan rawa. Untuk tujuan praktis, Andriese (1988) menyatakan bahwa

istilah 'gambut', 'tanah gambut', dan 'tanah organik' adalah sinonim yang merujuk pada definisi *histosols* dalam sistem taksonomi tanah Amerika Serikat berdasarkan Soil Survey Staff tahun 1975. Pada tahun 1930, kongres internasional kedua tentang ilmu tanah mendefinisikan gambut sebagai tanah organik dengan ketebalan  $\geq 50$  cm, luasnya 1 ha, dan mengandung  $<35\%$  abu (Tie, 1982).



Foto: (a) Arifin Fahmi (2018); (b) Arifin Fahmi (2022)

**Gambar 4.1** Tanah Gambut yang Digunakan untuk Tanaman Palawija dan Tanaman Perkebunan

Tanah gambut/tanah organik/*organosols/histosols* adalah tanah yang komposisi penyusunnya didominasi oleh bahan organik (Gambar 4.1). International Peat Society (IPS) dan International Mire Conservation Group (IMCG) menggunakan istilah '*peatland*' atau 'lahan gambut' sebagai lahan yang permukaannya terdapat akumulasi lapisan gambut (FAO, 2014). Secara ringkas, Soil Survey Staff (2014) mendefinisikan tanah gambut sebagai tanah-tanah yang utamanya tersusun atas bahan organik. Akan tetapi, untuk dapat dikategorikan sebagai tanah gambut, definisi tersebut juga harus memperhatikan kandungan klei dalam tanah tersebut. Istilah '*histosols*' sebenarnya berasal dari kata '*histos*' (Yunani) yang artinya jaringan (*tissue*) dan kata '*solum*' (Latin) yang berarti tanah sehingga secara keseluruhan berarti tanah dari jaringan tanaman (*tissue soil*) (Lindbo & Kozlowski, 2006).

Selain terminologi tersebut, beberapa istilah yang sering digunakan dalam klasifikasi tanah gambut adalah *muck*, *moor*, *peat*, *mire*, *fen*, dan *bogs* (Allison, 1973; Parish et al., 2008; Clarkson & Peters, 2010). Adapun masing-masing arti dari beberapa istilah tersebut adalah sebagai berikut.

- 1) *Bogs/raised bog*, lahan rawa yang ditutupi gambut yang tidak memiliki aliran air masuk (*inflow*) maupun keluar (*outflow*) secara nyata karena sumber airnya hanya dari hujan; kandungan hara dan pH tanahnya rendah; serta tinggi muka airnya secara tipikal berada di bawah permukaan tanah.
- 2) *Fen*, lahan rawa yang ditutupi gambut, lebih dangkal dan lebih terdekomposisi daripada *bog*; sumber airnya berasal dari hujan dan limpasan air drainase dari tanah mineral di sekitarnya sehingga agak subur dan agak masam; serta tinggi muka airnya secara tipikal berada di bawah permukaan tanah.
- 3) *Mire*, istilah umum untuk lahan rawa yang tertutup oleh gambut.
- 4) *Moor*, sama dengan lahan gambut, meliputi *high moor*, yaitu *bog* yang berbentuk seperti kubah, dan *low moor*, yaitu lahan gambut berbentuk cekungan atau bagian depresi yang permukaannya tidak melebihi tepinya.

- 5) *Muck* adalah tanah gambut yang telah dikeringkan dan dibudidayakan, di mana lapisan permukaannya telah mengalami oksidasi dan disintegrasi yang cukup besar. Tanah ini cenderung berbutir halus, lebih koloid, dan lebih terdekomposisi serta bersifat lebih seperti tanah anorganik karena ukuran partikel dan persentase mineral yang lebih tinggi, terutama klei.

## A. Pencirian dan Pembentukan Tanah Gambut

### 1. Pencirian Tanah Gambut

Tanah organik diklasifikasikan menurut kandungan C atau kadar abunya sehingga suatu bahan tanah dapat diklasifikasikan sebagai gambut jika memiliki kadar abu 0%–55% (Wust et al., 2003). Definisi ini tentu tidak dapat berdiri sendiri karena sebagian besar sistem klasifikasi menyertakan ketebalan minimum dan kadar klei sebagai syarat untuk dapat dinyatakan sebagai tanah gambut. Definisi umum histosol membutuhkan kualifikasi yang memadai untuk istilah bahan organik dan anorganik, yaitu bahan yang jika jenuh dalam waktu lama atau dikeringkan secara artifisial, memiliki kadar C-organik  $\geq 18\%$  jika fraksi mineralnya mengandung  $>60\%$  klei. Jika fraksi mineralnya tidak mengandung klei, kandungan minimum C-organiknya adalah 12%. Dengan kandungan klei antara 0%–60%, tanah seharusnya memiliki kandungan C-organik yang proporsional antara 12%–18% (misalnya, klei 30% terkait dengan 15% C-organik). Akan tetapi, jika tidak pernah jenuh air selama lebih dari beberapa hari, kandungan C-organik harus  $>20\%$  (Andriesse, 1988). Wust et al. (2003) mencoba memisahkan empat grup utama berdasarkan gambut dan kadar abunya (*lost on ignition* [LOI]), yaitu dinyatakan sebagai gambut jika 0%–55% (45%–100% LOI), *muck* 55%–65% (35%–45% LOI), tanah yang kaya bahan organik 65%–80% (20%–35% LOI), dan tanah/sedimen mineral 80%–100% (0%–20% LOI).

Beberapa lembaga pemerintahan ataupun profesional, seperti Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian mendefinisikan 'lahan gambut' sebagai lahan dengan tanah jenuh air, terbentuk dari endapan

yang berasal dari akumulasi sisa-sisa tumbuhan yang sebagian belum melapuk sempurna dengan ketebalan >50 cm, dan kandungan karbon organik (C-organik)  $\geq 12\%$  (berdasarkan berat kering). Badan Standardisasi Nasional (BSN) dengan SNI No.7925:2013 mendefinisikan lahan gambut sebagai lahan dengan tanah jenuh air yang terbentuk dari endapan, merupakan penumpukan sisa-sisa jaringan tumbuhan masa lampau yang melapuk dengan ketebalan >50 cm. Adapun berdasarkan Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 71 Tahun 2014 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Ekosistem Gambut, gambut didefinisikan sebagai material organik yang terbentuk secara alami dari sisa-sisa tumbuhan yang sebagian telah terdekomposisi dan terakumulasi pada rawa dan genangan air.

Secara umum, tanah-tanah dengan kandungan bahan organik yang tinggi disebut sebagai tanah gambut, tanah yang jenuh air (<30 hari kumulatif dalam setahun) dengan kadar C-organik sebesar 20% (berdasar berat), atau jenuh air ( $\geq 30$  hari kumulatif dalam setahun) dengan kandungan C-organik <12% jika fraksi mineral tidak mengandung klei atau C-organik <18% jika fraksi mineral mengandung  $\geq 60\%$  fraksi klei (Soil Survey Staff, 2014). Balai Besar Litbang Sumber Daya Lahan Pertanian (2015) mengklasifikasikan tanah sebagai tanah gambut jika mempunyai lapisan >50 cm dengan kadar C-organik  $\geq 12\%$ . Dewan Nasional Perubahan Iklim (DNPI) menyatakan bahwa kadar abu lahan gambut berkisar 0%–50% dan memiliki ketebalan gambut >50 cm. Walaupun demikian, Subagyo (2006) membatasi kriteria tanah gambut sebagai berikut:

- 1) terdiri atas bahan tanah organik;
- 2) jenuh air, selama  $\geq 1$  bulan setiap tahun; dan
- 3) ketebalannya  $\geq 60$  cm, apabila tersusun dari bahan fibrik, atau jika bobot isinya  $< 0,1 \text{ g/cm}^3$ ; atau
- 4) Ketebalannya  $\geq 40$  cm, apabila tersusun dari bahan saprik atau bahan hemik, atau jika terdiri atas bahan fibrik, kandungan serat jaringan  $< \frac{3}{4}$  bagian volume, dan bobot isinya harus  $\geq 0,1 \text{ g/cm}^3$ .

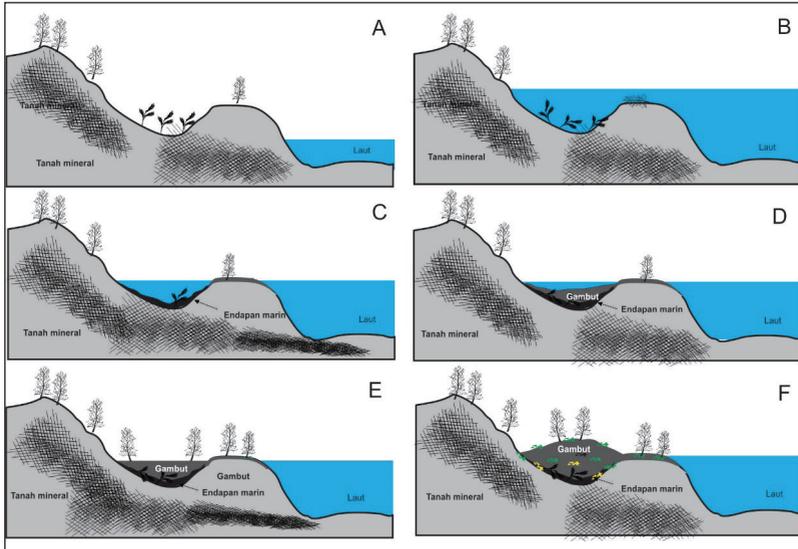
## 2. Pembentukan Tanah Gambut

Tanah gambut terbentuk akibat laju akumulasi bahan sebagian yang lebih tinggi daripada laju dekomposisinya (Joosten & Clarke, 2002; Rodney & Ewel, 2005). Tanah gambut terbentuk melalui proses geogenik, yaitu pembentukan tanah yang disebabkan oleh proses deposisi dan transportasi (Hardjowigeno, 1986). Tanah gambut di daerah tropika utamanya terbentuk oleh kondisi lingkungan yang anaerob sehingga proses dekomposisi berjalan sangat lambat (Rieley & Page, 2005). Tanah gambut di Kalimantan terbentuk dari sisa vegetasi yang terakumulasi pada kondisi tergenang sehingga mengakibatkan terhambatnya proses dekomposisi (Ritzema & Wösten, 2002). Menurut Chimner dan Ewel (2005), proses pembentukan gambut di daerah tropika lebih disebabkan oleh lambatnya proses dekomposisi karena kondisi lingkungan yang anaerob, sedangkan tanah gambut di daerah beriklim dingin terbentuk karena terhambatnya proses perombakan akibat suhu yang sangat rendah. Meskipun demikian, menurut Kurnain (2005), secara umum pembentukan gambut menghasilkan kondisi neraca air dan bahan organik yang positif. Neraca air positif memiliki arti bahwa jumlah air yang masuk (*inflow*) ke dalam suatu ekosistem tempat gambut terbentuk melebihi jumlah air yang mengalir ke luar (*outflow*). Selanjutnya, dinyatakan bahwa hal ini mengindikasikan suatu ekosistem dengan kondisi permukaan tanah yang jenuh air (*waterlogged*) sehingga menghambat proses dekomposisi bahan organik. Adapun neraca bahan organik positif mengindikasikan laju akumulasi yang melebihi laju dekomposisinya. Menurut Sieffermann et al. (1988), laju akumulasi gambut pada periode awal sekitar 9600–8450 tahun sebelum masehi (SM) mencapai 5 mm/th. Kemudian, pada periode 8000–5000 SM, laju ini menurun menjadi 2–2,5 mm/th hingga pada periode akhir diperkirakan hanya sekitar 1,4 mm/th. Tanpa menyebutkan periode pembentukannya, peneliti lain menyatakan bahwa laju akumulasi gambut di daerah tropika berkisar antara 1–10 mm/th (Sorensen, 1993; Maas, 1996) dan 0,6–2,7 mm/th (Jaenicke, 2010), sedangkan laju akumulasi gambut pada daerah nontropika berkisar 0,1–0,8 mm/th (Wust et al., 2007).

Dengan demikian, dapat dinyatakan bahwa laju akumulasi gambut di daerah nontropika relatif lebih lambat daripada daerah beriklim tropika.

Hasil penelitian yang dilakukan oleh Sieffermann et al. (1988), Rieley et al. (1992), serta Diemont dan Pons (1991) berdasarkan *C-dating* (umur karbon) menyatakan bahwa gambut di daerah tropika terbentuk dalam rentang waktu sekitar 2.000–10.000 tahun yang lalu. Ansyari (2010) juga melaporkan tentang pembentukan gambut yang lebih tua di Kalimantan Barat, yaitu 32.000 tahun silam untuk gambut pedalaman dan 6.500 tahun silam untuk gambut pantai. Di sisi lain, diketahui bahwa gambut di dataran pantai terbentuk pada sekitar 2.000 tahun yang lalu dan gambut di lembah sungai diperkirakan terbentuk sejak 4.500 tahun yang lalu, sedangkan gambut di daerah pedalaman terbentuk sejak 6.000–9.000 tahun yang lalu (Sieffermann et al., 1988; Rieley et al., 1992). Secara pedogenesis, pembentukan gambut pada periode pleistosen mulai terjadi saat permukaan laut berada sekitar 60 m di bawah permukaan laut sekarang. Selanjutnya, pada periode holosen terjadi peningkatan muka air laut sampai 20 m dalam rentang 4.000 tahun. Adapun puncak terjadinya peningkatan muka air laut (khususnya di lingkungan dataran Asia) diperkirakan terjadi pada 5.500 tahun yang lalu. Akibat kondisi tersebut, daratan sekitar pantai menjadi tergenang sehingga menyebabkan matinya vegetasi dan sisa jaringannya terakumulasi. Seiring dengan penurunan kembali muka air laut, terjadi pembentukan gambut melalui akumulasi bahan organik yang terus-menerus terjadi (Polak, 1975).

Di sisi lain, Sabiham (2006) menyatakan bahwa gambut di Indonesia terbentuk pada periode holosen. Secara lebih detail, pembentukan gambut diilustrasikan pada Gambar 4.2.



**Gambar 4.2** Ilustrasi Proses Pembentukan Gambut di Daerah Tropika dengan Substratum Bahan Endapan Marine

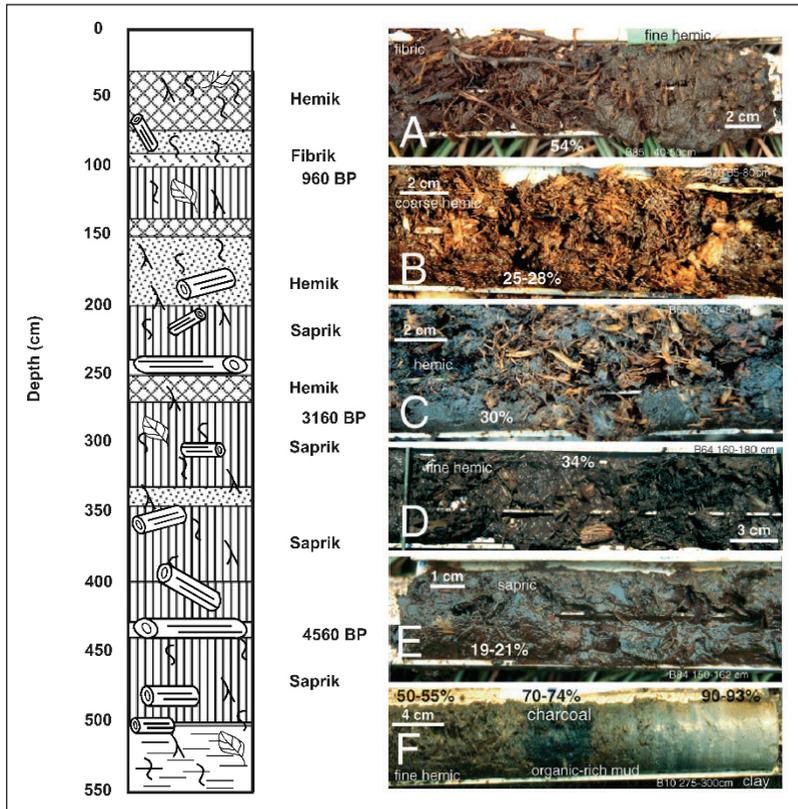
Lebih lanjut, proses pembentukan gambut sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 4.2 tersebut oleh Sabiham (2006) juga dilengkapi dengan data hasil analisis pollen dalam 5 periode, yaitu sebagai berikut.

- 1) Periode awal holosen. Pada periode ini, kenaikan muka air laut telah menyebabkan terbentuknya dataran pantai yang luas. Pada saat permukaan air laut kembali mengalami penurunan, terjadi endapan klei-payau (*brackish clay*) yang menutupi tanah tua di sekitar dataran pantai. Berdasarkan hasil analisis pollen, diketahui bahwa *Rhizophora* sp., *Nipa* sp., *Bruguiera* sp., dan *Sonneratia* sp. sebagai vegetasi yang mendominasi endapan klei-payau tersebut. Pada bagian pedalaman sebagai perbatasan antara air payau dan air tawar, ditemukan endapan fluviatil yang didominasi fosil dari *Oncosperma* sp. Selanjutnya, makin ke pedalaman, ditemukan endapan fluviatil dengan vegetasi paku-pakuan.

- 2) Periode 6800–5900 tahun BP (*before the present*). Pada periode ini, naiknya muka air laut menyebabkan terbentuknya daerah rawa. Di daerah dataran pantai, mulai terbentuk lingkungan payau dan pengendapan bahan gambut tipis di atas endapan klei-payau dengan fosil pollen dari asosiasi vegetasi *Rhizophora* yang mendominasi bahan gambut tersebut. Pada areal pedalaman, mulai terbentuk lahan rawa air tawar pada daerah cekungan di atas tanah tua (proses awal pembentukan gambut ombrogen), bahan gambutnya masih bercampur dengan bahan tanah mineral. Dari hasil analisis fosil pollen, diketahui bahwa bahan klei bergambut dalam lingkungan air tawar ini didominasi oleh jenis vegetasi paku-pakuan.
- 3) Periode 4800–4000 tahun BP. Naiknya muka air laut menyebabkan perubahan komposisi vegetasi di daerah pedalaman yang tumbuh di atas klei bergambut menjadi hutan rawa gambut sebagai sumber pembentukan rawa gambut air tawar tahap kedua. Berdasarkan hasil analisis pollen, rawa gambut tersebut berasal dari vegetasi hutan campuran yang didominasi oleh spesies *Eugenia* sp. dan *Pandanus* sp. Di dataran pantai, terjadi perubahan lingkungan dari kondisi payau ke kondisi payau hingga tawar. Di sisi lain, pengendapan bahan gambut di atas bahan klei-payau terus berlanjut. Hasil analisis fosil pollen menunjukkan bahwa asosiasi *Nipa* sp. dan *Sonneratia* sp. sebagai bahan gambut yang dominan.
- 4) Periode 2000–1500 tahun BP. Terjadi perubahan komposisi vegetasi di daerah dataran pantai. Di atas endapan gambut dari asosiasi *Nipa* sp. dan *Sonneratia* sp., diakumulasikan bahan gambut yang berasal dari hutan campuran dalam lingkungan air tawar. Di sisi lain, di daerah dataran pantai dan di daerah pedalaman terjadi akumulasi bahan gambut.
- 5) Periode 400–200 tahun BP. Pada periode ini terjadi akumulasi bahan organik di atas endapan marine. Bahan gambut yang diendapkan utamanya berasal dari tumbuhan bakau yang didominasi oleh asosiasi *Rhizophora*.

## B. Klasifikasi Tanah Gambut

Selama proses pembentukannya, gambut dapat dipengaruhi oleh banyak faktor sehingga sifat gambut yang terbentuk adalah hasil interaksi dari setiap faktor pembentukannya. Tanah gambut memiliki sifat yang sangat beragam tergantung pada tempat atau lingkungannya, seperti perbedaan ketebalan, derajat dekomposisi, bahkan sampai pada tingkat kesuburannya. Perbedaan tersebut dapat dilihat secara kasatmata dari profil yang menggambarkan stratigrafi dan variasi derajat dekomposisi gambut pada suatu wilayah (Gambar 4.3).



Sumber: Wust et al. (2003)

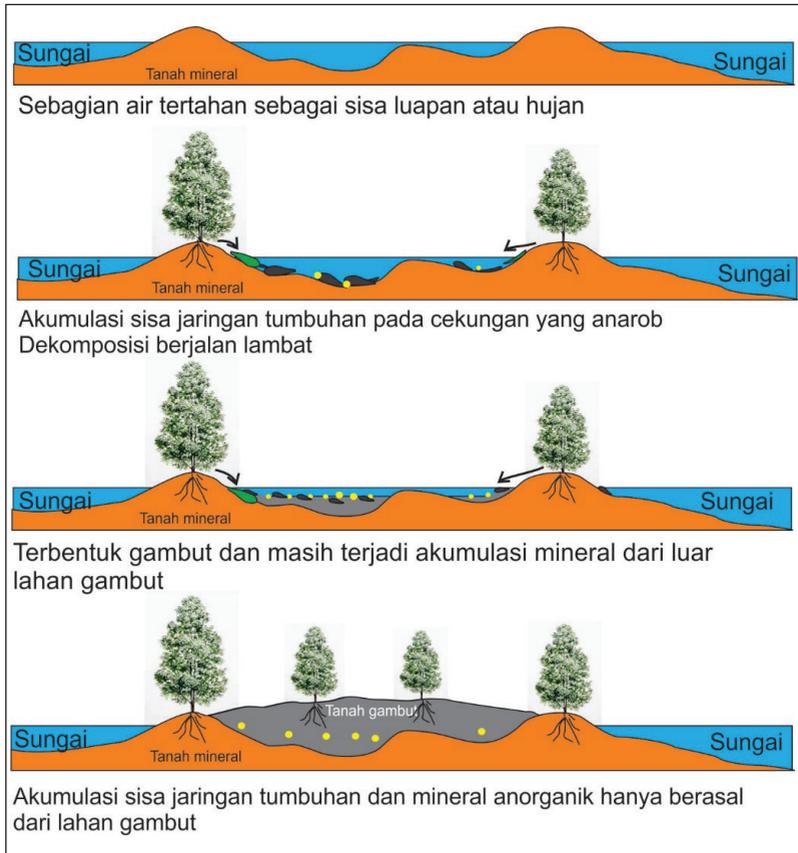
**Gambar 4.3** Stratigrafi dan Variasi Derajat Dekomposisi Gambut dari Tasek Bera, Malaysia

Perbedaan sifat-sifat tersebut telah menjadi dasar kriteria pengelompokan gambut. Berdasarkan derajat dekomposisinya, gambut dapat dikategorikan menjadi tiga kelompok, yaitu gambut saprik, hemik, dan fibrik (Soil Survey Staff, 2014; Andriesse, 1988). Secara detail, pengertian dari setiap kelompok tersebut diuraikan sebagai berikut.

- 1) Saprik adalah gambut dengan derajat dekomposisi paling lanjut dengan kandungan serat sebanyak <66% berdasarkan volume serat yang berdiameter >0,15 mm atau kurang dari 1/6 bagian dari volumenya, atau mengandung serat. Biasanya saprik berwarna kelabu sangat gelap sampai hitam dan sifat-sifatnya, baik secara fisik maupun kimia, relatif stabil.
- 2) Hemik adalah gambut dengan derajat dekomposisi tengahan, yaitu kandungan serat antara 33%–66% berdasarkan volume serat yang berdiameter >0,15 mm atau tinggal antara 1/6–3/4 bagian volumenya.
- 3) Fibrik adalah gambut dengan derajat dekomposisi awal, kandungan serat masih dapat terlihat sebagian dengan kisaran >66% berdasarkan volume serat yang berdiameter >0,15 mm atau masih >3/4 bagian dari volumenya.

Seiring dengan berjalannya waktu, selama tidak ada gangguan yang berarti terhadap ekosistemnya, lahan gambut terus bertambah tebal sehingga permukaan tanahnya menjadi lebih tinggi daripada daerah sekitarnya. Gambut yang berkembang pada kondisi tersebut dikenal juga dengan gambut ombrogen. Dengan kata lain, gambut ombrogen dapat terbentuk diawali dengan pembentukan gambut topogen atau dapat terbentuk di atas gambut topogen (Driessen, 1978). Gambut ombrogen memiliki tingkat kesuburan yang lebih rendah dibandingkan gambut topogen karena hampir tidak ada pengayaan mineral selain hasil dekomposisi dari sisa-sisa makhluk hidup di atasnya (Diemont et al., 1992; Notohadiprawiro, 1996). Sebagian besar gambut di daerah Asia Tenggara, khususnya sebagian besar Indonesia, tergolong ke dalam gambut ombrogen (Rieley &

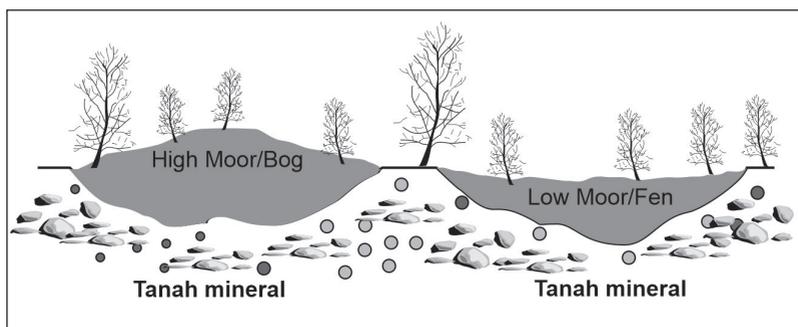
Page, 2005; Page et al., 2006). Kondisi yang relatif subur menyebabkan tanaman dapat tumbuh subur dengan baik di atas gambut topogen. Sisa-sisa jaringan tumbuhan terakumulasi hingga membentuk lapisan gambut baru yang lama-kelamaan membentuk kubah (*dome*) yang secara otomatis selama proses pembentukannya hanya dipengaruhi oleh air hujan (Gambar 4.4).



**Gambar 4.4** Ilustrasi Proses Pembentukan Gambut Topogen yang Kemudian Membentuk Gambut Ombrogen

Rieley dan Page (2005) menyatakan bahwa bentuk kubah dari gambut ombrogen di daerah tropika serupa dengan *raised bog* di daerah temperate atau boreal. Menurut Dommain et al. (2010), orang pertama yang melaporkan keberadaan kubah gambut yang disebutnya sebagai “*raised bog*” di Asia Tenggara atau tepatnya di Pulau Borneo adalah Molengraaff pada tahun 1900. Lahan gambut yang berkembang di daerah iklim nontropika membentuk kubah yang dikenal sebagai *raised bog* atau *raised mire*. Serupa gambut di daerah pasang surut atau pantai, maka *bog* pada umumnya berkembang pada daerah cekungan (tidak selalu berada di antara dua buah sungai) ataupun daerah pedalaman. Gambut jenis ini awalnya dapat disebut sebagai *low moor* atau *fen*, kemudian terus berkembang membentuk kubah yang disebut sebagai *high moor* atau *bog* (Gambar 4.5).

Menurut lingkungan pembentukan atau fisiografinya, gambut dapat dibedakan atas gambut cekungan, gambut sungai, gambut dataran tinggi, dan gambut dataran pesisir/pantai. Gambut cekungan (*basin peat*) adalah gambut yang terbentuk di daerah cekungan, lembah sungai, atau rawa burit (*backswamps*). Gambut sungai (*river peat*) adalah gambut yang terbentuk di sepanjang sungai yang masuk ke daerah lembah <1 km, biasanya didominasi oleh vegetasi campuran. Gambut dataran tinggi (*highland peat*) adalah gambut yang terbentuk di punggung-punggung bukit/pegunungan, misalnya di pegunungan Dieng (Jawa Tengah). Gambut dataran pesisir/pantai (*coastal peat*)



**Gambar 4.5** Ilustrasi Fisiografi Lahan *Bog* (Berbentuk Dome) dan *Fen*

adalah gambut yang terbentuk di sepanjang garis pantai, biasanya didominasi oleh vegetasi mangrove (Anderson, 1983; Diemont & Supardi, 1987; Sabiham, 1988; Sieffermann et al., 1988, Rieley, 1992; Rieley et al., 1992; Agus & Subiksa, 2008). Lahan gambut pantai biasanya memiliki substratum berupa endapan laut (*marine sediments*). Lahan gambut ini biasanya berada jauh di belakang rawa bakau (*coastal mangrove swamp*) atau berada pada ketinggian 1–2 m di atas permukaan laut.

Akumulasi bahan organik yang terus-menerus meningkatkan ketebalan gambut karena proses dekomposisinya berjalan lebih lambat daripada akumulasinya. Ketebalan lapisan gambut dapat digunakan sebagai salah satu kriteria pengelompokan gambut, menurut Widjaja-Adhi (1997), berdasarkan ketebalannya, lahan gambut dibedakan menjadi empat kategori, yaitu gambut sangat tebal jika ketebalannya >3 m, gambut tebal jika ketebalannya 2–3 m, gambut sedang jika ketebalannya 1–2 m, dan gambut dangkal jika ketebalannya 0,5–1 m. Walaupun demikian, keberadaan lapisan gambut di atas lapisan tanah mineral tidak secara otomatis menjadikan suatu lahan dapat disebut sebagai lahan gambut, seperti disebutkan sebelumnya tentang pencirian tanah gambut bahwa ketebalan lapisan gambut menjadi salah satu faktor pembatas dalam definisi lahan gambut. Adanya lapisan gambut di permukaan tanah mineral dengan ketebalan antara 20–50 cm disebut tanah mineral bergambut, sedangkan tanah mineral murni, sesuai kesepakatan, hanya memiliki lapisan gambut di permukaan tanah setebal <20 cm (Subagyo, 2006).

Berdasarkan bahan asal penyusunnya, gambut dapat dibedakan menjadi gambut lumutan, seratan, dan kayuan. Gambut lumutan (*sedimentary/moss peat*) adalah gambut yang terbentuk atas campuran tumbuhan air (*family Liliaceae*), plankton, dan sejenisnya. Gambut seratan (*fibrous/sedge peat*) adalah gambut yang terbentuk dari campuran tumbuhan rerumputan, terutama sphagnum. Adapun gambut kayuan (*woody peat*) adalah gambut yang terbentuk utamanya dari tumbuhan berkayu dan semak (Noor, 2001).

Berdasarkan kadar abunya, gambut didefinisikan sebagai tanah yang memiliki kadar abu 0%–55%, lumpur 55%–65%, tanah/sedimen kaya organik 65%–80%, dan tanah/sedimen mineral 80%–100%. Kelas gambut dibagi lagi menjadi beberapa sub-kelas, yakni abu sangat rendah (0%–5%), abu rendah (5%–15%), abu sedang (15%–25%), abu tinggi (25%–40%), dan abu sangat tinggi (40%–55%) (Wüst et al., 2003). Berdasarkan American Standard Testing and Material (ASTM), tanah gambut dapat diklasifikasikan berdasarkan kadar abunya, yaitu gambut berkadar abu rendah jika kadarnya <5%, gambut berkadar abu sedang jika kadarnya berkisar 5%–15%, sedangkan gambut berkadar abu tinggi jika kadarnya >15%.

Selain itu, berdasarkan tingkat kesuburannya, gambut dapat dibedakan menjadi gambut oligotrofik, eutrofik, dan mesotrofik (Driessen & Soepraptohardjo, 1974; Widjaja-Adhi, 1997). Secara detail, pengertian dari ketiga jenis gambut tersebut diuraikan sebagai berikut.

- 1) Gambut oligotrofik adalah gambut yang memiliki kandungan mineral rendah, khususnya Ca dan Mg, bersifat masam atau sangat masam. Gambut ini memiliki tingkat kesuburan yang rendah karena kandungan mineralnya yang rendah karena hanya berasal dari air hujan dan perombakan bahan organik setempat, biasanya memiliki ketebalan >2 m.
- 2) Gambut eutrofik adalah gambut yang memiliki tingkat kesuburan tinggi karena kandungan mineralnya yang tinggi karena berasal dari tumbuhan berserat yang memperoleh pengayaan hara mineral secara alami dari lingkungannya. Umumnya, gambut eutrofik berupa gambut yang tipis dan dipengaruhi oleh sedimen sungai atau laut. Gambut ini memiliki kandungan mineral, seperti  $\text{CaCO}_3$  yang tinggi, banyak terdapat pada daerah payau, bahan penyusun utamanya dari sisa-sisa rerumputan, dan biasanya memiliki pH yang netral sampai alkalis.
- 3) Gambut mesotrofik adalah gambut yang memiliki tingkat kesuburan antara kelompok oligotrofik dan eutrofik karena memiliki kandungan mineral dan basa berkuantitas sedang.

Menurut Anda et al. (2021), luas lahan gambut di Indonesia mencapai 13,43 juta ha yang tersebar di pulau Sumatra (5,85 juta ha), Kalimantan (4,54 juta ha), Papua (3,01 juta ha), dan Sulawesi (0,024 juta ha). Berdasarkan ketebalan lapisan gambutnya, di Indonesia terdapat sekitar 5,24 juta ha (35%) gambut dangkal; 3,91 juta ha (26%) gambut sedang; 2,76 juta ha (19%) gambut tebal; dan 2,98 juta ha (20%) gambut sangat dalam (Ritung et al., 2012).

Lahan gambut di Indonesia banyak terdapat pada daerah sekitar sungai besar yang bermuara ke laut sampai ratusan kilometer ke arah hilir. Dengan topografi demikian, lahan gambut pada suatu daerah cenderung memiliki perbedaan ketebalan lapisan gambut. Hal ini disebabkan oleh perbedaan jaraknya dari sungai atau laut (Andriess, 1988). Makin jauh dari sungai/laut, gambut cenderung makin tebal (membentuk kubah) (Sajarwan, 2007). Menurut Rieley dan Page (2005) serta Page et al. (2006), gradien ketebalan gambut di Provinsi Kalimantan Tengah mencapai 1 m dalam jarak 726 m.

### **C. Sifat Tanah Gambut**

Beberapa tipe lahan gambut yang berbeda mencerminkan keadaan khusus dari proses pembentukan dan komposisinya. Lahan gambut dari daerah boreal dan temperate sangat berbeda dari lahan gambut tropika. Demikian pula, lahan gambut dataran tinggi berbeda secara signifikan dari lahan gambut yang ditemukan di dataran rendah. Banyaknya pengelompokan lahan gambut berdasarkan beragam faktor tersebut sehingga menyebabkan adanya penyebutan yang berbeda-beda terhadap gambut yang terkadang relatif sama karena setiap sifat yang terbentuk adalah hasil interaksi dari banyak faktor. Hasil-hasil penelitian menunjukkan bahwa adanya perbedaan sifat-sifat antartipe lahan gambut. Walaupun demikian, tidak sedikit data juga menunjukkan adanya sebagian sifat-sifat yang sama antarlahan gambut, meskipun dari tipe lahan gambut yang berbeda.

Sifat tanah gambut dipengaruhi oleh banyak faktor, antara lain faktor internal dan eksternal berupa faktor kondisi lingkungan sekitarnya. Menurut Rieley dan Page (2005), perbedaan ketebalan

gambut dalam suatu hamparan wilayah atau lahan merupakan gambaran perbedaan umur gambut, di mana makin tebal gambut, umurnya juga cenderung makin tua, khususnya gambut pada lapisan bawah. Setiap lapisan dalam suatu profil tanah gambut menunjukkan bahan penyusun yang berbeda sehingga menampilkan sifat yang berbeda. Sifat tersebut dapat berupa derajat dekomposisi, kandungan hara, ataupun sifat kimia tanah lainnya, serta spesies dan komposisi mikrobiologis tanah (Dimitriu et al., 2010). Sifat fisika dan kimia gambut tebal berbeda dengan gambut dangkal. Perbedaan sifat ini dapat muncul karena perbedaan bahan penyusun atau faktor alam, seperti periode banjir ataupun kering yang terjadi dalam waktu yang lebih lama selama proses pembentukannya. Adanya perbedaan sifat gambut dapat pula disebabkan oleh pengaruh eksternal, misalnya tinggi genangan atau tinggi muka air tanah, jenis vegetasi dominan, bahkan aktivitas pertanian berupa aplikasi amelioran.

Sifat tanah gambut ditentukan antara lain oleh sifat bahan penyusunnya. Berdasarkan bahan dasar pembentukannya, gambut di daerah tropika berbeda dengan gambut di daerah nontropika. Gambut di daerah tropika terbentuk utamanya dari bahan tumbuhan yang berkayu (Rieley et al., 2008), sedangkan gambut di daerah nontropika terbentuk dari bahan sphagnum. Driessen (1978) melaporkan komposisi senyawa organik dari gambut tropika sebagaimana ditampilkan pada Tabel 4.1.

**Tabel 4.1** Komposisi Senyawa Organik Gambut Ombrogen di Indonesia

Komposisi	Bobot (%)
Lignin	64–74
Bahan humat	10–20
Selulosa	0,2–10
Hemiselulosa	1–2
Lainnya	<5

Sumber: Driessen (1978)

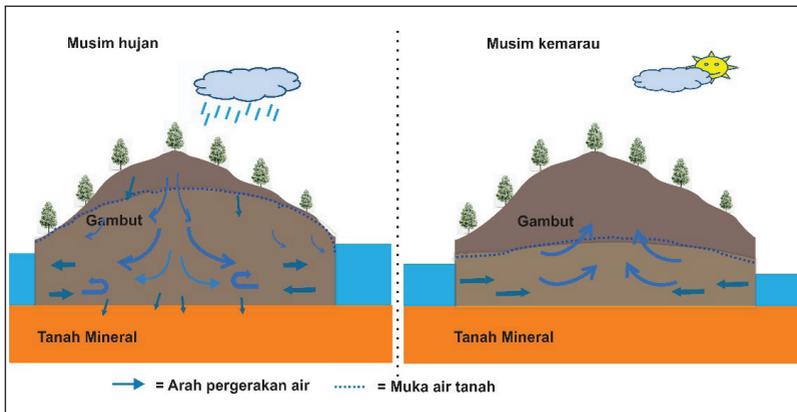
Sejatinya, tanah gambut secara alamiah berada dalam kondisi yang jenuh air atau anaerob sehingga laju dekomposisinya berjalan lebih lambat daripada akumulasinya. Reklamasi lahan gambut menyebabkan perubahan lingkungan lahan gambut yang cukup signifikan. Reklamasi lahan yang diawali dengan penebangan hutan, kemudian diikuti dengan pembuatan kanal dan area pemukiman telah menyebabkan perubahan sifat tanah, seperti penurunan muka air tanah, kering tak balik (hidrofobik), dan meningkatnya laju dekomposisi. Adji et al. (2005) dan Anda et al. (2009) melaporkan bahwa adanya kandungan Al yang tinggi dan pH yang rendah dari air tanah dan air pada kanal di sekitar daerah yang dahulunya menjadi bagian dari pembukaan atau reklamasi lahan gambut. Selain itu, Beek et al. (2007) melaporkan bahwa drainase lahan gambut yang digunakan untuk pertanian intensif telah menyebabkan pencucian hara dari tanah ke perairan. Rieley dan Page (2005) dan Page et al. (2006) mencatatkan bahwa fluktuasi tinggi muka air tanah antara musim hujan dan kemarau mencapai 0,2–0,6 m atau bahkan dapat mencapai 2,5 m. Kondisi ini menggambarkan bahwa pembukaan lahan gambut dengan cara yang tidak tepat berpotensi merusak peranan kunci lahan gambut dalam siklus hidrologi dan biokimia lahan.

Tinggi muka air tanah dan fluktuasinya memiliki peranan kunci dalam ekosistem gambut (Schumann & Joosten, 2008). Turunnya muka air tanah menguntungkan bagi pertumbuhan sebagian jenis tanaman, tetapi di sisi lain dapat menyebabkan gambut menjadi kering tak balik dan meningkatkan laju mineralisasi. Sebaliknya, kondisi lingkungan yang jenuh air relatif berdampak positif bagi tanah, tetapi tidak menguntungkan untuk pertumbuhan beberapa jenis tanaman. Könönen et al. (2015) menyimpulkan bahwa perubahan kondisi air tanah menyebabkan perbedaan hasil dari suatu proses dekomposisi sehingga berdampak pada kelarutan hara tanah. Menurut Noor (2001), tinggi muka air tanah yang optimum berkisar antara 60–100 cm untuk mencegah kekeringan dan kebakaran, 40–50 cm untuk mencegah keamblasan, dan 30–40 cm untuk mendukung pertumbuhan palawija. Keberadaan air di tanah gambut tidak terlepas

dari potensi munculnya sifat kering tak balik yang dapat terjadi akibat kekeringan atau kesalahan kelola.

Pola aliran air di lahan gambut (khususnya lahan gambut yang berbentuk *dome*) pada daerah yang tidak mendapat pengaruh langsung dari pasang-surutnya air laut atau sungai saat musim hujan dan musim kemarau sangat dipengaruhi oleh musim atau adanya curahan air hujan (Gambar 4.6). Selama periode basah/musim hujan, aliran air akan bergerak ke arah tanah mineral atau lapisan tanah bawah dan membawa kandungan mineral ataupun bahan terlarut lainnya. Adapun pada musim kemarau, aliran air dapat bergerak ke atas secara kapiler. Pergerakan air dari atas ke bawah atau sebaliknya ini tentunya akan berpengaruh pada sifat kimia dari tanah gambut.

Penurunan muka air tanah menyebabkan gambut lebih cepat mengalami subsidensi. Hal ini dapat terjadi akibat terbakar maupun percepatan dekomposisi. Sekitar 61,5% dari luasan gambut di Kalimantan Tengah dan sebagian besar berada dalam bekas area PLG pada tahun 1997 mengalami kebakaran. Hal ini menyebabkan hilangnya lapisan gambut sebesar 40–100 cm dan turunnya muka air tanah sebesar 70 cm dibandingkan pada kondisi sebelumnya (Siegert et al., 2002; Bechteler & Siegert, 2004).



**Gambar 4.6** Ilustrasi Pola Aliran Air di Lahan Gambut di Daerah Sekitar Sungai pada Musim Hujan dan Musim Kemarau

## 1. Sifat Kimia Tanah Gambut

Sifat kimia tanah gambut ditentukan oleh banyak faktor, antara lain sifat-sifat gambut itu sendiri dan kondisi lingkungan sekitarnya. Sifat kimia tanah gambut daerah tropika berbeda dengan daerah boreal (Tabel 4.2). Secara alamiah, dengan ukuran ketersediaan hara bagi komoditas tanaman tertentu, khususnya tanaman pangan, dinyatakan tanah gambut memiliki sifat tidak subur. Akan tetapi, untuk menentukan tingkat kesuburan suatu jenis tanah tentunya harus didasari oleh jenis atau komoditas tumbuhan yang akan ditanam atau tumbuh di atas lahan tersebut. Berdasarkan hal tersebut, sifat asli tanah gambut, khususnya di daerah tropika, adalah tidak subur untuk tanaman pangan pada umumnya, tetapi cukup subur untuk tanaman berkeayu yang tumbuh secara alamiah di lahan tersebut.

**Tabel 4.2** Sifat Kimia Tanah Gambut dari Daerah Tropika dan Boreal

Sifat Kimia	Tropika	Boreal
Kadar abu (%)	<5–55	1–2
pH tanah	3–4	4,07–5,00
EC ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	40–100	50
C-organik (%)	49–57	43,4
N-total (%)	0,1–2,2	1,72
C/N	29–52	25
P-total (g/kg)	0,4–0,7	0,03–0,36
K (cmol/kg)	0,04–0,62	1,18–12,95
Ca (cmol/kg)	5,80–48,22	1,5–3,5
Mg (cmol/kg)	1,32–10,88	2,92–23,4
Na (cmol/kg)	0,20–1,50	0,8
KTK (cmol/kg)	52–160	64–218

Sumber: Kurnain et al. (2001); Rieley et al. (1996); Wüst et al. (2003); Rieley & Page (2005); Fahmi et al. (2012); Kull et al. (2008); Urbanova et al. (2011); James et al. (2016); Bijak (2017); Hartssock et al. (2016); Simola et al. (2012)

Sifat inheren gambut memengaruhi sifat kimia tanah gambut lainnya, antara lain pH tanah, suhu, redoks, bahan organik, ketersediaan unsur hara, serta faktor lainnya yang membatasi aktivitas mikrobiologi tanah (Holden et al., 2004). Demikian pula derajat dekomposisi gambut juga merupakan faktor inheren gambut yang memengaruhi sifat kimia tanah gambut. Beberapa peneliti menyatakan bahwa kandungan hara gambut menurun dan daya retensinya terhadap logam meningkat seiring dengan pertambahan derajat dekomposisi gambut. Menurut Bridgham dan Richardson (2003), proses imobilisasi hara tertinggi terjadi ketika kualitas bahan organik yang memiliki kadar ketersediaan hara yang rendah diberikan kepada tanah dengan kadar ketersediaan hara tinggi. Adapun kondisi lingkungan lahan gambut, seperti tinggi muka air tanah, suhu, dan aktivitas mikroorganisme adalah faktor eksternal yang juga memiliki pengaruh besar terhadap sifat kimia tanah gambut.

Lebih lanjut, faktor eksternal, seperti pengusikan lahan gambut oleh manusia, juga memiliki pengaruh besar terhadap sifat kimia tanah gambut. Menipis ataupun hilangnya lapisan gambut juga menyebabkan menurunnya kandungan P dan N-total tanah serta meningkatkan kandungan Al-dd dan H-dd (Fahmi et al., 2012; 2014; Fahmi & Radjagukguk, 2013). Pembukaan dan kebakaran lahan gambut telah menyebabkan perubahan sifat kimia tanah gambut. Harvey dan McCormick (2009) menyatakan bahwa oksidasi gambut memiliki kontribusi besar terhadap perubahan kualitas air dan mineral-mineral yang sensitif terhadap perubahan tersebut. Hal ini dikuatkan oleh hasil penelitian Kurnain et al. (2004) yang menunjukkan bahwa pemasaman tertinggi dan kehilangan hara terbesar terjadi pada lahan gambut yang telah dibuka diikuti lahan yang pernah terbakar. Sebaliknya, suplai atau input hara ke lahan terbesar secara umum terjadi pada hutan alami dibandingkan lahan yang telah dibuka dan lahan yang pernah terbakar.

Kegiatan drainase lahan gambut untuk berbagai tujuan mengakibatkan perubahan sifat kimia dan fisika tanah gambut. Price et al. (2003) melaporkan bahwa terjadinya subsidens sebesar 3,7 cm/th/

m<sup>2</sup> akibat drainase lahan gambut, bahkan nilai tersebut terus meningkat hingga mencapai 0,3 cm/th/m<sup>2</sup> dari nilai tahun sebelumnya. Penurunan muka air tanah meningkatkan laju mineralisasi. Menurut Haraguchi (2002), kedalaman muka air tanah merupakan faktor lingkungan yang paling menentukan laju dekomposisi di lahan gambut, khususnya pada gambut mesotrofik dan eutrofik. Tingginya proses dekomposisi atau mineralisasi menyebabkan peningkatan kandungan hara dalam tanah gambut.

Lebih jauh, perbedaan tinggi muka air tanah dapat pula menyebabkan terjadinya perbedaan sifat kimia dan biologis tanah gambut. Laju dekomposisi dan populasi mikroorganisme tanah gambut sangat dipengaruhi oleh tinggi muka air tanah (Hicks et al., 2009; Kaczorek et al., 2009) dan jenis vegetasi di atasnya (Macrae et al., 2013). Terjadinya penggenangan akibat naiknya muka air tanah tidak hanya akan memengaruhi unsur yang sensitif terhadap redoks tanah, tetapi lebih jauh lagi, yaitu juga akan menyebabkan perubahan konsentrasi unsur-unsur di tanah serta senyawa-senyawa hasil aktivitas mikroorganisme. Penggenangan tanah gambut akan menurunkan kadar O<sub>2</sub> dalam tanah. Di sisi lain, penggenangan dapat menurunkan ketersediaan N dan P dalam tanah akibat melambat dan terganggunya proses dekomposisi bahan organik (*litter*) yang terdapat di permukaan tanah.

Berdasarkan kondisi stratigrafi lapisan gambut, sifat kimia tanah gambut secara unik memiliki pola atau sifat yang beragam yang dipengaruhi antara lain oleh ketebalan dan jenis lapisan mineral di bawah lapisan gambut (Fahmi, 2012), tipe penggunaan lahan (Kurnain, 2005; Andersen et al., 2013), tipe vegetasi yang hidup di atasnya (Wang & Moore, 2014), dan adanya campur tangan manusia, seperti penebangan pohon/deforestasi (Salimin et al., 2010; Ismawi et al., 2012).

Sebaliknya, jika tanah dalam kondisi relatif kering atau menurunnya muka air tanah, baik akibat didrainase atau menurunnya curah hujan, ini menyebabkan *ionic strength*, pH, DHL, KPK, dan konsentrasi unsur tersebut cenderung menurun, yang mana dinamika perubahan tersebut juga sangat tergantung pada sifat gambut itu sendiri.

### **a. Kemasaman Tanah**

Gambut secara umum memiliki sifat yang kurang menguntungkan untuk pertumbuhan tanaman, khususnya untuk tanaman budi daya karena biasanya memiliki tingkat kemasaman yang tinggi, yaitu berkisar antara pH 3–4. Walaupun demikian, Hartatik et al. (2004) melaporkan bahwa pH tanah gambut di Sumatra Selatan memiliki kisaran pH yang lebih tinggi, yaitu berkisar antara 4,1–4,3. Tingkat kemasaman tanah gambut sangat ditentukan oleh banyak faktor, seperti kondisi hidrologis lahan, penggunaan lahan, ketebalan gambut, dan sifat lapisan substratum (Kurnain, 2005; Hartatik et al., 2011; Fahmi, 2012). Menurut Andriess (1974), tingkat kemasaman tanah gambut berhubungan erat dengan kandungan asam humat dan asam fulvat. Hartatik et al. (2004) menyatakan bahwa kemasaman tanah gambut cenderung menurun seiring dengan meningkatnya ketebalan gambut. Tingkat dekomposisi gambut tipis yang cenderung lebih lanjut daripada gambut tebal menyebabkan makin tingginya kadar asam humat dan fulvat pada gambut tipis. Di sisi lain, Iyobe dan Haraguchi (2008) menunjukkan bahwa bahan sulfidik di bawah lapisan gambut memengaruhi kemasaman tanah gambut. Hal tersebut dinyatakan berhubungan dengan fluktuasi muka air tanah yang menyebabkan oksidasi bahan sulfidik dan pelarutan sumber kemasaman. Gambut tebal memiliki sifat kimia yang berbeda daripada gambut yang lebih tipis. Gambut tebal memiliki derajat dekomposisi yang lebih rendah dan lebih masam (pH = 3–4). Gambut oligotrop dengan substratum pasir kuarsa di Kalimantan Tengah memiliki kisaran pH 3,25–3,75 (Halim, 1987; Salampak, 1999).

### **b. Ketersediaan Hara**

Tanah gambut diketahui secara umum memiliki tingkat kesuburan yang rendah. Perspektif ini khususnya untuk komoditas tanaman yang dibudidayakan. Walaupun demikian, kesuburan tanah gambut sangat ditentukan oleh suplai hara dari lingkungan sekitarnya. Gambut topogen memiliki tingkat kesuburan yang lebih tinggi daripada gambut ombrogen. Hal ini disebabkan gambut topogen masih

mendapat input hara dari lingkungan sekitarnya yang utamanya berupa limpasan ataupun pergerakan air di dalam tanah. Adapun gambut ombrogen memiliki kandungan hara rendah karena suplainya sangat tergantung pada siklus hara di dalam ekosistemnya saja.

Sifat kesuburan tanah-tanah di lahan rawa sangat dipengaruhi oleh kondisi hidrologis lahan. Demikian pula tanah gambut, kelarutan atau konsentrasinya ditentukan oleh kondisi hidrologis lahan ataupun kelembapan tanah. Menurut Kieckbusch dan Schrautzer (2007), kondisi hidrologis lahan gambut menentukan dinamika unsur hara dalam tanah gambut. Drainase lahan gambut menyebabkan peningkatan ketersediaan unsur hara (Prevos et al., 1999). Peningkatan muka air tanah (*rewetting*) gambut menyebabkan peningkatan pH tanah, KTK, dan kelarutan P (Iyobe & Haraguchi, 2008; Kaila et al., 2016). Hal ini terkait erat dengan proses dekomposisi ataupun mineralisasi di lapisan tanah. Selain itu, penggenangan cenderung akan meningkatkan konsentrasi P, Ca, K,  $\text{NH}_4^+$  (Wright et al., 2001; Banach et al., 2009),  $\text{Fe}^{2+}$ , DHL, KTK, dan *ionic strength* (Kirk, 2004; Reddy & DeLaune, 2008; Fahmi et al., 2019). Fakta ini tentunya dapat dihubungkan dengan adanya peningkatan pH tanah dan konduktivitas tanah yang terjadi karena tanah tergenang (Fahmi et al., 2019). Menurut Ponziani et al. (2011), terdapat hubungan yang erat antara kadar lengas tanah gambut dengan konduktivitasnya.

Gambut tebal memiliki sifat kimia yang berbeda daripada gambut yang lebih tipis. Gambut tebal memiliki kandungan hara lebih rendah (Radjagukguk, 1992; Kurnain et al., 2001; Page et al., 2006). Hal ini diduga berhubungan dengan kondisi gambut tebal yang umumnya berada pada daerah puncak kubah gambut sehingga cenderung akan bersifat sebagai gambut ombrogen. Fakta ini didukung oleh pernyataan Wust et al. (2002) bahwa kandungan hara pada lapisan atas gambut tebal lebih rendah daripada gambut tipis. Secara umum, berdasarkan keberadaan lapisan tanah, lapisan yang berada di atas (*top layer*) memiliki kadar hara yang lebih tinggi. Lebih tingginya kandungan hara pada lapisan atas gambut dibandingkan lapisan di bawahnya, menurut Amaleviciute et al. (2015), sangat erat hubungan-

nya dengan adanya gradien intensitas mineralisasi secara vertikal. Tingginya kandungan hara pada lapisan atas adalah gambaran proses mineralisasi yang lebih intensif.

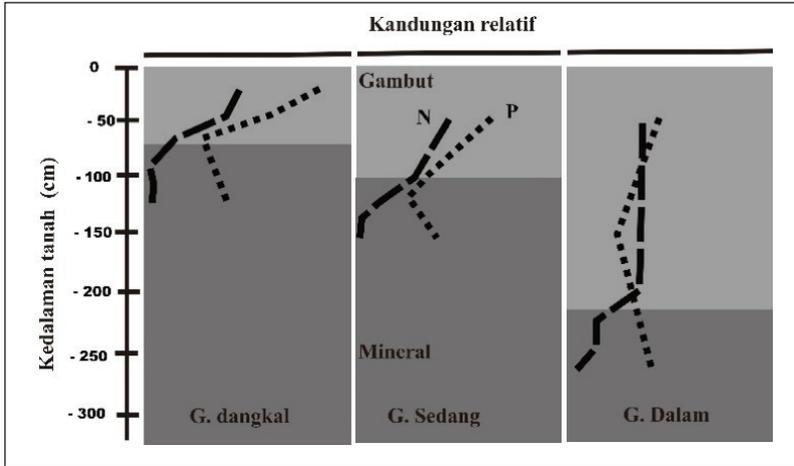
Makin tebal gambut atau makin mendekati puncak kubah, pengaruh ayunan pasang air juga makin rendah. Hal tersebut akan menyebabkan lahan makin tidak mendapat pengaruh dari pasang-surutnya air laut/sungai. Pada gambut yang makin tebal, khususnya gambut ombrogen, fluktuasi muka air tanah sangat tergantung pada hujan. Pada puncak kubah, fluktuasi muka air tanah karena perbedaan musim dapat mencapai 0,45 m dan pada daerah tepi kubah, fluktuasi muka air tanah dapat mencapai 0,60 m (Takahashi et al., 2002). Hasil penelitian Weiss et al. (2002) pada gambut ombrogen tebal (9,6 m) menunjukkan bahwa pada lapisan atas (100–150 cm) lebih kaya akan hara daripada lapisan di bawahnya (bagian tengah). Kandungan P, K, Ca, Mg, Si, dan Na lebih tinggi pada lapisan atas (50–80 cm) dibandingkan lapisan bawahnya. Kandungan Mg dapat meningkat jika lahan masih mendapat pengaruh air pasang dari laut atau payau (Tie & Lim, 1992).

Fluktuasi dan pergerakan air tanah sangat berpengaruh pada kelarutan maupun pergerakan unsur dan senyawa kimia di lahan gambut. Pergerakan beberapa unsur di lahan gambut sangat dipengaruhi oleh kondisi muka air tanah, di mana tinggi muka air tanah tersebut juga sangat tergantung pada musim (Sapek et al., 2007). Fluktuasi muka air tanah akibat perbedaan musim tidak hanya menentukan ketersediaan  $O_2$ , tetapi juga menentukan derajat dekomposisi, ketersediaan dan mobilitas unsur hara dan logam, serta memengaruhi sifat fisika tanah gambut tersebut (Peng et al., 2007; Niedermeier & Robinson, 2007; Hicks et al., 2009; Takada et al., 2009), seperti N, P, dan Fe (Fahmi et al., 2010; 2012; 2014).

Laju dekomposisi atau mineralisasi sangat memengaruhi ketersediaan N di dalam tanah. Demikian pula kadar N-total di tanah gambut, sangat dipengaruhi derajat dekomposisi bahan organik ataupun bahan gambut itu sendiri. Hal ini menyebabkan kadar N-total sangat bervariasi. Kandungan N-total tanah gambut berkisar

$\geq 2\%$  (Kurnain et al., 2001; Melling et al., 2008). Di daerah Pangkoh, Kalimantan Tengah diketahui kadar N tanah gambut sebesar 0,75% (Maas et al., 1997) sampai 0,83% (Fahmi et al., 2013). Adapun menurut laporan Suhardjo dan Widjaja-Adhi (1977), Lambert (1995), Sajarwan (1998), dan Dohong (1999), kandungan N-total dalam tanah gambut pada beberapa daerah di Indonesia berkisar antara 0,3%– 2,1%. Adanya perbedaan kadar N-total dari beberapa lahan gambut sangat dimungkinkan, mengingat sifat asli N dalam tanah gambut yang sangat beragam dan dapat dipengaruhi oleh banyak proses, seperti transformasi, translokasi, maupun volatilisasi, serta jenis vegetasi yang tumbuh di atasnya. Dekomposisi atau mineralisasi bahan organik (serasah) di atas tanah berperan penting dalam variabilitas kadar N-total di tanah gambut. Hal ini juga menyebabkan lapisan tanah gambut teratas memiliki kadar N-total yang lebih tinggi daripada lapisan di bawahnya.

Variabilitas kadar N-total di tanah gambut dapat pula dihubungkan dengan kondisi hidrologis atau lebih tepatnya kelembapan tanah. Kondisi hidrologis lahan atau kadar lengas menentukan proses dekomposisi bahan organik dan pola distribusi N-total (Wang et al., 2016). Fahmi dan Radjagukguk (2013) melaporkan bahwa dari kondisi hidrologi lahan yang diamati berdasarkan musim, diketahui bahwa kandungan N-total tanah (khususnya lapisan atas pada pengamatan musim hujan dan kemarau) cenderung lebih tinggi pada saat muka air tanah yang lebih rendah. Rendahnya permukaan air tanah menyebabkan tanah menjadi lebih aerob sehingga meningkatkan laju dekomposisi dan menurunkan tingkat kehilangan N karena pelindian. Proses dekomposisi akan lebih intensif pada kondisi aerasi yang lebih baik (Breemen & Buurman, 2002), seperti kondisi terjadinya penurunan permukaan air tanah (Strakova et al., 2011). Selain itu, bentuk N dalam tanah yang tergenang biasanya berbentuk  $\text{NH}_4$  yang relatif lebih mudah hilang karena pelindian. Banach et al. (2009) dan Sapek et al. (2009) melaporkan bahwa terjadi peningkatan kandungan N tanah karena penurunan permukaan air tanah. N dapat hilang karena bergerak bersama air tanah pada kondisi yang tergenang atau lapisan tanah yang jenuh dengan air.



Sumber: Diolah dari Fahmi (2012)

**Gambar 4.7** Pola Konsentrasi N dan P di Lahan Gambut Dangkal, Gambut Sedang, dan Gambut Tebal dengan Substratum Mineral Bahan Sulfidik

Berbeda dengan sifat tanah lainnya, kadar N-total pada tanah gambut tebal dapat lebih tinggi daripada gambut yang lebih tipis (Gambar 4.7). Hal ini semata-mata disebabkan N dalam tanah utamanya berasal dari proses perombakan bahan organik (selain proses fiksasi N oleh mikroba tanah). Menurut Fahmi dan Radjagukguk (2013), berdasarkan ketebalan gambut, gambut tebal memiliki kadar N-total yang lebih tinggi daripada gambut yang lebih tipis. Dilaporkan bahwa kandungan N-total tertinggi terdapat dalam lapisan gambut tebal (1,97 % pada gambut tebal, 1,47% pada gambut sedang, dan 1,08 pada gambut tipis). Hal ini berhubungan dengan derajat dekomposisi gambut tebal yang lebih rendah daripada gambut sedang dan tipis. Menurut Kurnain (2005), kandungan N-total gambut menurun dengan meningkatnya derajat dekomposisi gambut. Adapun menurut Cabezas et al. (2012), derajat dekomposisi gambut sangat berpengaruh pada pengembalian N bagi tanah.

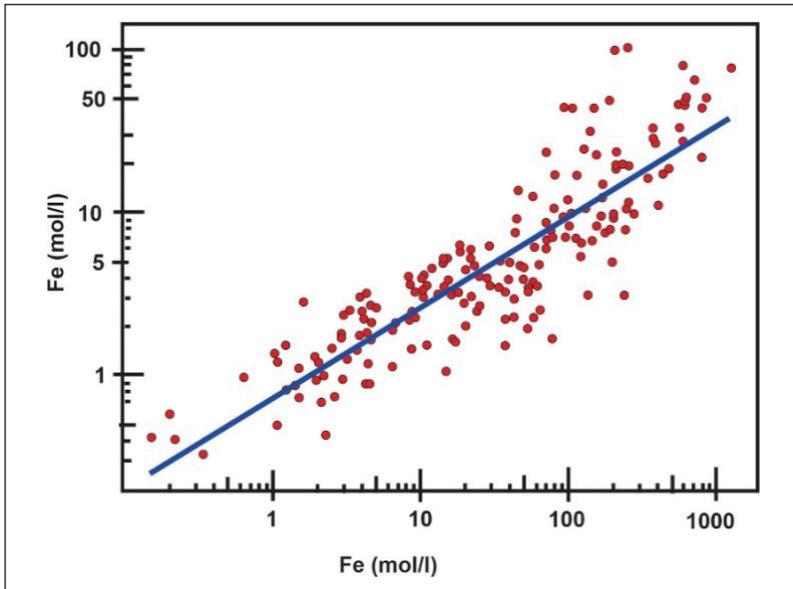
Perubahan kondisi hidrologis lahan sangat berpengaruh terhadap sifat biogeokimia tanah. Menurut Chimner et al. (2016), perubahan

tinggi muka air tanah gambut sebagai akibat campur tangan manusia dapat berdampak pada perubahan siklus C lebih dari 50 tahun. Turunnya muka air tanah menyebabkan meningkatnya kadar  $O_2$  dalam tanah gambut. Hal ini secara tidak langsung menyebabkan peningkatan laju proses dekomposisi 50 kali lipat dibandingkan kondisi anaerob (Clymo, 1983). Akibatnya, menurut Holden et al. (2004), turunnya muka air tanah atau kegiatan drainase lahan menyebabkan perubahan peran gambut dari sebagai “penyerap (*sinks*)” menjadi “sumber (*source*)” C. Penurunan muka air tanah meningkatkan proses mineralisasi sehingga terjadi pelepasan N dan P (Sundstrom et al., 2000). Pengamatan di lahan gambut pangkoh Kalimantan Tengah menunjukkan bahwa penurunan muka air tanah menyebabkan peningkatan kandungan N-total tanah. Kondisi ini berhubungan dengan peningkatan proses atau laju mineralisasi (Fahmi & Radjagukguk, 2013).

Secara spesifik, sifat ketersediaan P tanah rawa berbeda dengan tanah di lahan kering. Ketersediaan P di tanah rawa utamanya sangat dipengaruhi oleh tinggi muka air tanah atau kelembapan tanah. Secara umum, ketersediaan P di tanah gambut adalah rendah. Ketersediaan P akan meningkat pada tanah gambut yang mengalami fluktuasi genangan atau mengalami pembasahan kembali setelah kering (Jordan et al., 2007; Banach et al., 2009; Emsens et al., 2017). Menurut Graham et al. (2005), keseimbangan P dalam tanah gambut ditentukan oleh kondisi hidrologis lahan. Peningkatan ketersediaan P dalam tanah gambut akibat peningkatan kadar lengas tanah berhubungan dengan pengikatan P oleh Fe (Gambar 4.8 dan 4.9). Menurut Herndon et al. (2019), terdapat sekitar 48% P-anorganik yang terikat dengan Fe-oksihidrooksida dalam tanah gambut. Jumlah tersebut sangat potensial dilepaskan ke larutan tanah melalui proses reduksi Fe-oksihidrooksida. Hal ini diperkuat oleh hasil penelitian Kooijman et al. (2020) yang menunjukkan bahwa ketersediaan P dalam tanah gambut dapat dilihat dari kadar Fe-nya. Menurutnya, ada tiga alasan yang dapat menjelaskan mengapa gambut yang kaya Fe memiliki kadar P-tersedia yang tinggi, yaitu (1) gambut memiliki kapasitas

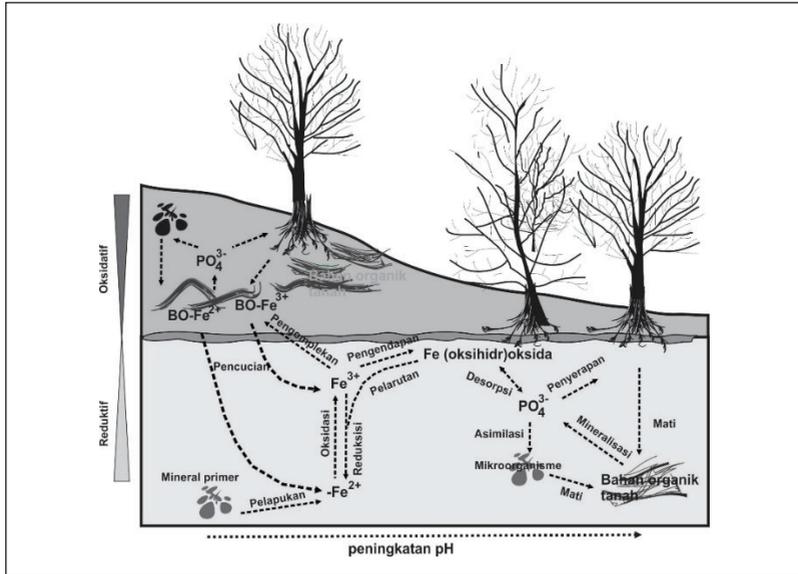
penyerapan P yang tinggi, (2) sifat jerapan P yang relatif lemah oleh kompleks Fe-OM, dan (3) jumlah P-organik terjerap tinggi yang mungkin terdiri dari P bersifat labil. Sebagian besar P di tanah gambut berbentuk organik, seperti phytat atau inositol hexakiphosphat, dengan jumlah yang mencapai 62%–65% (Cheesman et al., 2014).

Dijelaskan oleh Fahmi et al. (2014) dan Herndon et al. (2019), keberadaan Fe pada tanah gambut yang berpotensi mengikat P utamanya berasal dari tanah mineral yang berada di sekitar lahan gambut. Sebagian besar Fe dalam bentuk kompleks dengan bahan organik tercuci dari daerah yang tinggi (dengan pH rendah) dalam bentuk Fe-terlarut ke daerah yang lebih rendah (dengan pH lebih tinggi) membentuk Fe-oksihidroksida (mengendap). Mineral Fe-oksihidroksida ini berkompetisi dengan akar dan mikroorganisme untuk menyerap P hasil mineralisasi bahan organik (Herndon et al., 2019)



Sumber: Diolah dari Emsens et al. (2017)

**Gambar 4.8** Hubungan P dan Fe di Tanah Gambut



Sumber: Diolah Herndon et al. (2019)

**Gambar 4.9** Konsep Interaksi antara Fe dan P Berdasarkan Topografi Gambut

Selain ketersediaan P yang rendah, tanah gambut juga mengandung K, Mg, dan Ca yang rendah. Kejenuhan basa (Ca, Mg, K, dan Na) tanah gambut berkisar 5%–10%. Padahal secara umum, nilai kejenuhan basa yang diperlukan tanaman untuk dapat diserap berkisar 30% (Soepardi & Surowinoto, 1982).

Sebagai tanah marginal, tanah gambut juga memiliki kadar hara mikro yang rendah, khususnya Cu dan Zn. Hal ini disebabkan gambut memiliki kadar asam organik yang tinggi. Asam organik menyebabkan terbentuknya ikatan yang kuat dalam bentuk senyawa organo metalik. Dilaporkan oleh Sabiham et al. (1997) bahwa tingginya kadar asam fenolat pada tanah gambut menyebabkan defisiensi Cu.

Lahan gambut sebagai bagian dari lahan rawa memiliki sifat yang sangat dipengaruhi oleh kondisi hidrologis lahan. Fluktuasi muka air tanah memengaruhi konsentrasi dari unsur-unsur yang sangat sensitif terhadap perubahan redoks di tanah gambut, seperti Fe. Unsur Fe

Buku ini tidak diperjualbelikan.

yang terdapat dalam tanah gambut berasal dari tanah mineral yang berada di sekitar lahan gambut (Fahmi et al., 2014; Herndon et al., 2019). Konsentrasi ion H, Al, dan Fe pada gambut dengan substratum bahan sulfidik secara berturut-turut adalah 0,01–1 mg/l, 0–550 mg/l, dan 0–950 mg/l (Iyobe & Haraguchi, 2008). Konsentrasi Fe meningkat dengan penambahan ketebalan tanah pada lahan gambut (Kusel et al., 2008; Iyobe & Haraguchi, 2008). Pertambahan konsentrasi unsur mikro atau logam, seperti Fe, dapat terjadi karena adanya pencampuran dengan bahan mineral yang ada di bawah lapisan gambut (Driessen, 1978; Fahmi et al., 2010). Lahan gambut dengan substratum bahan sulfidik memiliki kecenderungan peningkatan konsentrasi ion H, Al, dan Fe dengan penurunan ketebalan lapisan gambut (Fahmi et al., 2010; 2012). Hal ini disebabkan unsur-unsur tersebut utamanya berasal dari lapisan bahan sulfidik yang bergerak ke lapisan gambut bersamaan dengan air tanah, baik dalam bentuk mineral maupun kompleks.

Secara umum, Fe yang berbentuk  $Fe^{2+}$  lebih dominan pada tanah-tanah yang reduktif dan bersifat lebih *mobile* dibandingkan yang berbentuk  $Fe^{3+}$ . Unsur ini dapat bergerak dalam tanah bersamaan dengan pergerakan air tanah (Tan, 2008). Besarnya fluktuasi muka air tanah yang dipengaruhi musim sangat menentukan distribusi dan konsentrasi Fe dalam profil tanah (Harmsen & Breemen, 1975). Kusel et al. (2008) melaporkan bahwa konsentrasi  $Fe^{2+}$  pada *topsoil* gambut saat teroksidasi lebih rendah daripada pengukuran yang dilakukan pada saat tereduksi. Selain itu, akibat kondisi kering dan pembasahan yang berulang serta pengaruh hantaran hidrolik yang besar mengakibatkan tingginya konsentrasi  $SO_4$  di larutan tanah tersebut.

Sebaliknya, jika tanah dalam kondisi relatif kering atau menurunnya muka air tanah baik akibat didrainase atau menurunnya curah hujan, konsentrasi Al dan  $Fe^{3+}$  mengalami peningkatan, yang mana dinamika perubahan tersebut juga sangat tergantung pada sifat gambut itu sendiri. Dinamika konsentrasi  $Fe^{2+}$ , Fe-organik, dan Fe-total pada musim hujan dan musim kemarau ditunjukkan oleh Fahmi dan Radjagukguk (2018) pada tanah gambut dengan substratum bahan sulfidik. Keberadaan bahan sulfidik di bawah lapisan gambut meng-

akibatkan pola konsentrasi Fe yang berbeda pada kondisi lazimnya (Tabel 4.3).

**Tabel 4.3** Konsentrasi dan Persentase Fe<sup>2+</sup>, Fe-organik, dan Fe-total yang Diamati pada Musim Hujan (MH) dan Musim Kemarau (MK)

Titik Contoh (cm)*	Musim Hujan					Musim Kemarau				
	Fe <sup>2+</sup>		Fe-org		Fe-tot	Fe <sup>2+</sup>		Fe-org		Fe-tot
	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg
-25	tu	0,00	970	69,85	1.389	tu	0,00	1.696	71,56	2.370
-50	tu	0,00	521	34,65	1.504	tu	0,00	844	75,57	1.117
-70	tu	0,00	255	43,82	582	tu	0,00	288	14,49	1.991
-90	tu	0,00	233	25,78	865	14	0,64	875	40,40	2.166
-110	103	4,43	1.810	77,78	2327	54	1,97	1.514	55,16	2.745

Keterangan: tu = tidak terukur, \* = Dari permukaan tanah

Sumber: Fahmi & Radjaguguk (2018)

### c. Karbon

Kandungan atau kadar C dalam tanah adalah salah satu parameter kunci yang menentukan apakah suatu tanah termasuk dalam kategori tanah gambut atau tanah mineral. Secara sederhana, ketika kadar C-organik  $\geq 12\%$  (jika fraksi mineral tidak mengandung klei), atau  $18\%$  C-organik (jika fraksi mineral mengandung  $60\%$  fraksi klei), jika dalam kondisi jenuh air  $\geq 30$  hari kumulatif dalam setahun, atau mengandung C-organik sebesar  $20\%$  jika dalam kondisi jenuh air  $< 30$  hari kumulatif dalam setahun, tanah tersebut masuk dalam kategori tanah gambut (Soil Survey Staff, 2022).

Setidaknya, terkandung C dalam tanah gambut tropika sebanyak  $50\text{--}105$  Gt atau setara dengan  $15\text{--}19\%$  stok C dari lahan gambut yang ada di seluruh dunia (Page et al. 2011; Dargie et al. 2017). Menurut Agus et al. (2011), Indonesia memiliki sekitar  $20\text{--}30$  Gt stok C di bawah permukaan tanah dari  $15$  juta ha lahan gambutnya. Lebih detail, dilaporkan bahwa setiap  $1$  m lapisan gambut menyimpan C

antara 400–700 t/ha (Noor et al., 2014). Sejatinya, lahan gambut dari hutan alami berperan sebagai penyerap C dengan laju penyerapan berkisar 0–3 mm/th yang berasal dari batang atau cabang pohon yang mati dan kemudian terdekomposisi secara perlahan. Akan tetapi, ketika terjadi alih fungsi lahan, kebakaran, didrainase, ataupun aktivitas pertanian, seperti pemupukan, lahan gambut dapat berubah menjadi sumber emisi C.

Kandungan C-organik biasanya melebihi 50%, (Kurnain et al., 2001; Melling et al., 2008). Sabiham dan Ismangun (1997) menyebutkan bahwa kandungan rata-rata C-organik pada tanah gambut sebesar 57,23%. Kadar C-organik dalam tanah gambut dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain derajat dekomposisi gambut, ketebalan, penggunaan lahan, dan kadar abu. Gambut fibrik mempunyai kadar C-organik 53,6% dan gambut safrik mengandung C-organik 48,9% (Agus et al. 2011). Pada perkebunan sawit dengan fisiografi lahan gambut pantai, kandungan C-organik berkisar antara 15,49%–32,42%. Pada lahan gambut transisi, kandungan C-organik berkisar antara 11,57%–56,95%. Adapun pada hutan rawa gambut, kandungan C-organiknya 0,87%. Wust et al. (2003) melaporkan bahwa makin tinggi kadar abu gambut, kadar C-nya menurun secara linear.

#### **d. Kapasitas Tukar Kation**

Sumber muatan negatif tanah adalah bahan organik dan mineral klei. Gambut memiliki kandungan senyawa organik yang sangat tinggi. Seybold et al. (2005) serta Gruba dan Mulder (2015) menyatakan bahwa besarnya kapasitas tukar kation (KTK) tanah gambut terkait dengan kadar C-organiknya. Nilai KTK tanah gambut tergolong tinggi, tetapi kejenuhan basanya (KB) rendah. KTK tanah gambut berkisar dari <50 sampai >100 cmol/kg. Nilai KTK gambut Kalimantan dilaporkan oleh Salampak (1999) mencapai 174 cmol/kg dan 150 cmol/kg oleh Fahmi (2012). Meskipun demikian, nilai KTK yang tinggi pada lahan gambut tidak menggambarkan tingkat kesuburannya karena kandungan kation basa tanah gambut tergolong rendah yang mengakibatkan nilai kejenuhan basa gambut rendah.

Sifat *variable charge* dari tanah gambut dapat menyebabkan terjadinya bias pada saat pengukuran KTK dengan metode ekstraksi ( $\text{NH}_4$ -asetat dengan pH 7).

#### e. Kadar Abu

Kadar abu dalam tanah gambut adalah gambaran persentase kandungan mineral yang terkandung dalam tanah gambut. Kadar abu sering dihubungkan dengan tingkat kesuburan tanah gambut. Makin tinggi kadar mineralnya, makin tinggi pula tingkat kesuburannya, walaupun tidak selalu demikian karena tentunya sangat tergantung pada jenis dan kualitasnya. Kandungan abu pada gambut dari daerah tropika dapat berkisar antara <1% sampai >65% (Rieley et al., 1996). Sabiham dan Ismangun (1997) melaporkan kadar abu pada lahan gambut di Kalimantan Tengah sebesar 0,94% dan di Sumatra Selatan sebesar 5,1%.

Kadar abu dipengaruhi oleh derajat dekomposisi gambut serta tipe fisiografi lahan dan ketebalannya. Makin gambut terdekomposisi, kadar abunya juga makin rendah (Sajarwan, 2007; Suwondo et al., 2012; Fahmi et al., 2019). Gambut safrik memiliki kadar abu 12,04%, gambut hemik mempunyai kadar abu 8,04%, sedangkan gambut fibrik mempunyai kadar abu 3,09% (Setiawan, 1991). Suwondo et al. (2012) melaporkan bahwa kadar abu dari lahan gambut pantai di Sumatra berkisar antara 43,98%–73,23%, sedangkan kadar abu pada lahan gambut transisi berkisar antara 15%–80%.

Kadar abu yang terkandung dalam tanah gambut dapat berasal dari lahan gambut itu sendiri maupun dari luar lingkungan lahan gambut yang terbawa bersama aliran air tanah ataupun dari hujan dan debu. Gambut topogen diketahui memiliki kadar abu yang lebih tinggi daripada gambut ombrogen. Tingginya kadar abu gambut topogen karena adanya suplai mineral dari luar lingkungan lahan gambut. Lebih lanjut, kadar abu dalam gambut sendiri diklasifikasikan menjadi sangat rendah (0%–5%), rendah (5%–15%), sedang (15%–25%), tinggi (25%–40%), dan sangat tinggi (40%–55%) (Wust et al., 2003).

## f. Daya Hantar Listrik

Nilai daya hantar listrik (DHL) atau *electrical conductivity* (EC) lahan gambut dipengaruhi oleh banyak faktor, antara lain kadar lengas gambut dan tipe penggunaan lahan. Kurnain (2005) melaporkan bahwa nilai DHL hutan gambut alami adalah 0,056 mS/cm dan DHL dari lahan gambut yang digunakan untuk pertanian adalah 0,085 mS/cm. Selain itu, nilai DHL gambut juga dipengaruhi oleh kondisi fisiografinya, di mana menurut Kurnain et al. (2001), DHL gambut pedalaman berkisar dari 40–100 mS/cm, sedangkan DHL gambut pantai berkisar 140–320 mS/cm (Suryanto, 1994).

Nilai DHL gambut juga dipengaruhi oleh kadar lengas gambut. Menurut Ponziani et al. (2011), terdapat hubungan yang erat antara kadar lengas tanah gambut dan konduktivitasnya. Fahmi et al. (2019) melaporkan bahwa adanya peningkatan nilai DHL gambut saat terjadinya penurunan muka air tanah, bahkan nilai DHL tertinggi (1,400 mS/cm) terjadi pada saat muka air tanah berada pada titik terendah. Kondisi tanah yang lebih kering menyebabkan peningkatan kejenuhan dan konsentrasi ion-ion terlarut dalam tanah. Fraser et al. (2001) menyimpulkan bahwa pentingnya peranan pergerakan air secara vertikal terhadap besaran dan sebaran ion di lahan gambut.

## 2. Sifat Fisika Tanah Gambut

Gambut di daerah tropika terbentuk utamanya dari bahan tumbuhan yang berkayu (Rieley et al., 2008) dalam bentuk batang pohon, ranting, dan akar kasar yang relatif masih menunjukkan ciri tumbuhan aslinya. Seperti dijelaskan sebelumnya, sifat-sifat tanah gambut adalah hasil interaksi dari banyak faktor. Beberapa sifat fisika tanah gambut yang khas menunjukkan kondisi fisika tanah gambut secara khusus, seperti warna, kadar lengas, sifat kering tak balik, berat volume atau *bulk density* (BD), porositas, kadar serat, dan daya dukung.

### a. Warna Tanah

Sebagai tanah yang berasal dari bahan organik, warna tanah gambut didominasi oleh warna gelap. Tanah gambut berwarna coklat tua

hingga kehitaman sehingga bersifat menyerap panas. Intensitas warna hitamnya berkorelasi dengan derajat dekomposisi gambut dan kandungan asam humat. Makin hitam warna gambut menunjukkan bahwa gambut makin dekomposisi dan makin tinggi kandungan asam humatnya (Andriesse, 1988).

### **b. Daya Retensi dan Kadar Lengas**

Sifat fisika yang khas sebagai karakteristik tanah gambut adalah kemampuan tanah gambut untuk menyimpan/meretensi air (*water holding capacity*). Kapasitas gambut dalam mengikat air sangat besar (Pirkonen et al., 1985). Daya retensi gambut berkisar antara 200%–1000% berdasarkan berat atau 50%–90% berdasarkan volume (Andriesse, 1988). Bahkan, menurut Verry et al. (2011), berdasarkan berat, daya retensi gambut dapat mencapai 300%–3000%. Berdasarkan jumlah air dibandingkan jumlah bahan padatan saat gambut kering, air di dalam matriks gambut berupa air bebas, air kapiler dan air sel, serta air koloid dan air yang diikat secara kimia. Air dijerap pada bahan padatan oleh gugus polar dengan gugus utamanya adalah gugus karboksilik. Air ini berhubungan erat terhadap sifat kembang kerut gambut. Air kapiler dan air sel diikat oleh pori-pori kapiler dan struktur sel.

Tingginya kapasitas gambut meretensi air tidak berarti bahwa gambut mampu menyediakan air untuk tanaman lebih besar dibanding dengan tanah mineral. Hal tersebut disebabkan perhitungannya berdasarkan bobot kering gambut. Walaupun demikian, adanya sifat ini menjadikan gambut memiliki peranan yang penting dalam siklus hidrologi bagi lingkungan sekitarnya. Kemampuan tanah gambut untuk meretensi air sangat dipengaruhi oleh derajat dekomposisinya, kadar abu, dan kedalaman muka air tanah (Boelter, 1969; Rieley et al., 1996; Wust et al., 2003). Gambut fibrik mampu menyimpan air (berdasarkan berat) antara 580%–3000%, gambut yang lebih matang, seperti hemik, mampu menyimpan 450%–850%, sedangkan saprik hanya menyimpan antara <450% (Notohadiprawiro, 1985). Hal ini tentunya dengan asumsi bahwa seluruh lapisan tanah dengan perbedaan derajat dekomposisi tersebut pada kondisi terjenuhi air atau lapisan-lapisan

tersebut berada di bawah muka air tanah (*catotelm*). Retensi gambut terhadap air dipengaruhi oleh jaraknya terhadap muka air tanah. Hasil penelitian Nurrudin et al. (2006) menunjukkan bahwa kadar lengas gambut meningkat seiring dengan peningkatan kedalamannya dari permukaan tanah, yakni pada kedalaman 0 cm, 50 cm, dan 100 cm dari permukaan tanah berturut-turut adalah 577%, 891%, dan 1070%.

Kadar lengas atau kadar air adalah persentase jumlah air yang terkandung di dalam matriks tanah. Air ditahan oleh fase padatan tanah dengan gaya matriks, osmosis, serta kapiler. Menurut Volarovich dan Churaev (dalam Andriesse, 1988), kadar lengas gambut dapat dibagi dalam tiga kategori, yaitu lengas yang terikat secara fisika dan kimia (*physically and chemically bound water*), lengas kapiler (*capillary and film water*), dan lengas yang terimobilisasi (*immobilized water*).

Tanah gambut memiliki daya retensi air yang sangat besar, tetapi hanya sebagian kecil air yang tersedia bagi tumbuhan, sedangkan sejumlah besar lainnya berupa air gravitasi dan air yang terikat kuat dengan senyawa organik (Uomori & Yamaguchi, 1997). Dalam hubungannya dengan pertumbuhan tanaman, dikenal istilah volume air yang mudah tersedia (*easily available water*) yang berada pada potensial matriks -1 sampai -5 kPa dan air yang tersedia secara potensial berkisar dari -5 sampai -10 kPa (Verdonk et al., 1973).

### c. Kering Tak Balik

Sifat rapuh (*fragile*) yang melekat pada tanah gambut menyebabkan pemanfaatan dan pengelolaannya harus sangat hati-hati. Hal ini karena tidak hanya wilayah sekitar lahan yang menerima dampak dari kerusakannya, tetapi seluruh wilayah di muka bumi secara tidak langsung juga menerima dampaknya. Ketika gambut mengalami drainase secara berlebihan sehingga sifatnya menjadi kering tak balik, tanah gambut menjadi sangat rentan mengalami kebakaran. Kondisi ini dapat menyebabkan polusi udara yang dapat saja terbawa oleh angin sehingga menjadi bencana yang luas. Selain itu, kebakaran lahan gambut ataupun proses dekomposisi yang meningkat akibat gambut makin aerob telah meningkatkan emisi gas rumah kaca sehingga

mendorong percepatan perubahan iklim global dengan ditandai naiknya suhu permukaan bumi (Nelson et al., 2021; Krisnawati et al., 2021). Tanah gambut mempunyai sifat kering tak balik (*irreversible drying*). Artinya, bila tanah gambut telah mengalami kekeringan dengan kadar lengas tertentu, gambut tidak bisa basah kembali ketika kontak dengan air. Dalam keadaan tersebut, partikel gambut berbentuk *pseudo sand* (menyerupai pasir). Gambut yang telah bersifat kering tak balik dikenal juga sebagai gambut yang hidrofobik, yaitu suatu kondisi di mana partikel tanah gambut tidak dapat lagi meretensi (memegang) air (Valat et al., 1991).

Sifat hidrofobik dapat terjadi pada gambut karena teroksidasi, terbakar, ataupun mengalami kekeringan. Kadar lengas pada saat munculnya sifat hidrofobik tanah gambut dipengaruhi derajat dekomposisinya. Masganti et al. (2002) melaporkan bahwa sifat hidrofobik gambut hemik dapat muncul pada kadar lengas 73% dan 55% untuk gambut saprik dari berat keringnya. Sifat hidrofobik gambut berhubungan dengan sifat gambut lainnya, seperti kadar lengas, kadar abu, dan kandungan lignin, selulosa, hemiselulosa, kemasaman N-total, gugus fungsional, serta kandungan asam humat dalam gambut (Salmah et al., 1992; Utami, 2010).

Sifat hidrofobik tanah gambut muncul disebabkan koloid-koloid gambut yang diselimuti oleh senyawa hidrokarbon aromatik. Hal ini menyebabkan berkurangnya daya kohesi antara partikel/koloid tanah dan molekul air (Valat et al., 1991). Menurut Sabiham (2000) dan Utami (2010), munculnya sifat hidrofobik berkaitan erat dengan berkurangnya gugus karboksilat dan OH-fenolat yang memiliki sifat hidrofilik (Stevenson, 1994). Gambut memiliki gugus polar dan nonpolar dalam jumlah yang banyak. Gugus nonpolar yang memiliki susunan struktur alifatik akan cenderung bersatu dengan yang lainnya (bersifat hidrofobik). Makin panjang rantai yang terbentuk, daya retensi gambut terhadap air makin berkurang atau makin hidrofobik (Taufik, 1997). Secara lebih detail, Valat et al. (1991) menyatakan bahwa sifat hidrofobik tanah gambut disebabkan oleh beberapa hal sebagai berikut.

- 1) Kandungan asam humat yang banyak terdapat dalam gambut secara alami menunjukkan sifat hidrofobik karena partikel-partikel diselaputi oleh lilin.
- 2) Meningkatnya gugus nonpolar, seperti etil, metil, dan senyawa aromatik yang bersifat hidrofobik, sementara gugus yang bersifat hidrofilik berkurang.
- 3) Penyerapan senyawa bersifat hidrofobik, seperti minyak, lemak, dan fraksi N-organik pada permukaan fraksi humat.

#### d. Mengembang dan Mengerut

Kebanyakan tanah organik akan mengerut (*shrinking*) ketika kering dan mengembang (*swelling*) ketika basah. Hal ini disebabkan sifat mengembang dan mengerut terkait erat dengan keberadaan air dalam matriks gambut. Jika diasumsikan bahwa pengerutan hanya disebabkan oleh menurunnya kadar air, sifat mengerut dapat dinyatakan sebagai volume spesifik (McLay et al., 1992) dan volume spesifik tanah gambut menurun ketika kadar air tanah gambut berkurang. Menurut Holden et al. (2004), sifat mengerut gambut muncul ketika tanah didrainase. Sifat mengerut merupakan suatu petunjuk penting untuk menduga terjadinya penipisan lapisan gambut (*amblesan*) (Andriessse, 1988; McLay et al., 1992). Bahan gambut saprik dapat mengerut  $\geq 70\%$  setelah dipanaskan pada suhu  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Nugroho et al., 1997). Sifat mengerut gambut menurun dengan meningkatnya berat volume (Andriessse, 1988) dan menurunnya kadar lengas tanah gambut (McLay et al., 1992).

#### e. Berat Volume

Berat volume (BV) atau berat isi atau *bulk density* (BD) adalah salah satu sifat fisika tanah gambut yang paling penting. Sifat ini biasanya berhubungan dengan berat jenis butiran, porositas, dan daya dukung gambut (Tabel 4.4). Berat volume gambut lebih rendah jika dibanding dengan tanah mineral, berat volume tanah gambut tropika ( $0,07\text{--}0,3\text{ kg/dm}^3$ ) umumnya lebih rendah daripada tanah gambut nontropika ( $0,3\text{--}0,8\text{ kg/dm}^3$ ) (Cheesman et al., 2012) dan biasanya berkurang dengan pertambahan kedalaman tanah (Driessen & Rochimah, 1976;

Radjagukguk, 1993; Rieley et al., 1996). Berat volume yang tinggi dijumpai di bagian tepi kubah karena adanya pencampuran klei (Radjagukguk, 1997). Berat volume gambut fibrik/hemik bervariasi antara 0,06–0,15 g/cm<sup>3</sup>, sedangkan hemik/saprik antara 0,10–0,30 g/cm<sup>3</sup> (Suhardjo & Driessen, dalam Widjaja-Adhi, 1991).

**Tabel 4.4** Nilai BV Berdasarkan Derajat Dekomposisi Gambut dari Kalimantan

Derajat Dekomposisi Gambut	Nilai BV (kg/dm <sup>3</sup> )
Fibrik	0,11–0,19
Hemik	0,20–0,24
Saprik	0,25–0,29

Sumber: Wahyunto et al. (2005)

Berat volume juga dipengaruhi oleh sifat penggunaan lahan. Gambut alami mempunyai BV 0,13 g/m<sup>3</sup>, gambut yang telah didrainase mempunyai BV 0,17–0,4 g/cm<sup>3</sup>, sedangkan lahan gambut yang telah dibuka memiliki BV 0,20 g/m<sup>3</sup> (Kononen et al., 2015).

Selain itu, BV gambut dipengaruhi juga oleh derajat dekomposisinya. BV gambut cenderung meningkat seiring dengan meningkatnya derajat dekomposisi gambut (Oleszczuk & Truba, 2013). Menurut Brady (1974) serta Bouman dan Driessen (1985), gambut fibrik memiliki BV <0,1 kg/dm<sup>3</sup>, sedangkan gambut saprik memiliki BV antara 0,2 dan 0,3 kg/dm<sup>3</sup>.

## f. Porositas

Porositas total tanah gambut berkisar antara 70%–95% (Radjagukguk, 1993; Notohadiprawiro, 1997; Nugroho et al., 1997). Meskipun tanah gambut memiliki porositas total tinggi, sebagian besar pori-porinya berdiameter sangat kecil. Porositas gambut menurun seiring dengan pertambahan derajat dekomposisi gambut (Oleszczuk & Truba, 2013). Porositas dan distribusi ukuran pori menentukan daya retensi air oleh gambut. Peningkatan derajat dekomposisi akan menurunkan ukuran partikel gambut sehingga makin luas permukaannya. Hal ini akan meningkatkan daya kohesi dan selanjutnya, ruang pori akan menjadi lebih sedikit (porositas total menurun).

### g. Daya Dukung

Daya dukung (*bearing capacity*) adalah sifat gambut yang menggambarkan kemampuan gambut untuk mendukung tegak atau berdirinya suatu benda di tanah gambut. Gambut memiliki daya sangga yang rendah. Akibatnya, pohon yang tumbuh di atas lahan gambut menjadi mudah rebah (Gambar 4.10). Rendahnya daya dukung akan menjadi masalah dalam pembuatan saluran irigasi, jalan, pemukiman, dan pencetakan sawah, kecuali pada tanah gambut dengan kedalaman kurang dari 75 cm. Sifat daya dukung berhubungan dengan sifat gambut lainnya. Berat volume yang rendah mengakibatkan daya dukung tanah gambut makin rendah sehingga menyebabkan pengelolaan tanah secara mekanis sulit dilakukan dan tanaman yang dibudidayakan mengalami kesulitan untuk berdiri tegak. Daya dukung yang rendah disebabkan ruang pori yang besar sehingga kerapatan tanahnya rendah dan bobotnya ringan. Ruang pori total gambut fibrik/hemik adalah 86%–91% (volume), sedangkan gambut hemik/saprik 88%–92 % (Suhardjo & Driessen, 1977).



Foto: Arifin Fahmi (2022)

**Gambar 4.10** Pohon Kelapa Sawit yang Tidak Mampu Berdiri Tegak karena Rendahnya Daya Dukung Tanah Gambut

### 3. Sifat Biologi Tanah Gambut

Lahan gambut terbentuk akibat laju akumulasi bahan organik lebih besar daripada laju dekomposisinya. Diperkirakan laju akumulasi gambut di daerah tropika berkisar antara 1–10 mm/th (Sorensen, 1993; Maas, 1996), 0,6–2,7 mm/th (Jaenicke, 2010), atau 2,5–4,5 mm/th (UNDP, 2006).

Lahan gambut merupakan salah satu sumber C terbesar di alam. Setiap waktu tidak terhitung jumlah C yang dilepaskan ke udara maupun ke perairan bebas dalam bentuk terlarut. Banyak peneliti yang menghubungkan tingkat kerusakan lahan gambut dengan komposisi struktur komunitas dan keberlimpahan mikroorganisme. Dipersepsikan bahwa makin rusak lahan gambut, maka komposisi struktur komunitas dan keberlimpahan mikroorganisme makin rendah. Selanjutnya, komposisi struktur komunitas dan keberlimpahan mikroorganisme dihubungkan pula dengan kesuburan tanah, heterogenitas vegetasi, dan emisi C. Menurut Andersen et al. (2013), terdapat perbedaan proses transformasi hara tanah dan aktivitas mikroorganisme dari lahan gambut alami dan lahan gambut yang telah direstorasi. Pada lahan gambut alami, terdapat keseimbangan antara konsumsi dan produksi gas  $\text{CH}_4$ , bahkan cenderung memiliki neraca C yang positif (Vile et al., 2014).

Proses pelepasan C dari lahan gambut sebenarnya tidak bisa dipisahkan dengan proses perombakan material organik yang dilakukan oleh mikroorganisme dalam tanah gambut. Di sisi lain, setiap proses biologi ataupun kimiawi di dalam tanah gambut sangat erat berkaitan dengan kondisi hidrologis lahan dan kondisi vegetasi di atasnya. Turunnya muka air tanah akan menyebabkan kondisi yang lebih aerob. Lebih jauh, perbedaan tinggi muka air tanah memacu percepatan proses dekomposisi dan mineralisasi (Dijk et al., 2009; Hicks et al., 2009; Kaczorek et al., 2009). Chimner et al. (2016) melaporkan bahwa emisi C saat lahan gambut kering lebih tinggi daripada saat basah. Macrae et al. (2013) dan Könönen et al. (2015) juga melaporkan bahwa adanya perubahan kondisi air tanah yang menyebabkan perbedaan hasil dari suatu proses dekomposisi sehingga berdampak pada kelarut-

an hara tanah. Hal-hal tersebut berkaitan dengan ketersediaan dan peran  $O_2$  sebagai elektron akseptor yang paling efisien dalam suatu proses oksidasi bahan organik oleh mikroorganisme. Makin terbatas ketersediaan  $O_2$ , makin lambat laju dekomposisi atau mineralisasi sehingga laju mineralisasi akan menurun seiring dengan bertambahnya kedalaman tanah (Andersen et al., 2013).

Proses dekomposisi bahan organik diawali dengan adanya aktivitas jamur dan bakteri anaerob merombak organik polimer (selulosa, hemiselulosa, dan protein) menjadi monomer (gula dan asam amino). Lebih lanjut, monomer tersebut difermentasi menjadi asetat, asam lemak, alkohol,  $CO_2$ , dan  $H_2$ . Selanjutnya, bakteri sintropi, asam lemak, dan alkohol difermentasikan menjadi asetat,  $CO_2$ , dan  $H_2$ . Bersamaan dengan proses tersebut,  $H_2$  yang dihasilkan langsung dikonsumsi oleh methanogen hidrogenotropik sehingga proses fermentasi menjadi efisien. Acetogen memproduksi asetat dari monomer atau dari  $CO_2$  dan  $H_2$  yang dihasilkan dari bakteri sintropi. Asetat,  $CO_2$ , dan  $H_2$  dari proses fermentasi serta acetogenik adalah substrat terminal elektron bagi dekomposer untuk menghasilkan gas metan. Gas metan yang dihasilkan dari lapisan gambut yang anaerob kemudian akan dioksidasi menjadi  $CO_2$  pada lapisan tanah yang aerob. Menurut Frenzel dan Karofeld (2000) serta Pearce dan Clymo (2001), 90% dari metan yang dihasilkan dari lapisan anaerob dioksidasi menjadi  $CO_2$ .

Faktor lain yang memengaruhi proses dekomposisi/mineralisasi bahan organik di lahan gambut adalah kualitas substrat/bahan organik. Setiap tahapan dari proses dekomposisi bahan organik memerlukan mikroorganisme spesifik sesuai kondisi substrat dan lingkungannya. Makin heterogen dan berkualitas suatu substrat, mikroorganisme akan makin berlimpah. Menurut Dimitriu et al. (2010), komposisi struktur komunitas dan keberlimpahan mikroorganisme di lahan gambut dipengaruhi oleh jenis gambut karena hal tersebut akan menentukan ketersediaan hara dalam tanah (Dijk et al., 2009). Makin lanjut derajat dekomposisi gambut, kandungan substratnya makin rendah sehingga aktivitas mikroorganisme makin terbatas.

Ketebalan lapisan gambut tidak hanya berpengaruh pada sifat kimia tanah gambut, baik secara langsung ataupun tidak langsung, tetapi juga berpengaruh terhadap aktivitas, komposisi struktur komunitas, dan keberlimpahan mikroorganismenya. Secara umum, gambut tebal dinyatakan memiliki derajat dekomposisi yang lebih rendah daripada gambut dangkal (Radjagukguk, 1992). Di sisi lain, makin lanjut derajat dekomposisi, gambut juga makin miskin hara dan cenderung makin masam sehingga akan membatasi aktivitas mikroorganismenya. Walaupun demikian, aktivitas, komposisi struktur komunitas, dan keberlimpahan mikroorganismenya pada setiap lahan gambut dengan ketebalan yang berbeda-beda akan memiliki pola yang seragam, yaitu tinggi pada lapisan teratas dan kemudian berangsur menurun pada lapisan di bawahnya, sebagaimana dilaporkan oleh Asante dan Jengre (2012) serta Andersen et al. (2013). Hal ini terjadi karena pada lapisan gambut teratas secara terus-menerus selalu ditambahkan substrat baru sebagai sisa jaringan organisme yang dapat menjadi sumber energi. Akibatnya, aktivitas dekomposisi juga lebih aktif pada lapisan ini. Makin subur atau makin kaya akan unsur hara pada lapisan atas, maka hal tersebut juga akan memengaruhi tingkat ketersediaan hara di lapisan bawahnya (Nwaishi, 2016). Kemudian, sebagian dari hasil dekomposisi substrat tersebut akan mengalami *transfortasi* ke lapisan bawahnya dengan jumlah yang makin rendah seiring bertambahnya jarak dari lapisan permukaan (Fahmi et al., 2013).



## Bab 5

# Pengelolaan Tanah Sulfat Masam

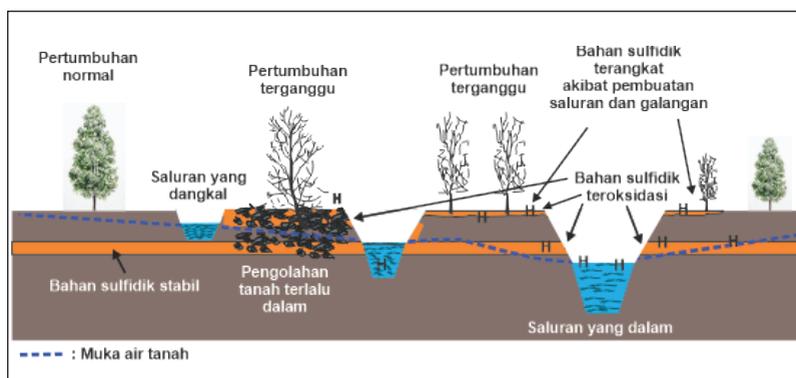
Program keamanan pangan menjadi perhatian khusus dari banyak negara di dunia, khususnya dalam beberapa tahun terakhir karena ancaman akan kekurangan pangan telah membayangi banyak negara, terutama negara-negara yang memiliki pertumbuhan penduduk yang tinggi. Produksi tanaman pangan ditingkatkan melalui perluasan area pertanian dan salah satu lahan yang dipandang berpotensi menjadi lahan pertanian adalah tanah sulfat masam. Walaupun demikian, pembahasan tentang pengelolaan tanah sulfat masam yang dimaksudkan dalam bab ini utamanya ditujukan untuk pengelolaan tanah-tanah sulfat masam secara luas dengan tetap memperhatikan kelestarian lingkungan.

Reklamasi atau pembukaan tanah sulfat masam untuk lahan pertanian tidak selalu dapat disamakan dengan reklamasi pada jenis tanah lainnya. Kata reklamasi berasal dari kamus bahasa Inggris, yaitu *'to reclaim'*, yang berarti memperbaiki sesuatu yang telah rusak (*means to repair something that has been damaged*). Pengertian reklamasi lahan dalam perspektif tanah sulfat masam adalah pembukaan atau

pemanfaatan tanah sulfat masam, termasuk di dalamnya pengetahuan pengelolaan lahan dan pengelolaan air untuk tujuan memperbaiki fungsi lahan, seperti produktivitas lahan. Reklamasi tanah sulfat masam harus dilakukan secara hati-hati dengan memperhatikan kaidah reklamasi lahan yang tepat. Sejarah telah membuktikan bahwa pada tahap awal reklamasi tanah sulfat masam untuk kegiatan pertanian yang tidak mengikuti kaidah pengelolaan tanah sulfat masam secara benar akan berdampak pada menurunnya kualitas lingkungan sehingga bukan peningkatan produktivitas lahan yang didapat, melainkan sebaliknya. Anda et al. (2009) melaporkan bahwa reklamasi tanah sulfat masam menyebabkan penurunan pH tanah, peningkatan kejenuhan Al, dan menurunnya kandungan kation-kation basa dalam tanah. Sebelumnya, Cook et al. (2000) melaporkan bahwa telah terjadi pelarutan dan pelepasan kemasaman dan logam berat ke perairan bebas setelah tanah sulfat masam dikeringkan dan kemudian diikuti penggenangan. Selama penggenangan,  $Fe^{3+}$  direduksi menjadi  $Fe^{2+}$  sehingga menyebabkan peningkatan pH tanah.

Sejatinya, tanah sulfat masam yang baru dibuka atau direklamasi sangat rentan mengalami kegagalan untuk ditanami atau dimanfaatkan untuk lahan pertanian. Diperlukan waktu yang cukup panjang agar lahan kembali menjadi produktif. Hal ini disebabkan kondisi kualitas lahan yang masih sangat buruk, seperti pH yang sangat masam, rendahnya ketersediaan hara, dan tingginya kelarutan unsur meracun. Bahan sulfidik pada tanah bukaan baru mengalami oksidasi, anasir negatif mengalami proses pelarutan, dan terlepas ke larutan tanah. Ketika sistem irigasi dan drainase dibuat, bahan sulfidik mulai teroksidasi sehingga kemasaman tanah dan air meningkat serta unsur-unsur yang bersifat racun meningkat kelarutannya (Konsten et al., 1990). Diperlukan upaya pencucian atau pelindian anasir negatif tersebut dari lahan, serta aplikasi amelioran untuk memperbaiki kesuburan tanah. Proses pencucian dapat berlangsung lama dan tentunya sangat tergantung pada intensitas pencucian, kualitas air pembilas, konsentrasi anasir, dan adanya upaya ameliorasi.

Secara umum, permasalahan utama bagi usaha pertanian di tanah sulfat masam adalah kemasaman yang tinggi dan tingginya kadar unsur yang dapat meracuni tanaman, seperti Al, Fe, dan  $\text{SO}_4$ . Kemasaman tanah yang muncul di tanah sulfat masam utamanya disebabkan oleh teroksidasinya bahan sulfidik akibat turunnya muka air tanah. Hal ini dapat terjadi akibat adanya cara pembukaan atau reklamasi lahan yang tidak tepat, seperti pembuatan saluran yang terlalu dalam ataupun pengolahan tanah yang menyebabkan lapisan bahan sulfidik berinteraksi langsung dengan  $\text{O}_2$  (Gambar 5.1).



**Gambar 5.1** Ilustrasi Oksidasi Bahan Sulfidik Menghasilkan Kemasaman (Ion  $\text{H}^+$ ) Akibat Pembuatan Saluran Drainase dan Cara Pengolahan Tanah yang Tidak Tepat

Oksidasi bahan sulfidik hanya dapat dihentikan dengan cara menghentikan suplai  $\text{O}_2$ , yaitu dengan cara menggenangi atau menutupinya. Breemen (1993) mengemukakan bahwa satu-satunya cara pasti untuk mengurangi oksidasi bahan sulfidik adalah dengan memotong pasokan  $\text{O}_2$ , yaitu melalui penggenangan. Adapun upaya menghambat oksidasi menggunakan bakterisida atau ligan yang mengkhelat Fe tentu saja tidak layak dilakukan pada usaha pertanian karena terlalu mahal (Pulford et al., 1988). Upaya menghambat oksidasi bahan sulfidik oleh  $\text{Fe}^{3+}$  dapat diusahakan dengan memperlambat laju produksi  $\text{Fe}^{3+}$ , yaitu pemberian bakteri *Thiobacillus ferrooxidans* dan amelioran yang mengkompleks  $\text{Fe}^{3+}$ , tetapi hal ini juga cukup sulit

dilakukan jika kondisi tanah sudah sangat masam. Menurut Beers (1962), cara terbaik untuk mencegah pemasaman akibat teroksidasinya bahan sulfidik adalah mempertahankan lapisan tanah yang mengandung bahan sulfidik tetap berada di bawah muka air tanah. Hal ini berarti untuk mengatasi masalah kemasaman di tanah sulfat masam adalah dengan mencegah, mengurangi, atau menghentikan teroksidasinya bahan sulfidik. Hicks et al. (1999) berpendapat bahwa prinsip dasar untuk mengurangi dampak negatif akibat oksidasi bahan sulfidik adalah dengan (1) mengurangi terjadinya oksidasi bahan sulfidik, (2) menetralisasi anasir negatif, dan (3) mencuci kemasaman hasil dari oksidasi bahan sulfidik yang telah terjadi.

Tanah sulfat masam adalah tanah yang mengandung Fe sulfida dan/atau senyawa hasil oksidasinya (mineral  $Fe^{3+}$  sekunder) (Pons, 1973; Bloomfield & Coulter, 1974; Dent, 1986; Dent & Pons, 1995). Mineral tersebut berpotensi menjadi sumber kemasaman bagi tanah yang dapat berdampak negatif bagi usaha pertanian, perikanan, dan lingkungan. Berdasarkan perspektif lingkungan, sebaiknya tanah sulfat masam tidak diusik (*undisturb*) untuk tujuan apapun. Walaupun demikian, dalam kondisi ketersediaan lahan yang terbatas, reklamasi lahan adalah pilihan terakhir dengan menerapkan teknologi yang tepat agar dapat lebih bermanfaat dan lingkungan tetap lestari.

Selama lebih dari 50 tahun terakhir tanah sulfat masam secara intensif telah banyak dipelajari (Dent, 1986; Shamshuddin, 2006). Banyak upaya yang telah dilakukan untuk mengembangkan potensi tanah sulfat masam sebagai lahan pertanian yang produktif. Tidak sedikit biaya telah dikeluarkan untuk upaya tersebut, tetapi hanya sebagian saja yang mampu memberikan hasil yang nyata. Berikut dipaparkan beberapa teknologi dalam upaya mereklamasi atau mengembangkan potensi tanah sulfat masam sebagai lahan pertanian. Banyak peneliti menyusun strategi dalam rangka mereklamasi atau mengelola tanah sulfat masam.

Menurut Fitzpatrick et al. (2008), prinsip pengelolaan tanah sulfat masam berdasarkan prioritas adalah:

- 1) meminimalisasi gangguan atau drainase tanah sulfat masam;
- 2) mencegah teroksidasinya bahan sulfidik;
- 3) menurunkan laju oksidasi bahan sulfidik dan melindunginya dari potensi teroksidasi;
- 4) pemberian *treatment* pada air drainase untuk menurunkan dampak negatifnya;
- 5) memberikan suatu bahan yang mampu menetralisasi kemasaman;
- 6) pemisahan bahan-bahan sulfidik;
- 7) mempercepat oksidasi, melokalisasi hasil oksidasi, dan kemudian memberikan *treatment*;
- 8) pengelolaan bahan-bahan sulfidik (*stock file*); serta
- 9) merencanakan dan mengembangkan sistem kontrol.

Beberapa pendekatan yang dapat dilakukan dalam meminimalisasi dampak negatif dari kegiatan reklamasi tanah sulfat masam (Das & Das, 2015) adalah sebagai berikut:

- 1) mencegah atau menghindari (*avoidance*),
- 2) meminimalisasi gangguan (*minimization of disturbance*),
- 3) menetralisasi (*neutralization*),
- 4) menggenangi (*re-flooding*),
- 5) menggenangi dengan air laut (*seawater re-flooding*),
- 6) pemisahan secara hidrolik (*hydraulic separation*),
- 7) bioremediasi (*bioremediation*),
- 8) menutup tanah dengan material yang tidak berpotensi mencemari lingkungan,
- 9) penggenangan berselang,
- 10) mengelola tinggi muka air tanah (*water table management*),
- 11) pencampuran tanah dengan bahan aditif (*deep soil mixing*), dan
- 12) menanam tanaman yang adaptif (*growing of suitable crops*).

Pengelolaan tanah sulfat masam dapat disederhanakan setidaknya menjadi empat langkah pengelolaan strategis, yaitu menghindari pengusikan tanah sulfat masam (*avoid disturbance*), meminimalisasi pengusikan (*minimise disturbance*), mencegah oksidasi (*prevent oxidation*), dan melakukan *treatment* untuk menetralisasi kemasaman

(*treat to reduce or neutralise acidity*) (The State of Victoria, 2010). Beberapa teknik untuk remediasi tanah sulfat masam, seperti desain saluran drainase dan pengelolaan muka air tanah saja relatif tidak efektif dalam mencegah oksidasi bahan sulfidik yang terus berlanjut (Johnston, Keene et al., 2009). Teknik lainnya meliputi pembatasan, penggalian dan pemindahan, serta *bio-treatment* dan pengapuran. Pembatasan berupa penempatan material kedap air di atas bahan sulfida untuk menurunkan laju  $O_2$  dan air yang masuk ke dalam tanah dianggap tidak efektif karena tidak mencegah oksidasi bahan sulfidik yang terus berlanjut. Pengapuran konvensional menggunakan kalsium karbonat ( $CaCO_3$ ) atau kapur pertanian menghasilkan lumpur kaya logam (Benner et al., 1999) dan penerapan pengapuran skala besar membutuhkan biaya yang sangat mahal mengingat banyaknya jumlah kapur yang dibutuhkan untuk menetralkan kemasaman di dalam tanah sehingga diperlukan prosedur yang tepat dan terintegrasi saat melakukan reklamasi. Misalnya, membuat tabat penahan air lebih dahulu sebelum melakukan pembuatan saluran atau mendahulukan pembuatan saluran drainase sebelum pekerjaan lainnya agar air yang berkualitas buruk akibat penataan lahan tidak masuk ke dalam petakan sawah.

Berdasarkan beberapa teknik/prinsip reklamasi ataupun pengelolaan tanah sulfat masam, berikut diuraikan beberapa teknologi utama dalam pengelolaan tanah sulfat masam yang telah dimanfaatkan atau yang telah terlanjur direklamasi. Secara implisit, teknologi tersebut telah mencakup cara untuk mengatasi tingginya kemasaman tanah dan kelarutan unsur potensial meracun, serta untuk meningkatkan ketersediaan unsur hara dalam rangka mendukung pertumbuhan tanaman. Setiap teknologi berikut harus diterapkan secara terintegrasi dan utuh.

## A. Pengelolaan Air

Pengelolaan air dimaksudkan untuk memenuhi kebutuhan air dan menciptakan kondisi lingkungan yang optimum untuk pertumbuhan dan produksi tanaman sekaligus tetap menjaga kualitas lingkungan

sehingga pada musim hujan (jumlah air berlimpah), tetap dapat dikendalikan dan dimanfaatkan. Sebaliknya, pada musim kemarau, muka air dan kelembapan tanah dapat dipertahankan semaksimal mungkin untuk mencegah teroksidasinya bahan sulfidik dan dampak negatif lainnya. Pengelolaan air adalah kunci utama reklamasi tanah sulfat masam (Dent, 1986; Kyuma, 2004). Keberhasilan usaha pertanian di tanah sulfat masam sangat ditentukan oleh ketepatan penerapan sistem pengelolaan air.

Pengelolaan air menjadi faktor utama yang menentukan keberhasilan pengelolaan tanah sulfat masam untuk pertanian. Penggenangan adalah konsep dasar dari pengelolaan air pada tanah-tanah yang memiliki lapisan bahan sulfidik. Sahrawat (2004a) menyatakan bahwa pengelolaan pertanian dengan sistem penggenangan yang selama ini telah dipraktikkan pada pertanaman padi berpengaruh amelioratif terbaik bagi sifat kimia tanah sulfat masam. Kelembapan tanah menentukan sifat biogeokimia tanah sulfat masam. Salah satu sifat tanah yang dipengaruhi oleh kelembapan tanah adalah stabilitas bahan sulfidik yang terjadi pada kondisi anaerob (pH 3,5 dan Eh berkisar 0 sampai -200 mV, atau pada pH 5,0 dengan Eh berkisar -100 sampai -300 mV) (Borda, 2006). Secara alamiah, kondisi stabilnya bahan sulfidik tersebut biasanya dapat tercapai jika tanah dalam kondisi jenuh air atau tergenang. Hal ini berarti bahwa untuk mencegah atau mengurangi teroksidasi, bahan sulfidik harus selalu dalam kondisi yang jenuh air. Secara praktis, upaya ini dapat dilakukan dengan mempertahankan atau menjaga tinggi muka air tanah agar lapisan tanah yang mengandung bahan sulfidik selalu jenuh air atau anaerob. Proses penggenangan tanah sulfat masam membatasi atau menghentikan suplai  $O_2$  sehingga oksidasi bahan sulfidik oleh  $O_2$  jadi terhenti. Menekan oksidasi bahan sulfidik memiliki arti penting bagi pelestarian lingkungan dan mendukung pertumbuhan tanaman. Penggenangan tanah sulfat masam dengan air tawar dapat memperbaiki kualitas air di lahan dan mencuci kemasaman tanah (Johnston et al., 2010; Creeper et al., 2015), memperbaiki kondisi redoks tanah, dan selanjutnya mampu meningkatkan hasil padi (Husson, 2000).

Menurut Anda dan Subardja (2013), data yang menginformasikan atau menggambarkan distribusi secara vertikal dan horizontal lapisan bahan sulfidik diperlukan untuk menentukan tinggi muka air tanah yang dapat dipertahankan pada suatu lahan agar bahan sulfidik tidak teroksidasi.

Selain mencegah penurunan pH akibat teroksidasinya bahan sulfidik, menurut Fahmi et al. (2009) serta Hairani dan Susilawati (2013), penggenangan menyebabkan peningkatan pH tanah sulfat masam pada dua minggu sampai beberapa minggu setelahnya. Ponnampuruma (1984) menyatakan bahwa penggenangan menyebabkan konsentrasi  $\text{Fe}^{2+}$  terus meningkat, walaupun pada suatu titik klimaks akan terjadi penurunan kembali. Hal ini sangat tergantung pada ketersediaan  $\text{Fe}^{3+}$  yang dapat tereduksi dan bahan organik sebagai sumber elektron karena peningkatan pH tanah sulfat masam berhubungan dengan proses reduksi  $\text{Fe}^{3+}$ . Berdasarkan ketersediaan air di sekitar tanah sulfat masam, penggenangan dapat dilakukan dengan menggunakan air tawar ataupun air laut. Johnston, Keene et al. (2009) dan Johnston et al. (2010) menyatakan bahwa penggenangan tanah sulfat masam dengan air laut meningkatkan suplai karbonat. Ion tersebut berperan sebagai penetral kemasaman dan meningkatkan kadar Fe-amorf yang bersifat mudah tereduksi.

Respons perubahan sifat tanah akibat penggenangan pada tanah sulfat masam sangat bervariasi, berbeda dengan tanah mineral pada umumnya. Penggenangan tanah sulfat masam tidak selalu dapat meningkatkan pH tanah. Pada kondisi tertentu, pH tanah sulfat masam dapat saja tidak meningkat secara nyata (pH tidak lebih dari 5) setelah beberapa bulan penggenangan. Hal ini dapat disebabkan oleh (1) rendahnya kandungan  $\text{Fe}^{3+}$ -oksida yang dapat/mudah tereduksi; (2) rendahnya kandungan bahan organik yang dapat terdekomposisi; (3) rendahnya pH tanah awal dan kandungan hara tanah untuk mendukung aktivitas mikrobial tanah; (4) rendahnya kandungan bahan penetral kemasaman, seperti karbonat; serta (5) tingginya kapasitas daya sangga tanah yang berhubungan dengan besarnya jumlah Al terlarut dan dapat tukar, Al dan Fe-sulfat serta  $\text{SO}_4$  terjerap (Pon-

namperuma, 1972; Breemen, 1976; Breemen & Pons, 1978; Ritsema et al., 1992; Konsten et al., 1994; Hicks et al., 2009). Selain itu, kondisi air genangan yang bersifat stagnan (tidak mengalir) bukan hanya menyebabkan pH tanah dan air di lingkungan tanah sulfat masam tidak meningkat, tetapi juga dapat menyebabkan pH tanah dan air menjadi lebih rendah. Hal ini terjadi karena terakumulasinya sumber-sumber kemasaman tanah pada daerah tersebut (Gambar 5.9). Willett et al. (1993) melaporkan bahwa adanya pelepasan asam-asam dari daerah sekitar tanah sulfat masam yang teroksidasi ke perairan bebas. Oploo et al. (2008) memprediksi bahwa ada sekitar 78–90 t/ha  $H_2SO_4$  telah dilepaskan keluar dari tanah sulfat masam yang teroksidasi di McLeod's Creek, Australia.

Selain tidak meningkatkan pH, penggenangan lahan yang tidak terkontrol dapat menyebabkan peningkatan konsentrasi  $Fe^{2+}$  sehingga berpotensi meracuni tanaman padi. Hal ini sebagaimana hasil penelitian Gao et al. (2002) yang menunjukkan bahwa penggenangan sawah secara terus-menerus telah mengakibatkan peningkatan konsentrasi  $Fe^{2+}$  selama 20 minggu (Gambar 5.15). Untuk mendapatkan hasil terbaik, upaya penggenangan tanah sulfat masam seharusnya diikuti dengan upaya pencucian lahan (*leaching*), yaitu mengeluarkan air dari lahan setelah sekian waktu tertentu air tersebut menggenangi lahan. Dua proses yang dapat menurunkan total kemasaman aktual adalah pencucian dan netralisasi. Menurut Sylla (1994), kelebihan asam yang terbentuk, garam larut, dan garam Al di permukaan tanah dapat dihilangkan dengan pencucian. Secara detail, langkah-langkah lainnya yang perlu dilakukan dalam rangka pengelolaan air di tanah sulfat masam akan diuraikan dalam sistem pengelolaan air satu arah.

Pengelolaan air adalah suatu bentuk upaya mempertahankan atau memperbaiki kualitas air di lahan dengan mengatur dinamika ketersediaan air, baik secara kualitas maupun kuantitasnya, sehingga lahan menjadi lebih baik. Berdasarkan luas cakupan jaringan sistem tata air yang dikelola, pengelolaan air di tanah sulfat masam lahan pasang surut dapat dikategorikan menjadi dua, yaitu pengelolaan air skala makro dan skala mikro. Pengelompokan sistem pengelolaan

air ini awalnya dimaksudkan pada pembagian tugas dan wewenang pengelolaan terkait sumber daya lahan antara pemerintah pusat dan daerah. Walaupun demikian, sistem pengelolaan air yang dipaparkan dalam bab ini adalah pengelolaan air skala makro dan mikro dalam perspektif teknis untuk memahami dan menerapkan teknologi dalam bidang hidrologi pertanian dan kaitannya dengan kesuburan tanah sulfat masam di lahan pasang surut.

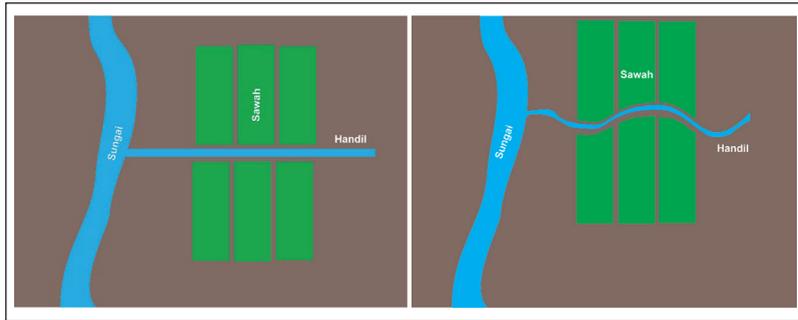
## 1. Sistem Pengelolaan Air Skala Makro

Pengelolaan air sangat penting untuk meningkatkan kualitas dan produktivitas tanah sulfat masam. Pada kondisi tergenang, bahan sulfidik relatif stabil. Drainase lahan atau turunnya muka air tanah sampai pada lapisan bahan sulfidik akan menyebabkan bahan tersebut teroksidasi sehingga menurunkan pH tanah. Untuk menjamin tercapainya setiap upaya atau tujuan pengelolaan air, sistem pengelolaan air skala makro dan skala mikro seharusnya dilaksanakan secara terintegrasi. Pengelolaan air skala makro adalah pengelolaan air yang bersifat luas pada kawasan reklamasi yang bertujuan mengelola berfungsinya jaringan drainase/irigasi. Contoh pengelolaan air dengan skala makro, antara lain sistem anjir, sistem garpu (kolam), sistem sisir, dan sistem handil (Noor, 2004). Dalam praktiknya, setiap sistem pengelolaan air pada satu kawasan dapat pula berupa kombinasi antara dua sistem atau lebih. Misalnya, sistem anjir dan handil yang dijumpai di Kalimantan Selatan dan Kalimantan Tengah dan kombinasi sistem garpu, sistem sisir, dan sistem tangga dijumpai di Sumatra Selatan (Adimihardja et al., 2006).

### a. Sistem Handil

Handil adalah sebuah saluran yang dibuat dari tepi sungai menjorok tegak lurus dengan sungai ke pedalaman sampai 2–3 km dengan ukuran lebar 2–3 m dan dalam 0,5–1,0 m. Berdasarkan fungsinya, sebutan ‘handil’ untuk daerah di pulau Sumatra disebut juga ‘*parit kongsi*’ dengan perbedaan yang terletak pada bentuk saluran yang tidak lurus (Gambar 5.2). Kondisi di lapangan menunjukkan bahwa

antar-handil sering disambung atau dihubungkan sehingga jika dilihat dari atas berbentuk menyerupai susunan sirip ikan atau tulang daun.

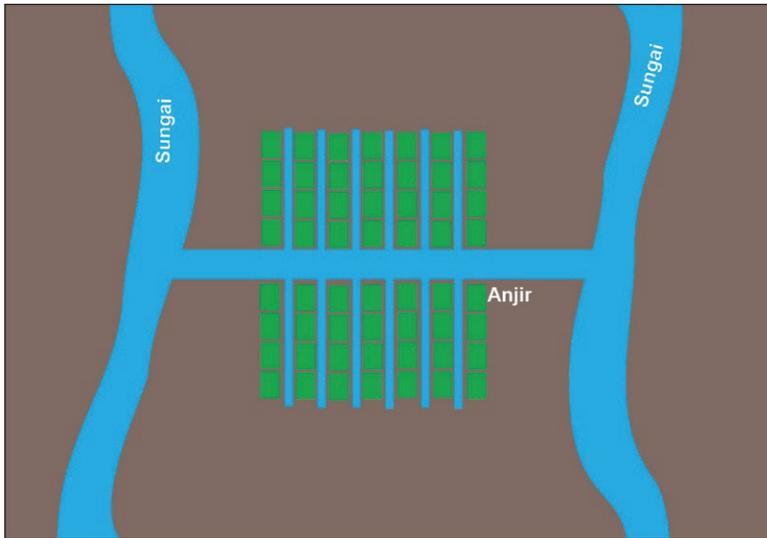


**Gambar 5.2** Ilustrasi Sistem Handil pada Lahan Pasang Surut di Kalimantan dan Sumatra

Arah aliran dalam sistem ini bergerak secara bolak-balik atau dua arah (*two way flow sistem*), yaitu pergerakan air masuk (irigasi) dan keluar (drainase) dari kawasan persawahan melalui satu saluran yang sama. Secara praktis, efektivitas dari sistem ini hanya terjadi pada daerah muara yang dekat dengan sungai atau saluran sekunder karena tidak terjadi perbaikan kualitas air pada daerah-daerah yang tidak terjangkau dari kekuatan arus pasang surut, terutama pada daerah ujung handil jika handil terlalu panjang. Kondisi ini menyebabkan proses pencucian dan penyegaran dari air pasang kurang efektif. Umumnya, sistem ini dapat diterapkan pada lahan pasang surut tipe luapan B.

### b. Sistem Anjir

Sistem anjir utamanya terdiri atas saluran besar atau kanal dengan lebar 20–30 m dan kedalaman 1–2 m (Gambar 5.3). Saluran ini menghubungkan dua buah sungai besar sehingga panjangnya sangat tergantung jarak antara dua sungai, yaitu dapat mencapai 20–25 km. Biasanya di sepanjang saluran dibuat handil-handil yang tegak lurus dengan saluran. Jarak antar-anjir dapat berkisar 200–500 m. Contoh daerah yang menerapkan sistem ini adalah DIR Anjir Serapat (Kalsel).

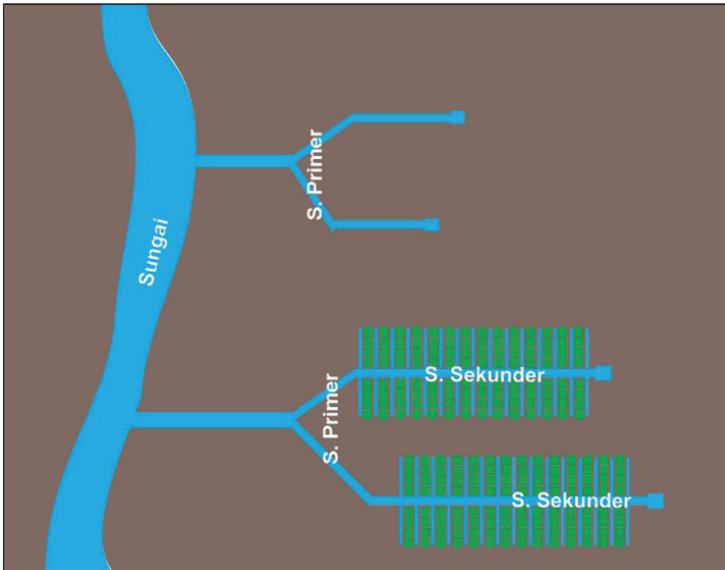


**Gambar 5.3** Ilustrasi Sistem Anjir di Lahan Pasang Surut

### c. Sistem Garpu

Pengaturan tata air dengan sistem garpu pertama kali dikembangkan oleh Prof. Soenaryo dari Universitas Gajah Mada pada tahun 1969–1982 (Noor, 2001). Sistem garpu terdiri atas sebuah saluran besar yang dibuat menjorok masuk ke pedalaman dari tepi sungai. Sampai pada jarak tertentu saluran tersebut disambung dengan saluran primer dengan dimensi lebar 10–20 m, kedalaman 3–4 m, serta panjang 1–2 km (Gambar 5.4). Pada ujung saluran primer, dibuat saluran sekunder yang menyudut kanan dan kirinya dengan ukuran lebar 5–10 m, kedalaman 2–3 m, dan panjang 7–10 km. Pada ujung saluran sekunder ini, dibuat kolam persegi dengan lebar sisinya 300–500 m. Pembuatan kolam mini ini dimaksudkan sebagai tempat pengendapan atau akumulasi anasir negatif dari proses pencucian lahan. Seperti halnya sistem anjir, di sepanjang saluran sekunder dapat dibuat saluran tersier yang tegak lurus dengan saluran sekunder dengan ukuran lebar 1–2 m, kedalaman 1–1,5 m, dan panjang 1–2 km.

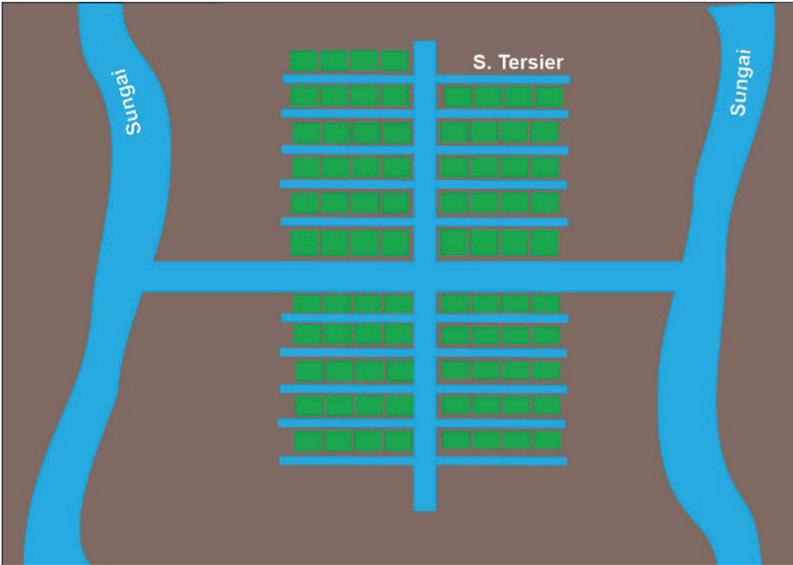
Contoh daerah yang menerapkan sistem ini adalah DIR Tabunganen, Barambai (Kalsel), dan DIR Belanti Siam (Kalteng).



**Gambar 5.4** Ilustrasi Sistem Garpu di Lahan Pasang Surut

#### d. Sistem Sisir

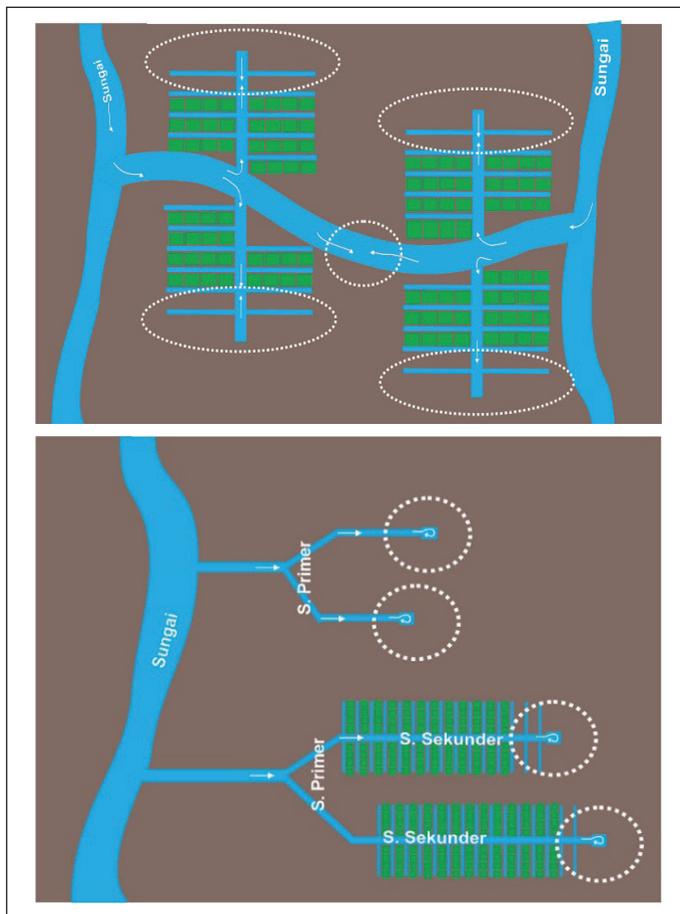
Pengaturan tata air dengan sistem sisir untuk wilayah pasang surut dirancang oleh Prof. Sugandar dari Institut Teknologi Bandung (Noor, 2001). Serupa dengan sistem anjir, sistem sisir terdiri atas sebuah saluran besar atau kanal yang disebut saluran primer. Saluran ini menghubungkan dua buah sungai dengan panjang 1–4 km. Di sepanjang saluran dibuat saluran sekunder (panjang 3–10 km) yang tegak lurus dengan saluran primer. Kemudian, pada saluran sekunder ini dibuat lagi saluran tersier (panjang 1–2 km) yang posisinya tegak lurus dengan saluran sekunder (Gambar 5.5). Contoh daerah yang menerapkan sistem ini adalah daerah Telang (Sumsel) dan DIR Rasau (Kalbar).



**Gambar 5.5** Ilustrasi Sistem Sisir di Lahan Pasang Surut

Beberapa teknologi sistem pengelolaan air yang telah diuraikan tersebut telah didesain sedemikian rupa dan diperhitungkan dengan tujuan untuk memperbaiki kualitas lahan agar usaha pertanian yang diupayakan di lahan tersebut dapat meningkat secara maksimum. Walaupun demikian, kondisi di lapangan tidak sepenuhnya sesuai dengan hipotesis yang dibangun. Masih ditemukan beberapa titik lemah, salah satunya disebabkan oleh penurunan fungsi saluran akibat kurangnya pemeliharaan seiring bergulirnya waktu, seperti saluran menjadi dangkal, bangunan-bangunan air mengalami kerusakan, dan perubahan kualitas atau kuantitas air yang kecepatannya tidak terduga. Aliran air yang stagnan akibat lemahnya daya dorong arus pasang surut pada bagian tengah saluran dalam sistem sisir telah menyebabkan kualitas lahan pada daerah yang mengalami aliran yang stagnan tersebut menjadi makin buruk. Hal ini disebabkan air yang memiliki kualitas buruk sebagai hasil pencucian dari daerah lainnya terakumulasi pada titik ini, dikenal sebagai “titik mati” (Gambar 5.6).

Adapun pada sistem garpu, air dengan kualitas buruk sebagai hasil pencucian dari daerah lainnya terakumulasi pada kolam di ujung saluran sehingga lahan yang berada dekat dengan kolam tidak mengalami perbaikan atau kualitasnya meningkat, tetapi malah menjadi makin rendah.



**Gambar 5.6** Ilustrasi daerah yang berpotensi mengalami penurunan kualitas lahan yang disebut “titik mati” (dalam lingkaran) pada sistem siris dan garpu di lahan pasang surut (tanda panah adalah arah aliran air).

## 2. Sistem Pengelolaan Air Skala Mikro

Sistem pengelolaan air skala mikro adalah suatu bentuk pengelolaan air dalam skala yang lebih sempit atau dalam ukuran petak sawah milik petani yang luasnya hanya berkisar 1–2 ha saja. Beberapa bentuk sistem pengelolaan air skala mikro adalah sistem tata air satu arah dan sistem tabat. Sistem ini cukup sederhana dan memungkinkan pengaturan air yang lebih efisien. Sebagai bentuk sistem pengelolaan air di lahan pasang surut, tentunya sumber air utamanya berasal dari sungai besar maupun sungai kecil yang terdapat di sekitar lahan pasang surut, khususnya pada lahan tipe luapan A dan B. Walaupun demikian, secara khusus pada sistem tabat yang diterapkan di lahan pasang surut tipe luapan C, aliran air yang ditabat adalah air yang bersumber dari air hujan. Pada prinsipnya, sistem pengelolaan tata air mikro memiliki fungsi:

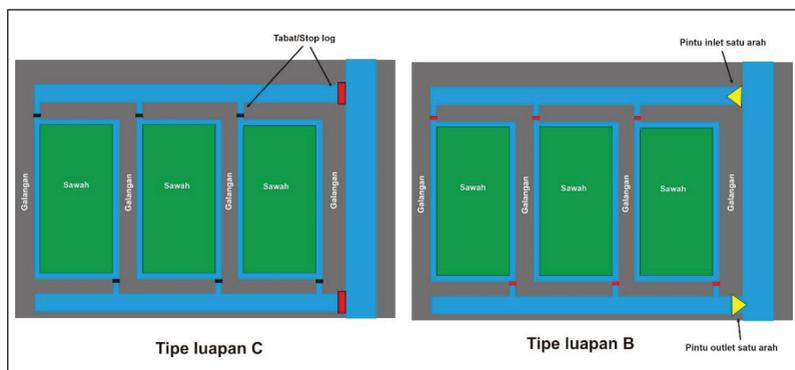
- 1) mencukupi kebutuhan evapotranspirasi tanaman,
- 2) mencegah pertumbuhan gulma pada sawah,
- 3) mencegah terjadinya keracunan bagi tanaman melalui pengelontoran dan pencucian,
- 4) mengatur tinggi muka air di lahan, dan
- 5) menjaga kualitas air di petakan dan saluran.

Berikut akan diuraikan dua model pengelolaan air skala mikro, yaitu sistem tabat dan sistem tata air satu arah. Walaupun berdasarkan tipe luapan lahan diketahui bahwa sistem pengelolaan air bersifat spesifik, tetapi dalam praktiknya kedua sistem tersebut dapat pula diterapkan secara terintegrasi atau mandiri sesuai dengan kondisi di lapangan.

### a. Sistem Tabat

Secara prinsip, sistem tabat adalah suatu sistem pengelolaan air yang sederhana. Sistem ini dapat dianggap sebagai suatu teknologi pengelolaan air tradisional yang dikembangkan berdasarkan kearifan lokal masyarakat yang hidup di lingkungan lahan rawa (Noor, 2001). Secara sederhana, sistem tabat bertujuan untuk mempertahankan tinggi muka air minimum sesuai kebutuhan.

Setiap sistem tata air atau pengelolaan air tidak semata-mata dapat diterapkan pada semua kondisi lahan, salah satu hal yang membatasinya adalah sifat hidrologi lahan berupa tipe luapan lahan. Pada tanah sulfat masam tipe luapan C, penggunaan sistem tabat menjadi solusi terbaik karena mampu mempertahankan ketersediaan dan tinggi muka air tanah yang utamanya bersumber dari hujan. Walaupun demikian, efektivitas sistem tabat sangat dipengaruhi oleh penempatannya pada suatu saluran (Gambar 5.7). Drainase harian intensif yang terjadi hampir sepanjang tahun menyebabkan muka air tanah dapat turun mencapai  $>1$  m. Tabat dibuat dengan konstruksi sederhana dari tanah dan kayu ataupun dengan konstruksi yang lebih modern sesuai perkembangan teknologi, seperti campuran semen dan pasir, logam, serta plastik. Selain jenis bahannya, bentuk tabat dapat pula bervariasi.



Keterangan: Penempatan tabat pada saluran di dalam petakan sawah dan pada saluran *outlet*/*drainase* di lahan pasang surut tipe luapan C dan penempatan tabat yang dikombinasikan dengan pintu air satu arah pada saluran (*drainase dangkal*) di dalam petakan sawah di lahan pasang surut tipe luapan B.

**Gambar 5.7** Ilustrasi Penempatan Tabat

Bangunan air lainnya yang dapat digunakan untuk mengelola tinggi muka air tanah sulfat masam adalah pintu air. Pintu air biasanya dibuat atau dipasang pada saluran air drainase ataupun saluran irigasi,

baik tersier maupun sekunder. Pintu air di lahan rawa sejatinya didesain atau diperhitungkan mampu mengatur dan mempertahankan tinggi muka air minimum yang dibutuhkan dalam saluran dan di petakan sawah. Hal ini memungkinkan saluran air menjadi salah satu tempat penyimpanan cadangan air (*long storage*). Idealnya, desain pintu air perlu disesuaikan dengan permasalahan yang dihadapi, ukuran pintu air harus memperhitungkan sifat saluran, durasi waktu air pasang atau suplai air yang berkualitas baik, kebutuhan air harian pertanaman secara kuantitas, luas areal yang diairi, curah hujan harian dan besarnya rembesan (infiltrasi), waktu yang digunakan untuk drainase, serta besarnya evapotranspirasi yang terjadi.

## b. Sistem Tata Air Satu Arah

Sistem tata air satu arah (*one way flow sistem*) adalah model pengelolaan air yang mengatur aliran air irigasi dan drainase melalui saluran yang berbeda sehingga secara berkala terjadi pergerakan dan pergantian air mengikuti siklus satu arah (Gambar 5.15). Sistem tata air satu arah pertama kali dikembangkan di Indonesia oleh H. Idak, seorang mantri tani dari Kalimantan Selatan (Idak, 1982). Sistem tata air satu arah adalah bentuk penerapan teknologi yang memanfaatkan kualitas air yang relatif lebih baik pada saat pasang (Tabel 5.2) untuk kemudian menjadikannya sebagai agen pelindi bagi anasir lahan yang bersifat negatif bagi tanaman saat didrainase. Sistem tata air satu arah ini dimaksudkan untuk menciptakan terjadinya sirkulasi air secara satu arah, baik air permukaan maupun air bawah tanah karena adanya gradien tinggi muka air dari saluran irigasi dan drainase. Tata air satu arah diawali dengan memasukkan air sungai dengan kualitas yang relatif lebih baik ke lahan, kemudian menggenangi lahan tersebut selama jangka waktu tertentu, dan terakhir mengeluarkan air genangan dari lahan melalui saluran drainase. Sistem ini memerlukan bangunan pintu air (*flapgate*) pada muara saluran irigasi dan ujung saluran drainase. Pintu air pada tata air satu arah ini dikenal dengan sebutan *one way flapgate* (Gambar 5.8). Pintu air pada saluran irigasi dirancang membuka ke dalam saat pasang dan menutup saat surut, sedangkan pintu air pada saluran drainase dirancang sebaliknya.

Ilustrasi sistem tata air satu arah dan posisi penempatan bangunan pintu air ditunjukkan pada Gambar 5.9.

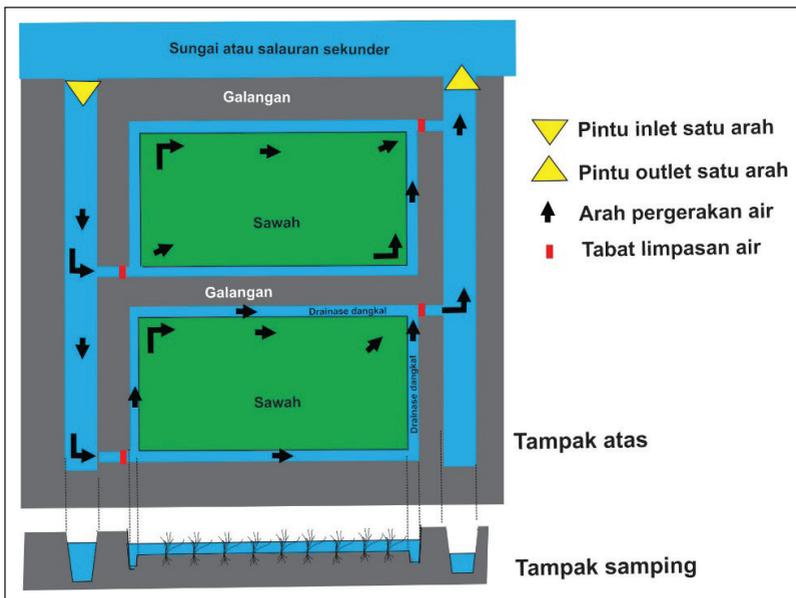


Foto: Ani Susilawati (2024)

**Gambar 5.8** Beberapa bentuk bangunan tabat (a dan b) dan model bangunan pintu air model satu arah (*one way flafgate*) di saluran sekunder lahan pasang surut tipe luapan B, (c) menunjukkan pintu *inlet* atau air masuk dan (d) menunjukkan pintu *outlet* atau keluar.

Selain peningkatan pH, sistem tata air satu arah sangat efektif menekan potensi keracunan  $\text{Fe}^{2+}$  pada budi daya padi di tanah sulfat masam. Menurut Breemen dan Buurman (2002), air dengan kualitas yang lebih baik sangat efektif digunakan untuk mencuci (*flushing*) Fe dari larutan tanah. IRRI (2003) merekomendasikan penggenangan lahan selama 7–10 hari kemudian mendrainasenyanya dari lahan. Pada budi daya padi dengan sistem tata air satu arah, konsentrasi  $\text{Fe}^{2+}$  tertinggi hanya terjadi pada awal penggenangan, kemudian secara berangsur menjadi turun. Penggenangan lahan yang dilakukan dalam

sistem tata air satu arah harus mempertimbangkan kuantitas dan kualitas air. Air yang digunakan untuk menggenangi lahan adalah air yang memiliki kualitas yang lebih baik, seperti saat terjadi pasang besar (periodik dua minggu). Kemudian setelah beberapa waktu, air tersebut didrainase untuk selanjutnya diganti dengan air yang baru. Kegiatan ini cenderung menyebabkan konsentrasi  $Fe^{2+}$  menjadi lebih rendah. Secara ilmiah, proses yang terjadi adalah “penggenangan menyebabkan meningkatnya konsentrasi  $Fe^{2+}$ , kemudian  $Fe^{2+}$  yang ada di larutan tanah tersebut dikeluarkan bersamaan dengan air drainase dari areal/petakan sawah”. Pada kondisi tertentu di sekeliling lahan dapat juga dibuat saluran drainase (drainase dangkal) yang berfungsi sebagai saluran untuk mempercepat aliran air drainase dan tempat akumulasi sementara anasir negatif, seperti  $Fe^{2+}$ . Dengan demikian, potensi keracunan  $Fe^{2+}$  pada tanaman padi dapat dicegah.



**Gambar 5.9** Ilustrasi Sistem Tata Air Satu Arah dari Tampak Atas dan Tampak Samping

Sistem tata air satu arah adalah penerapan teknologi yang memanfaatkan kualitas air yang relatif lebih baik pada saat pasang, kemudian menjadikannya sebagai agen pelindi sumber-sumber kemasaman dan unsur meracun dalam tanah bagi tanaman saat drainase. Subagyono et al. (1999) melaporkan bahwa pencucian bahan beracun dari petakan sawah dengan memasukkan air sebelum tanah dibajak, kemudian air tersebut dikeluarkan setelah pengolahan tanah selesai. Usaha pencucian ini akan berjalan baik apabila terdapat air dengan kualitas yang baik, baik dari hujan maupun dari air pasang. Kondisi yang berbeda dilaporkan oleh Hicks et al. (2009) bahwa tidak terjadi perbaikan kualitas tanah sulfat masam di Trinity Timur, Australia meskipun telah lebih dari 20 tahun digenangi. Hal ini terjadi karena kurang tepatnya sistem drainase yang dibangun. Diketahui bahwa kualitas air dalam suatu siklus pasang surut dipengaruhi oleh tingkatan pasang yang terjadi, kondisi saluran, dan sifat tanah. Kualitas air yang relatif lebih baik biasanya terdapat pada saat pasang besar. Pada kondisi ini, air memiliki tingkat kemasaman yang rendah dan kandungan hara yang lebih tinggi (Tabel 5.1). Hasil penelitian Jumberi et al. (2003) menunjukkan bahwa pH air tertinggi terjadi sekitar 2–3 jam sesudah puncak pasang. Penerapan sistem tata air satu arah dapat memperbaiki pH tanah dari 4,2 menjadi 4,8 (saat tanam) dan 5,4 (saat panen). Konsentrasi  $Fe^{2+}$  turun dari 160 menjadi 72 ppm sehingga mampu meningkatkan hasil padi mencapai 6,26 t/ha (Widjaja-Adhi & Alihamsyah, 1998).

**Tabel 5.1** Kadar Beberapa Unsur (me/l) dalam Air Sungai pada Saat Pasang dan Surut di Desa Tanjung Harapan dan Terantang (Tipe Luapan B)

Desa		NH4	K	Ca	Mg	Na	Fe	SO4
Belandean	Pasang	1,23	2,74	8,64	3,11	4,01	0,01	163,7
	Surut	1,46	2,08	1,07	10,69	17,35	0,57	679,4
Terantang	Pasang	1,14	2,74	8,41	3,35	4,26	0,01	227,1
	Surut	1,42	3,77	8,64	8,25	22,2	0,39	529,8

Sumber: Jumberi et al. (2003)

Sumber daya air menjadi komponen penting dalam ketersediaan hara bagi tanaman padi di lahan pasang surut. Kualitas air yang baik pada saat pasang besar jika dimanfaatkan dengan tepat akan memperbaiki tingkat ketersediaan hara. Kadar hara yang terdapat dalam air dapat dijadikan sebagai sumber hara. Menurut Yang et al. (2004), sistem pengelolaan air seperti periodik tergenang dan kering dalam waktu tertentu yang secara prinsip telah terjadi di lahan pasang surut dapat meningkatkan efisiensi penyerapan N, P, dan K masing-masing sebanyak 22%, 28%, dan 35%. Pengelolaan air yang tepat, khususnya pada tipe luapan A dan B, cenderung menyumbangkan hara secara langsung ke tanah. Pada lahan tipe luapan A, terdapat potensi sumbangan unsur P setara 28 kg pupuk SP 36 /ha/musim dan unsur K setara 4 kg pupuk KCl /ha/musim, sedangkan pada lahan tipe luapan B potensi sumbangan unsur P setara 1,3 kg pupuk SP 36 /ha/musim dan unsur K setara 2,3 kg pupuk KCl /ha/musim (Fahmi et al., 2018). Pengaruh kualitas air yang berhubungan dengan tingkat kesuburan tanah dapat dilihat dengan adanya fakta bahwa tanah sulfat masam yang lebih dekat dengan muara laut/sungai besar memiliki sifat yang relatif lebih baik dibandingkan tanah sulfat masam yang lebih jauh dari laut/sungai besar (Tabel 3.1). Walaupun demikian, dalam upaya mencegah oksidasi bahan sulfidik, pengelolaan air skala mikro dan makro harus dijalankan secara terintegrasi. Pengelolaan air skala mikro akan sangat sulit untuk dilaksanakan dan berhasil jika tidak dilakukan pengelolaan air dalam skala makro, demikian pula sebaliknya.

## **B. Penataan Lahan**

Salah satu kegiatan utama dalam reklamasi tanah sulfat masam adalah penataan lahan. Sistem penataan lahan yang dibentuk ditentukan oleh tujuan dari reklamasi lahan dan kondisi lahan tersebut. Mereklamasi tanah sulfat masam untuk tujuan pembangunan infrastruktur atau perumahan akan sangat berbeda dengan reklamasi lahan untuk tujuan pertanian. Bahkan, lebih detail lagi, penataan lahan dalam konteks untuk tujuan pertanian juga ditentukan oleh komoditas yang akan

diusahakan. Penataan lahan untuk tujuan pertanaman padi biasanya bersifat lebih sederhana, seperti lahan berbentuk hamparan luas yang memiliki beberapa saluran di sekitarnya sebagai saluran drainase dan irigasi. Selain itu, penataan lahan sejatinya terdiri atas pembuatan jaringan tata air (pembuatan saluran irigasi dan drainase), pembuatan petakan sawah dan galangan dengan ukuran tertentu, serta pembuatan bangunan-bangunan air lainnya yang dibutuhkan. Dengan demikian, dapat dinyatakan bahwa proses penataan lahan tidak dapat dipisahkan dari pengelolaan air.

Penataan lahan merupakan kegiatan mempersiapkan lahan yang dilakukan dengan tujuan untuk membuat lahan sedemikian rupa sehingga lahan tersebut memenuhi syarat sebagai media tumbuh bagi tanaman yang akan dikembangkan (Nazemi et al., 2012; Simatupang et al., 2014). Penataan lahan pasang surut berkaitan dengan optimalisasi pemanfaatan dan pelestarian sumber daya lahannya (Widjaja-Adhi & Alihamsyah, 1998).

Tanah sulfat masam pada awalnya direkomendasikan untuk budi daya padi sawah sebagaimana dilakukan oleh petani lokal. Introduksi pemanfaatan lahan rawa untuk tanaman dari lahan kering (palawija dan sayur) serta tanaman perkebunan memerlukan penataan lahan. Tanaman kelapa sawit dan karet mempunyai daya adaptasi yang cukup baik pada tanah sulfat masam, tetapi kurang toleran terhadap genangan. Oleh karena itu, untuk mendapatkan hasil yang optimal, perlu penataan dan pengelolaan lahan dan tanaman yang tepat. Umumnya, penataan lahan di tanah sulfat masam terdiri dari tiga sistem, yaitu sawah, tukang atau surjan, dan tegalan. Selain itu, penataan lahan ditentukan juga oleh kedalaman lapisan tanah yang mengandung bahan sulfidik dan tipe luapan pasang surut.

Selain ditentukan oleh jenis komoditas yang akan ditanam, sistem penataan lahan yang dibuat juga disesuaikan dengan tipe luapan lahan, keberadaan lapisan bahan sulfidik, serta tujuan pemanfaatannya (Tabel 5.2). Lahan yang memiliki kedalaman bahan sulfidik <50 cm pada semua tipe luapan hanya dapat dapat ditata sebagai lahan sawah saja. Jika lahan memiliki kedalaman lapisan bahan sulfidik >50 cm,

lahan pada tipe luapan A dapat ditata sebagai sawah, sedangkan lahan dengan tipe luapan B dapat ditata sebagai sawah dengan sistem surjan. Lahan dengan tipe luapan B/C dan C tidak terluapi air pasang, tetapi air tanahnya dangkal sehingga dapat ditata sebagai sawah tadah hujan atau surjan bertahap (dimulai membuat tukungan) dan tegalan. Lahan dengan tipe luapan D dapat ditata sebagai sawah tadah hujan atau tegalan dan kebun.

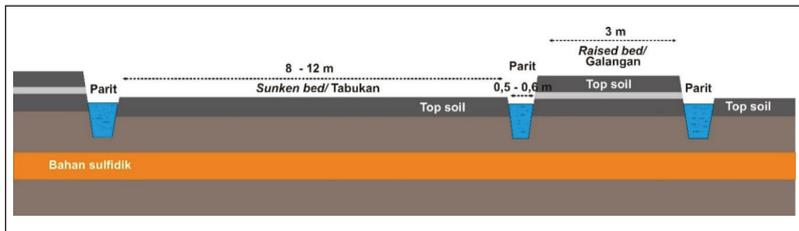
**Tabel 5.2** Arahan Penataan Lahan dan Pola Pemanfaatan Lahan untuk Pertanian Berdasarkan Tipologi Lahan dan Tipe Luapan Lahan Pasang Surut

Kode	Tipe Lahan	Pemanfaatan Lahan Berdasarkan Tipe Luapan			
		A	B	C	D
SMP-1	Aluvial bersulfida dangkal	Sawah	Sawah	Sawah	-
SMP-2	Aluvial bersulfida dalam	Sawah	Sawah (surjan)	Sawah (surjan)	Sawah (tegalan, kebun)
SMP-3/A	Aluvial bersulfida sangat dalam	-	Sawah (surjan)	Sawah (tegalan)	Tegalan (kebun)
SMA-1	Aluvial bersulfat 1	-	Sawah (surjan)	Sawah (surjan)	Sawah (tegalan, kebun)
SMA-2	Aluvial bersulfat 2	-	Sawah (surjan)	Sawah (surjan)	Sawah (tegalan, kebun)
SMA-3	Aluvial bersulfat 3	-	-	Sawah (kebun)	Tegalan (kebun)
HSM	Aluvial bersulfida dangkal	-	Sawah	Sawah (tegalan)	Tegalan (kebun)

Sumber: Widjaja-Adhi (1995)

Ketika tanah sulfat masam direklamasi untuk tujuan peningkatan produktivitas lahan dengan variatif komoditas tanaman, lahan harus ditata sedemikian rupa dalam bentuk suatu sistem lahan yang disebut sistem surjan. Sistem ini terdiri atas beberapa saluran air/

parit, *tabukan* (*sunken bed*), dan bedengan/tembokan/galangan (*raised bed*). Penataan lahan harus disesuaikan dengan tipe luapan lahan dan keberadaan lapisan bahan sulfidik. Dalam praktiknya, galangan yang dibuat harus memperhatikan keberadaan lapisan tanah yang mengandung bahan sulfidik dan galangan harus lebih tinggi dari permukaan air pada saat pasang besar atau tertinggi. Menurut Khan et al. (2016), pembuatan tembokan dari lapisan tanah yang tidak mengandung pirit mampu meningkatkan produktivitas lahan. Bahan tanah *topsoil* harus tetap berada di lapisan teratas pada galangan, sedangkan bagian *tabukan* tidak boleh lebih rendah atau menyentuh lapisan bahan sulfidik. Demikian pula saat membuat saluran keliling/parit dangkal, kedalaman saluran tidak boleh mengenai atau lebih dalam daripada lapisan bahan sulfidik (Gambar 5.10). Kehati-hatian ini ditujukan untuk menghindari dampak negatif dari teroksidasinya bahan sulfidik.



**Gambar 5.10** Ilustrasi Bentuk Penataan Lahan Sistem Surjan untuk Usaha Tani Berbasis Padi

Penataan lahan sistem surjan dalam usaha tani di lahan rawa memegang peranan penting karena memiliki beberapa keuntungan, antara lain intensitas penggunaan lahan meningkat, beragam produksi pertanian dapat dihasilkan, risiko kegagalan panen dapat dikurangi, stabilitas produksi dan pendapatan meningkat, dan meningkatnya efisiensi penggunaan air (Das et al., 2014). Sistem surjan adalah suatu teknologi penataan lahan yang dapat dikembangkan untuk meningkatkan produktivitas lahan. Ananto et al. (2000) menyebutkan bahwa luas galangan/tembokan dan jarak antargalangan berkaitan

dengan produktivitas lahan dan tanaman. Oleh karena itu, pembuatan galangan harus memperhatikan kedalaman bahan sulfidik, dimensi galangan (lebar 2–3 m, tinggi dan panjang galangan dapat mencapai 50–100 m), dan jarak antargalangan (8–12 m).

Secara umum, tujuan penataan lahan dengan sistem surjan dimaksudkan untuk tercapainya luasan yang proposional antara luasan pertanaman padi dan komoditas lainnya serta untuk kemudahan dalam pengelolaan lahan. Penataan lahan dalam bentuk petakan yang dikelilingi parit saluran air dan galangan ini secara tidak langsung juga berfungsi untuk mencegah oksidasi bahan sulfidik, mencegah/mengurangi kehilangan hara dari ekosistem lahan, serta meningkatkan efektivitas pencucian atau usaha-usaha menurunkan kelarutan anasir negatif dari lahan. Menurut Antarlina et al. (2005), pada lahan dengan sistem surjan, terjadi penurunan kadar Fe dari bulan pertama sampai kelima sesudah tanam. Adapun  $SO_4$  meningkat pada bulan pertama dan kedua, kemudian menurun setelah bulan ketiga.

Tembokan mengandung pengertian meninggikan sebagian tanah dengan menggali tanah di sekitarnya. Dalam praktiknya, sebagian tanah atau lapisan atas diambil atau digali dan digunakan untuk meninggikan bidang tanah di sampingnya secara memanjang sehingga terbentuk tembokan (Gambar 5.11). Wilayah bagian lahan yang ditinggikan disebut galangan/tembokan (*raise bed*), sedangkan wilayah yang digali disebut *tabukan* (*sunken bed*). *tabukan* ditanami padi, sedangkan galangan ditanami tanaman palawija (jagung, kedelai, kacang tanah, kacang hijau, ubi kayu, dan ubi jalar), hortikultura, dan juga tanaman perkebunan (Ismail et al. 1993). Ananto et al. (2000) menyebutkan bahwa luas galangan dan jarak antartembokan berkaitan dengan produktivitas lahan dan tanaman. Pembuatan galangan memerlukan tenaga kerja dan modal yang besar. Oleh karena itu, sebagian petani membuat galangan secara bertahap dengan cara membuat tukang terlebih dahulu. Ruang kosong di antara tukang ditinggikan secara bertahap sehingga nantinya akan membentuk tembokan. Arah galangan disarankan memanjang timur-barat agar tanaman padi pada bagian *tabukan* mendapat penyinaran matahari yang cukup.

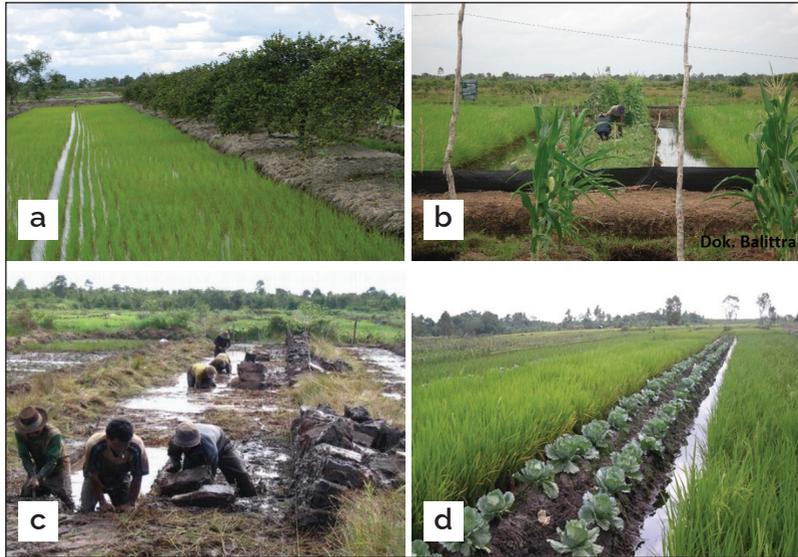


Foto: (a) Balittra (2017); (b) Balittra (2004); (c) Ahmadi Jumberi (2006); (d) Muhammad Noor (2011)

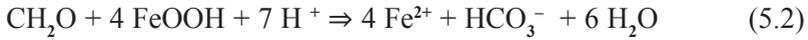
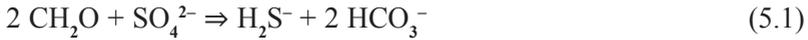
**Gambar 5.11** Sistem surjan dengan pola tanaman tumpang sari padi-jeruk dan padi-melon; pembuatan galangan dilakukan secara manual dan galangan yang berada di sekitar pertanaman padi.

## C. Ameliorasi

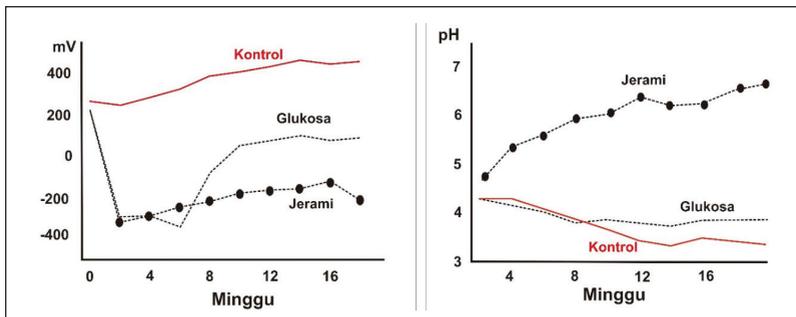
### 1. Pemanfaatan Bahan Organik

Bahan organik adalah sumber energi bagi bakteri pereduksi  $\text{SO}_4$ . Bahan organik memiliki peranan penting dalam pembentukan bahan sulfidik, reduksi sulfat, dan menghasilkan alkali (bikarbonat) (Persamaan 3.21). Bahan organik juga sangat berperan dalam menentukan kelarutan Fe. Bahan organik dapat memengaruhi oksidasi bahan sulfidik melalui konsumsi  $\text{O}_2$  oleh mikroorganisme dekomposer, pembentukan kompleks dengan Fe, dan menyelimuti bahan sulfidik. Bahan organik dapat juga menjadi penyangga dari kemasaman yang dihasilkan saat oksidasi bahan sulfidik, mekanismenya dapat melalui reduksi  $\text{SO}_4$  yang menghasilkan ion-ion alkali, seperti karbonat (Persamaan 5.1 dan 5.2) (Yuan, Fitzpatrick et al., 2015; Kölbl et al., 2017). Hal-hal

tersebut menunjukkan bahwa pengelolaan bahan organik memiliki peran penting dalam reklamasi atau peningkatan produktivitas tanah sulfat masam (Yuan, Marschner et al., 2016).



Pengelolaan ataupun pemanfaatan bahan organik di tanah sulfat masam memegang peranan penting, khususnya terhadap sifat kimia. Walaupun secara umum kadar bahan organik di lahan pasang surut tanah sulfat masam adalah tinggi, khususnya yang berasosiasi dengan tanah gambut, tetapi kadar bahan organik dapat pula menjadi rendah, terutama di beberapa tempat yang mengalami pembakaran atau akibat terangkut melalui hasil panen, tererosi, dan perombakan secara alamiah. Salah satu tujuan pemanfaatan bahan organik adalah untuk menciptakan atau mempertahankan kondisi tanah sulfat masam yang lebih reduktif (Gambar 5.12). Adanya bahan organik dalam tanah pada kondisi anaerob menyebabkan meningkatnya aktivitas mikro-bial tanah yang secara tidak langsung dapat menurunkan kadar  $\text{O}_2$  sehingga terjadi penurunan Eh tanah (Michael et al., 2015; Jayalath, Mosley et al., 2016). Kondisi ini akan menyebabkan bahan sulfidik menjadi lebih stabil.



Sumber: Diolah dari Jayalath, Moesley et al. (2016)

**Gambar 5.12** Nilai Eh dan pH Tanah Akibat Pemberian Glukosa dan Beberapa Jenis Bahan Organik

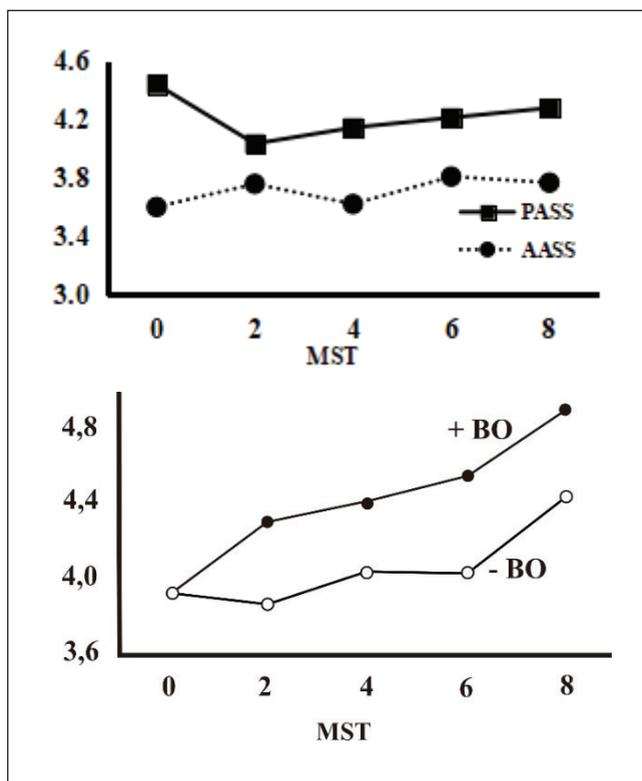
Di sisi lain, bahan organik memiliki pengaruh secara langsung terhadap pH tanah melalui proses pelarutan asam-asam organik yang berpotensi memasamkan tanah atau sebaliknya. Bahan organik dapat menyebabkan penurunan pH tanah sulfat masam melalui proses fermentasi yang menghasilkan asam-asam organik (Gambar 5.12). Pemanfaatan bahan organik untuk meningkatkan pH tanah sulfat masam harus memperhatikan strategi atau teknologi yang tepat. Dang et al. (2015) menyatakan bahwa perbedaan pH tanah sulfat masam dapat disebabkan oleh aplikasi bahan organik dengan kualitas yang berbeda-beda. Michael (2021) melaporkan bahwa aplikasi senyawa organik tidak akan efektif dalam meningkatkan pH tanah sulfat masam jika tidak diikuti dengan pemberian N, atau dengan kata lain bahwa bahan organik yang diberikan harus memiliki kandungan N yang cukup. Aplikasi bahan organik dengan C/N rendah-sedang menyebabkan peningkatan pH tanah selama penggenangan dan menjaga pH tanah menjadi lebih stabil saat kondisi tanah yang lebih oksidatif (Jayalath, Fitzpatrick et al., 2016; Jayalath, Fitzpatrick et al., 2016; Yuan, Mosley et al., 2016). Menurut Kölbl et al. (2017), rendahnya kadar bahan organik yang dapat terdekomposisi menyebabkan *recovery* pH tanah menjadi lambat setelah oksidasi bahan sulfidik. Artinya, dapat dinyatakan bahwa kualitas bahan organik memiliki peranan penting yang sangat menentukan perubahan pH tanah sulfat masam (Sarwani et al., 2006; Yuan, Fitzpatrick et al., 2015; Yuan, Mosley et al., 2016).

Aplikasi bahan organik ke tanah sulfat masam adalah teknologi yang ramah lingkungan, khususnya bahan organik yang aslinya berasal dari lingkungan setempat. Selain memperbaiki pH tanah, bahan organik yang diberikan juga dapat ditujukan untuk mengurangi potensi keracunan Fe atau Al di tanah sulfat masam. Pembasahan kembali ataupun penggenangan kembali tanah sulfat masam yang telah kering, seperti yang terjadi pada awal musim hujan, menyebabkan pelepasan sejumlah besar logam-logam dan asam ke larutan tanah dan perairan bebas (Simpson et al., 2010). Tingginya konsentrasi logam dalam larutan tanah akan mengganggu pertumbuhan tanaman dan biota di sekitar lahan. Aplikasi bahan organik dapat menurunkan

reaktivitas logam dalam larutan tanah. Dang et al. (2016) melaporkan bahwa bahan organik mampu mengikat sejumlah besar kation dan logam dalam *leachate* dari tanah sulfat masam. Untuk tujuan pengendalian keracunan logam, seperti Fe, kualitas bahan organik yang diberikan harus dalam kondisi yang telah terdekomposisi lanjut. Hal ini karena bahan organik juga berpotensi meningkatkan konsentrasi  $Fe^{2+}$  jika diberikan dalam kondisi yang masih relatif mentah ataupun bersifat *decomposable*. Bahan organik mendorong terjadinya reduksi  $Fe^{3+}$  menjadi  $Fe^{2+}$ . Menurut Breemen dan Buurman (2002), tingginya kandungan bahan yang mudah terdekomposisi akan meningkatkan laju proses reduksi. Arah reaksi atau hasil akhir dari aplikasi bahan organik terhadap konsentrasi atau kelarutan logam sangat ditentukan oleh kondisi bahan organik. Kandungan asam humat dan asam fulvat makin tinggi pada bahan organik yang terdekomposisi lanjut. Makin besar molekul, senyawa organik cenderung mengandung lebih banyak gugus fungsional yang mampu menjerap ataupun memfiksasi Fe. Menurut Chen et al. (2014), interaksi antara Fe dan bahan organik tanah akan menurunkan reaktivitas Fe dan menurunkan laju pelarutan Fe (Davranche et al., 2013).

Selain sifat bahan organik itu sendiri, efektivitas pemanfaatan bahan organik untuk memperbaiki tanah sulfat masam juga dipengaruhi oleh sifat tanah. Efektivitas bahan organik yang digunakan untuk memperbaiki tanah sulfat masam harus memperhatikan tekstur, mineral, pH tanah, kadar Fe, dan konsentrasi elektron kompetitor dalam tanah. Tingginya persentase mineral klei (Lutzow et al., 2006) serta kadar logam dan kation (Bohn et al., 2001) dapat mengurangi reaktivitas bahan organik melalui pembentukan ligan, kompleks, dan jembatan kation. pH tanah awal sebelum diberikan bahan organik akan menentukan arah perubahan pH tanah setelah diberikan bahan organik (Rukshana et al., 2011; Jayalath, Fitzpatrick et al., 2016). Hasil penelitian Hairani dan Susilawati (2013) melaporkan bahwa pemberian bahan organik pada tanah sulfat masam yang memiliki pH tanah berbeda menyebabkan pola respons perubahan pH yang berbeda, di mana pemberian bahan organik pada tanah sulfat masam aktual

menyebabkan pH tanah relatif tidak berubah, sedangkan pemberian bahan organik pada tanah sulfat masam potensial menyebabkan pH tanah menurun, walaupun selama percobaan, tanah berada dalam kondisi tergenang (Gambar 5.13).



Keterangan: Dinamika perubahan pH tanah yang terjadi sebagai akibat dari pemberian jerami padi pada tanah sulfat masam aktual (AASS) dan potensial (PASS) (Hairani & Susilawati, 2013) dan perubahan pH tanah selama 8 minggu sesudah tanam (MST) sebagai akibat pemberian jerami padi pada PASS.

Sumber: Diolah dari Fahmi et al. (2009) dan Hairani & Susilawati (2013)

**Gambar 5.13** Dinamika Perubahan pH Tanah

Pengelolaan bahan organik memiliki peranan kunci terhadap pengelolaan lahan rawa sebab bahan organik tidak hanya berperan menjadi salah satu sumber hara (Tabel 5.3), tetapi juga berperan aktif dalam proses biogeokimia dalam tanah. Bahan organik memiliki peranan yang penting terhadap sifat biologi, fisika, dan kimia tanah (Cayuela et al., 2009; McIntyre et al., 2009; Watanabe et al., 2009). Peranan bahan organik tersebut antara lain dipengaruhi oleh jenis dan cara pengelolaannya. Secara umum, diketahui bahwa pupuk kandang ayam memiliki kadar hara yang lebih baik daripada jerami padi. Hasil analisis terhadap data-data yang terkait dengan bahan organik menunjukkan bahwa pengelolaan bahan organik memiliki peranan yang cukup besar terhadap efisiensi ataupun perhitungan kebutuhan pupuk untuk tanaman padi di lahan pasang surut (Tabel 5.5).

**Tabel 5.3** Persentase (%) Unsur Hara dalam Jerami Padi dan Pupuk Kandang Ayam

Bahan organik	C	N	P	K	Ca
Jerami padi	41	0,5–0,8	0,05–0,1	0,3–2,0	0,03–0,17
Pupuk kandang ayam	30–35	1,5	1,2	2,1	2,0

Sumber: Fahmi et al. (2009); Fahmi (2017)

Selain berfungsi menekan kelarutan dan reaktivitas logam, bahan organik dapat berfungsi sebagai sumber unsur hara bagi tanaman. Pada lahan yang sudah menjadi lahan budi daya padi, diusahakan semaksimal mungkin hasil panen yang dibawa keluar dari lahan hanyalah hasil panen dalam bentuk berasnya saja, sedangkan bagian tanaman lainnya harus dikembalikan ke lahan. Hal ini disebabkan pengembalian bahan sisa pertanian, seperti jerami padi ataupun gulma di sekitar lahan, mampu mengurangi kehilangan hara dari tanah. Hal utama yang menjadikan bahan organik memiliki peranan penting bagi perhitungan kebutuhan pupuk untuk tanaman padi dalam bentuk sebuah perangkat lunak DSS salah satunya adalah kandungan hara dari bahan organik tersebut.

Kandungan hara dalam bahan organik sangat ditentukan oleh jenisnya. Watanabe et al. (2009) menyatakan bahwa bahan organik mampu menggantikan sebagian peran pupuk untuk menyumbangkan hara ke tanah. Jerami padi merupakan salah satu sumber utama bahan organik pada tanah sawah yang mengandung 0,6% N; 0,1% P & S; 1,5% K; 5% Si; dan 40% C (Ponnamperuma, 1984) serta 0,26% P; 1,20 % N; dan 2,53% K (Fahmi et al., 2006). Jerami padi juga mengandung unsur mikro, seperti Zn, Si, maupun Fe bagi tanaman padi (Dobermann & Fairhurst, 2002). Adapun gulma yang ada di tanah sulfat masam, seperti purun (*Eleocharis sp*), bura-bura (*panicum repens*), dan kerisan (*Rhynchospora*) menunjukkan kandungan 1,96% N; 0,6% P; dan 0,64% K (Alihamisyah et al., 2004).

Manfaat dari aplikasi jerami ke tanah juga ditentukan dari cara aplikasinya. Banyak penelitian yang dilakukan terhadap perubahan sifat tanah maupun produktivitas lahan akibat metode aplikasi jerami padi. Dobermann dan Fairhurst (2000) menyatakan bahwa membakar jerami relatif dapat meningkatkan ketersediaan unsur K karena jumlah K yang hilang relatif kecil. Akan tetapi, dengan melakukan pembakaran jerami, sebenarnya telah menghilangkan 100% N, 25% P, dan 20% K dari potensi jerami tersebut untuk tanah. Selain itu, pembakaran jerami juga mengakibatkan perubahan sifat fisika dan biologi tanah (Jayakumar, 2012).

Metode pengelolaan jerami lainnya adalah dengan mengembalikannya ke lahan. Metode ini merupakan cara pengelolaan yang terbukti ramah lingkungan dan berkelanjutan. Jerami padi yang dikembalikan dapat berupa kompos atau jerami mentah. Jerami lebih menguntungkan bagi pertumbuhan tanaman karena dengan mengembalikan jerami, berarti kita telah mengembalikan unsur hara yang terkandung dalam jerami padi ke lahan. Menurut Dobermann dan Fairhurst (2000), setiap pemberian 1.000 kg jerami dapat mengembalikan 5–8 kg/ha N; 0,7–1,2 kg/ha P; dan 12–17 kg/ha K. Dengan rata-rata jumlah jerami padi yang dihasilkan dalam satu musim tanam berkisar 5 t/ha, maka hal ini berpotensi meningkatkan efisiensi pemupukan. Hasil simulasi perhitungan dosis pupuk dengan

memperhitungkan metode pengelolaan jerami sisa panen pada beberapa tipe luapan lahan dapat dilihat dalam Tabel 5.5. Ketika jerami padi dikembalikan ke lahan, terjadi efisiensi pemupukan N sebesar 30% atau setara 65 kg/ha Urea, 53% pemupukan P atau setara 63 kg/ha SP-36 dibandingkan jika jerami tersebut diangkut, dan 40% pemupukan P atau setara 47 kg/ha SP-36 jika dibakar dibandingkan jika jerami tersebut diangkut, 58% pemupukan K atau setara 60 kg/ha KCl dibandingkan diangkut, dan 40 kg/ha KCl jika dibakar dibandingkan jika jerami tersebut diangkut (Fahmi et al., 2015).

Manfaat lain dari mengembalikan atau memberikan bahan organik ke lahan secara tidak langsung adalah mengurangi kehilangan hara yang terjadi akibat pencucian sebagai konsekuensi dari adanya sistem tata air. Tidak dapat dipungkiri bahwa penerapan sistem tata air atau pengelolaan air secara tidak langsung juga akan berdampak negatif terhadap kesuburan tanah. Aliran air menyebabkan pencucian unsur hara dari tanah dan membawa unsur hara tersebut keluar ekosistem lahan sebagaimana yang dilaporkan oleh Adimihardja et al. (2006) dan Dong et al. (2012). Mengembalikan atau memberikan bahan organik diharapkan mampu mencegah ataupun mengurangi kehilangan unsur hara melalui proses khelatisasi ataupun fiksasi kation hara oleh senyawa organik. Di sisi lain, bahan organik yang diberikan ke tanah dapat pula mencegah pencemaran lingkungan melalui retensinya terhadap logam-logam potensial pencemar (Dang et al., 2016). Selain itu, keberadaan bahan organik di tanah berhubungan dengan kondisi reduktif tanah yang secara tidak langsung meningkatkan ketersediaan unsur hara. Hal ini disebabkan proses reduksi unsur-unsur seperti Fe juga diikuti proses pelepasan P dan K.

Berdasarkan fakta tersebut, salah satu faktor penting dalam aplikasi bahan organik adalah kualitasnya. Bahan organik yang diberikan harus dalam kondisi yang relatif telah terdekomposisi lanjut atau yang dikomposkan dengan bantuan dekomposer sebagaimana yang dianjurkan oleh Watanabe et al. (2009) dan Fahmi (2013) atau jika diberikan dalam kondisi mentah ke lahan, waktu tanam padi sebaiknya menunggu kondisi bahan organik tersebut terdekomposisi.

Lebih lanjut, kadar lignin dalam bahan organik yang diberikan juga harus diperhitungkan. Bahan organik yang mengandung kadar lignin tinggi akan terdekomposisi sangat lambat sehingga manfaatnya ke tanah juga rendah. Di Kalimantan Selatan dan Tengah, jerami sisa panen dari tahun sebelumnya dimanfaatkan untuk memperbaiki kesuburan tanah. Pengelolaan jerami sisa panen dan gulma dikenal dengan sebutan “*tajak-puntal-balik-ampar*” (*tapulikampar*), yaitu suatu teknologi *indigenous* yang sejatinya adalah sebuah proses pengomposan bahan organik secara alamiah di lahan (Gambar 5.14). Prosesnya diawali dengan memotong jerami dan gulma yang ada di lahan dengan menggunakan tajak (parang panjang yang menyerupai stik golf). Jerami kemudian ditumpuk-tumpuk membentuk gumpalan seukuran bola (*dipuntal*), kemudian tumpukan tersebut dibiarkan di lahan sambil sewaktu-waktu dibalik dan dicincang. Selanjutnya potongan jerami yang sudah relatif membusuk disebarakan ke lahan (*ampar*).

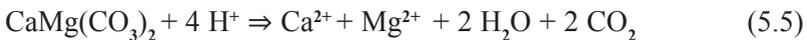


Foto: Arifin Fahmi (2013)

**Gambar 5.14** Teknologi *Indigeneous* Pengelolaan Jerami secara Sederhana (*Tapulikampar*) di Tanah Sulfat Masam oleh Petani Lokal Kalimantan

## 2. Pengapuran

Masalah kemasaman merupakan salah satu kendala paling utama yang dihadapi dalam pengembangan pertanian di tanah sulfat masam. Diketahui pH tanah sulfat masam berkisar antara pH 4 (ordo *entisol*) dan pH <3,5 (ordo *inceptisol*). Kemasaman tanah sulfat masam dipengaruhi oleh faktor-faktor utama, seperti ketersediaan S tereduksi, mineral Fe oksida-hidrooksida,  $\text{SO}_4$ , bahan organik, bahan penetral, dan kondisi hidologis lahan. Menurut Karimian et al. (2017), besarnya perubahan kemasaman tanah sulfat masam ditentukan oleh kadar senyawa S tereduksi dan daya sangga kemasaman tanah. Pada pH <4,5 konsentrasi Al dan Fe mengalami peningkatan yang kemudian diiringi oleh rendahnya ketersediaan hara makro, seperti P, Ca, Mg, dan K untuk tanaman (Notohadikusumo, 2000). Secara umum, diketahui bahwa kemasaman tanah dapat diturunkan dengan pengapuran. Menurut Barber dan Adams (1984), kapur didefinisikan sebagai bahan yang mengandung Ca dan Mg yang memiliki kemampuan menetralisasi kemasaman tanah. Berikut adalah beberapa persamaan reaksi antara kapur dan sumber kemasaman tanah (Ritsem & Groenenberg, 1993).



Berdasarkan persamaan reaksi tersebut, diketahui bahwa (Ahern et al., 2004):

1 mol  $\text{CaCO}_3$  menetralkan 2 mol H (1 mol  $\text{CaCO}_3 = 100,0873 \text{ g}$ )

1 mol  $\text{H}_2\text{SO}_4$  mengandung 2 mol H (1 mole  $\text{H}_2\text{SO}_4 = 98,0795 \text{ g}$ )

Dengan demikian, berdasarkan berat, maka:  $100,0873/98,0797 = 1,0205$ . Secara stoikiometri, diperlukan 1,0205 g  $\text{CaCO}_3$  untuk menetralkan 1 g  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .

Banyak ahli menyatakan bahwa prinsip dasar pemberian kapur pada tanah sulfat masam adalah untuk menekan kemasaman tanah, terutama akibat kelarutan Al yang tinggi dan juga untuk meningkatkan efektivitas pemupukan. Upaya mengatasi kemasaman tanah sulfat masam pertama kali dilakukan oleh seorang ilmuwan Belanda pada tahun 1856. Dia merekomendasikan pemberian kapur untuk mengatasi masalah kemasaman akibat oksidasi bahan sulfidik yang terjadi pada polder “Great Haarlemmermeer” (Pons, 1973). Menurut Zin et al. (2015), pengapuran adalah elemen penting dari reklamasi tanah sulfat masam untuk meningkatkan hasil padi dan cara mitigasi tanah sulfat masam terbaik menggunakan  $\text{CaCO}_3$  (Högfors-Rönholm et al., 2018). Beberapa metode penentuan kebutuhan kapur untuk menurunkan kemasaman tanah yang telah dikenal secara umum adalah berdasarkan produksi kemasaman aktual (*total actual acidity*/TAA), produksi kemasaman potensial (*net acid generation acidity*/NAGP), nilai netralisasi efektif (*effective neutralizing value*) (Fitzpatrick et al., 2008), metode titrasi asam basa, metode penyanggaan, metode Al-dd, dan metode Sanchez dan Salins (Radjagukguk, 2006), serta inkubasi (Suriadikarta & Setyorini, 2006). Secara spesifik, tidak ada metode penghitungan kapur yang dapat diklaim paling tepat sesuai kondisi atau sifat tanah dan kebutuhan tanaman. Walaupun demikian, penghitungan kebutuhan kapur berdasarkan Al-dd dianggap metode yang paling sering digunakan oleh banyak peneliti.

Dent (1992) dan Breemen (1993) menyatakan bahwa untuk menetralkan kemasaman dari 1% S yang dapat teroksidasi dibutuhkan 30 t/ha kapur. Bahkan, menurut Bloomfield dan Powlson (1977), diperlukan 200 t kapur untuk menetralkan kemasaman potensial dari 1% S yang dapat teroksidasi untuk satu ha lahan dengan kedalaman 100 cm. Salah satu cara menghitung kebutuhan kapur berdasarkan kandungan Al-dd adalah sebagai berikut.

Kebutuhan kapur (asumsi kedalaman tanah 20 cm dan  $BV = 1 \text{ g/cm}^3$ ):

1 me Al-dd artinya 1 me Ca/100 g tanah untuk menetralkan 1 me Al/100 g tanah.

$$\begin{aligned} 1 \text{ me Ca/100 g tanah} &= \text{Berat Atom Ca/Valensi Ca} \times \text{me Ca/100 g tanah} \\ &= 40/2 \times 1 \text{ me Ca/100 g tanah} \\ &= 20 \text{ mg Ca/100 g tanah} \\ &= 200 \text{ mg Ca/1 kg tanah} \times 2 \times 10^6 \\ &= 400 \text{ kg Ca/ha} \end{aligned}$$

Kebutuhan kapur = Berat Molekul/Berat Atom Ca x Kebutuhan Ca

$$\text{Kebutuhan CaCO}_3 = 100/40 \times 400 \text{ kg Ca/ha} = 1 \text{ t/ha}$$

$$\text{Kebutuhan CaO} = 56/40 \times 400 \text{ kg Ca/ha} = 0.56 \text{ t/ha}$$

Total kemasaman tanah dihitung berdasarkan penjumlahan dari kemasaman potensial ditambah dengan kemasaman aktual dan dikalikan dengan “faktor koreksi”, yaitu 1,5. Menurut Department of Environment Regulation Western, Australia (2015b) dan Sanchez (1976), faktor koreksi digunakan untuk alasan berikut.

- 1) Dalam kebanyakan situasi, agen penetralisasi tidak sepenuhnya tercampur dengan tanah (terlepas dari metode pencampuran yang digunakan).
- 2) Distribusi sulfida dalam profil tanah dapat sangat bervariasi sehingga ada risiko bahwa perhitungan mengabaikan kemasaman potensial tanah.
- 3) Agen penetralisasi, seperti *fine aglime* (kalsium karbonat), memiliki kelarutan rendah (menurunkan reaktivitasnya) dan pelapisan gipsum, dan/atau senyawa Fe dan Al dapat terbentuk pada butiran agen penetral selama proses netralisasi yang berakibat mengurangi efisiensi penetralisasi.

- 4) Perlunya menetralkan ion  $H^+$  yang dibebaskan oleh bahan organik atau hidroksida-Fe/Al jika pH meningkat. Jika kandungan bahan organiknya makin tinggi, faktor 1,5 dapat ditingkatkan menjadi 2 tau 3 untuk mengantisipasi H-dd.

Pada kondisi tanah yang sangat masam, pengapuran untuk menetralisasi kemasaman akibat oksidasi S sering kali dilarang untuk digunakan pada pertanian biasa. Hal ini disebabkan salah satunya oleh tingginya kemasaman tanah sulfat masam yang mengakibatkan jumlah kapur yang diperlukan untuk menetralsasinya menjadi sangat besar. Seperti yang disampaikan oleh Dent (1992), Breemen (1993), serta Bloomfield dan Powlson (1977), jumlah setara antara 30–200 t/ha menjadikan usaha pertanian menjadi tidak ekonomis. Bahkan, menurut Astrom et al. (2007), Baldwin dan Fraser (2009), serta Dear et al. (2002), upaya pengapuran untuk mengatasi kemasaman dapat menjadi tidak efektif jika bahan sulfidik berada pada lapisan yang jauh dari permukaan tanah, dalam areal yang luas, dan memiliki kadar klei yang tinggi. Walaupun demikian, pemberian kapur tidak harus selalu sebesar jumlah tersebut. Beberapa peneliti menyarankan pemberian kapur pada tanah sulfat masam sekitar 4–6 t/ha (Dent, 1986) atau 6,25–12,5 t/ha (Dhanya & Gladis, 2017). Rekomendasi ini diperkuat oleh hasil penelitian Rosilawati et al. (2014) yang menunjukkan bahwa pemberian 6 t/ha kapur mampu meningkatkan pH tanah sulfat masam menjadi 5 dari sebelumnya berkisar <3,5. Aplikasi sekitar 1 sampai 2 t/ha kapur pada kondisi tanah tergenang dapat efektif untuk mendukung pertumbuhan tanaman padi (Sylla & Touré, 1988; Sylla et al., 1993).

Selain meningkatkan pH tanah, pengapuran juga bisa menyuplai Ca dan menghilangkan toksisitas Al, menangkal kondisi fisik yang buruk akibat pencucian. Pengapuran tanah yang tergenang meningkatkan mineralisasi N tanah dan ketersediaan P. Pengapuran mendorong laju dekomposisi bahan organik oleh mikroorganisme. Pengapuran dapat meningkatkan ketersediaan sebagian besar nutrisi tanaman dan dapat menurunkan kandungan Fe (Ponnamperuma,

1972). Sylla et al. (1993) menunjukkan bahwa adanya interaksi negatif Ca dan Fe dalam mengurangi toksisitas  $Fe^{2+}$  pada padi.

#### D. Pemupukan Anorganik

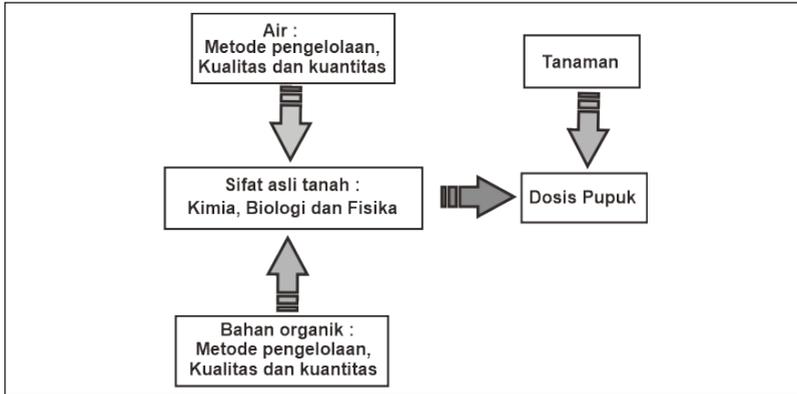
Pada bagian ini, hanya akan dibahas prinsip dari pemupukan anorganik di tanah sulfat masam. Adapun jumlah atau dosis dari pupuk untuk tanaman akan lebih detail dipaparkan pada Bab 7. Pupuk adalah suatu bahan yang ditambahkan ke media tanam atau tanaman untuk mencukupi kebutuhan hara yang diperlukan tanaman sehingga mampu tumbuh dan berproduksi secara optimum. Pemupukan merupakan jalan termudah dan tercepat dalam menangani masalah kahat hara. Namun, bila tidak memperhatikan kaidah-kaidah pemupukan yang benar, pemupukan dapat menjadi tidak efektif dan malah berdampak negatif bagi tanah, lingkungan, dan tanaman. Efektivitas pemupukan dapat ditingkatkan dengan memperhitungkan sifat asli tanah dan faktor-faktor lingkungan yang memengaruhinya, baik secara langsung maupun tidak langsung. Faktor-faktor tersebut dapat bersifat sebagai input ataupun *output* bagi hara di dalam tanah.

Salah satu unsur hara yang paling sering dinyatakan rendah ketersediaannya adalah P. Status ketersediaan hara P pada tanah sulfat masam tergolong rendah sampai sangat rendah. Penambahan pupuk P dengan metode yang kurang tepat menyebabkan upaya peningkatan ketersediaan hara P menjadi sia-sia karena sebagian besar akan hilang tercuci atau terfiksasi dengan kuat oleh komponen tanah. Tingginya konsentrasi Al dan Fe pada tanah sulfat masam menjadi penyebab utama tingginya fiksasi P. Purnomo et al. (2005) dan Fahmi et al. (2005) melaporkan bahwa berkisar 80%–98% dari P yang diberikan ke tanah sulfat masam mengalami fiksasi. Pemberian pupuk dalam bentuk fosfat alam dapat dijadikan sebagai suatu cara untuk menangani masalah ketersediaan P pada tanah sulfat masam. Pupuk fosfat alam adalah bahan galian yang mengandung Ca-P yang disebut apatit  $\{Ca_{10}(PO_4)_6F_2\}$  dalam jumlah besar. Selain mengandung unsur ikutan seperti Ca dan Mg, pupuk ini bersifat *slow release* dan memiliki daya residu yang cukup lama, yaitu sampai 3 tahun. Pupuk ini cocok diberi-

kan pada tanah-tanah masam. Pengaruh fosfat alam tergantung pada mutu dan kadar P-nya serta sifat reaksi yang ditimbulkannya. Dengan demikian, penggunaan fosfat alam menjadi salah satu sumber P sangat efektif dan efisien di tanah sulfat masam, tetapi dalam penerapannya perlu memperhatikan ketersediaannya karena fosfat alam berasal dari daerah yang jauh dari lingkungan tanah sulfat masam, khususnya di Indonesia.

Perhitungan dosis pupuk yang tepat sangat diperlukan guna meningkatkan efisiensi pemupukan. Secara ideal, perhitungan dosis pupuk harus berdasarkan pada neraca hara. Hal ini diperlukan agar tidak terjadi penurunan kualitas lahan di masa yang akan datang sehingga produksi pertanian dapat terus ditingkatkan dan berkelanjutan. Komponen-komponen yang menjadi input ke lahan dan *output* dari lahan harus diperhitungkan dalam menentukan dosis pupuk yang akan diberikan ke tanah dalam satu musim tanam. Beberapa hal yang harus diperhatikan dalam menentukan dosis ataupun pemberian pupuk ditunjukkan dalam Gambar 5.15 dan diuraikan sebagai berikut.

- 1) Jenis/komoditas tanaman.
- 2) Sumber daya bahan organik di sekitar lahan sebagai sumber hara, secara kualitas dan kuantitas.
- 3) Sumber daya air, sebagai sumber hara secara langsung dan tidak langsung bagi tanaman. Selain itu, aliran air drainase juga dapat berdampak pada pencucian hara sehingga pupuk yang diberikan dapat terbuang dari lahan.
- 4) Fase pertumbuhan tanaman. Pemberian pupuk diupayakan bertepatan dengan saat tanaman membutuhkannya agar tidak banyak unsur hara yang hilang tercuci bersama aliran air. Waktu pemberian pupuk yang tepat bervariasi untuk berbagai jenis pupuk dan tanaman. Pupuk N dan P untuk tanaman semusim sebaiknya diberikan paling tidak dua kali, yaitu pada saat tanam dan fase pertumbuhan maksimum (sekitar 1–2 bulan setelah tanam).
- 5) Penempatan pupuk diusahakan di zona perakaran (sinlokalisasi) agar dapat efektif diserap tanaman.



**Gambar 5.15** Faktor-Faktor yang Memengaruhi Kebutuhan Pupuk Tanaman Padi di Tanah Sulfat Masam Lahan Pasang Surut

Sampai saat ini, belum ada satu metode penghitungan dosis pupuk yang dapat dinyatakan paling tepat untuk kebutuhan tanaman, khususnya padi. Secara ilmiah, dosis pupuk sangat ditentukan oleh banyak faktor, baik tanah, air, maupun tanaman. Bahkan, IRRI menetapkan dosis pupuk berdasarkan target hasil yang ingin diperoleh sebagai salah satu faktor penting. Akan tetapi, secara teknis, dosis pupuk dapat pula dipengaruhi oleh faktor sosial, seperti kemampuan keuangan petani untuk membeli pupuk atau ketersediaan pupuk di pasaran. Banyak penelitian yang telah dilakukan untuk menetapkan dosis pupuk untuk tanaman padi. Dinas pertanian di beberapa kabupaten dan petani juga secara mandiri telah berimprovisasi untuk menetapkan dosis pupuk untuk tanaman padi di wilayahnya masing-masing. Sebagian menunjukkan hasil yang mengalami peningkatan dan sebagian lainnya stagnan (Tabel 5.4).

**Tabel 5.4** Dosis Pupuk dan Hasil Tanaman Padi Varietas IR 64 pada Beberapa Tanah Sulfat Masam di Sumatra dan Kalimantan

Lokasi	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg/ha)	K <sub>2</sub> O (kg/ha)	Hasil (t/ha)
Tabunganen, Kalsel	98	63	3,24
Belawang, Kalsel	229	104	3,25
Telang, Sumsel	300	60	4,0
Tatas, Kalteng	135	50	2,4
Lamunti, Kalteng	56	60	2,0

Sumber: Suriadikarta & Setyorini (2006)

Saat ini telah dikembangkan metode pemupukan yang memperhitungkan sifat asli tanah dan faktor-faktor lingkungan yang memengaruhinya, seperti pemanfaatan bahan organik *insitu* dan dinamika hidrologi lahan yang berpotensi menjadi sumber hara atau sebaliknya, berperan sebagai agen pelindi hara. Secara umum, konsep tersebut dapat dikategorikan sebagai “konsep pemupukan spesifik lokasi” yang telah dikembangkan oleh IRRI dan balai penelitian milik pemerintah. Konsep ini memperhitungkan segala sumber daya alam yang terdapat di sekitar lahan dan kebutuhan tanaman akan unsur hara yang dikaitkan dengan target hasil yang akan dicapai. Konsep pemupukan demikian mengacu pada keseimbangan hara yang diperlukan tanaman berdasarkan target hasil yang ingin dicapai dan kemampuan tanah menyediakan hara tersebut. Konsep ini masih sangat terbatas digunakan oleh pengguna di lahan rawa karena keterbatasan data pendukung dan informasi. Di sisi lain, saat ini juga telah dikembangkan sebuah metode penentuan dosis pupuk dengan sebuah aplikasi khusus untuk tanaman padi di lahan rawa lebak ataupun pasang surut. Aplikasi ini dikenal dengan nama *Decission Support sistem* (DSS) atau PATRA pemupukan padi lahan rawa. Sistem ini secara spesifik dalam pembangunannya telah memperhitungkan seluruh aspek lahan yang berpotensi memengaruhi dosis pupuk yang akan diberikan. Berdasarkan model yang dikembangkan, hanya aspek

sistem pengelolaan bahan organik, air, dan tipe luapan lahan yang menjadi faktor-faktor utama dalam menentukan dosis kebutuhan pupuk (Fahmi et al., 2015).

Tipe luapan lahan memiliki peranan penting terhadap tingkat kesuburan tanah sulfat masam. Proses biogeokimia, seperti ketersediaan unsur hara dan kelarutan unsur potensial meracuni, ditentukan oleh kondisi hidrologis atau kelembapan tanah yang tidak bisa dilepaskan dari luapan pasang surut. Pada Tabel 5.5, disajikan sebuah hasil simulasi dari perhitungan dosis pupuk dan kapur dolomit yang diperlukan untuk pertanaman padi berdasarkan tipe luapan lahan dan metode pengelolaan jerami padi sisa panen dengan asumsi sifat tanah yang sama untuk setiap tipe luapan lahan, yaitu kadar N-total 0,7 % (sedang), P (Bray-I) 7,48 ppm (sangat rendah), K-dd 0,23 (sedang), dan pH tanah 4,4 (sangat masam).

**Tabel 5.5** Dosis (kg/ha) Pupuk dan Kapur Dolomit yang Diperlukan untuk Pertanaman Padi Berdasarkan DSS Pemupukan Padi di Lahan Pasang Surut

Pupuk	Cara Pengelolaan Jerami Sisa Panen								
	Diangkut			Dibakar			Dikembalikan		
	A*	B*	C*	A*	B*	C*	A*	B*	C*
Urea	215	265	315	215	265	315	150	200	250
SP-36	117	172	173	70	125	126	54	109	110
KCl	102	103	105	56	58	60	42	43	45
Dolomit	0	700	770	0	700	770	0	700	770

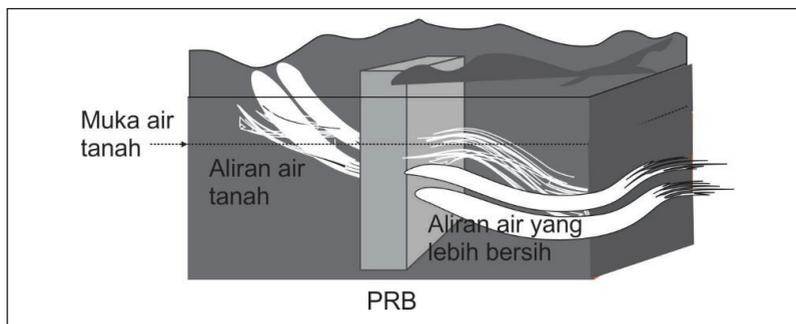
\* = Tipe luapan lahan pasang surut

Sumber: Fahmi et al. (2015)

### E. *Permeable Reactive Barrier*

Teknologi *permeable reactive barrier* (PRB) adalah teknologi yang diutamakan untuk mengurangi kerusakan lingkungan akibat reklamasi tanah sulfat masam. Teknologi yang ditujukan untuk mengatasi permasalahan akibat oksidasi bahan sulfidik telah banyak

dijelaskan dalam bab sebelumnya, yaitu melalui pembuatan pintu air atau pengelolaan air yang mampu mencegah oksidasi bahan sulfidik. Beberapa negara maju menganggap hal tersebut tidaklah cukup dalam perspektif keberlanjutan dan kelestarian lingkungan. Diperlukan suatu teknologi lainnya yang mampu mengatasi masalah kondisi air drainase dari lahan-lahan yang memiliki pH tanah sangat masam dan mengandung logam terlarut dalam konsentrasi yang tinggi. Teknologi PRB adalah terminologi yang relatif baru untuk pengelolaan tanah sulfat masam, khususnya di Indonesia. Teknologi PRB adalah teknologi yang utamanya ditujukan untuk memperbaiki kualitas air, khususnya untuk air drainase (*leachate*) sehingga tidak mencemari lingkungan (Gambar 5.16). Menurut Environmental Protection Agency (EPA) (2020), PRB adalah sebuah dinding/tembok di dalam tanah yang dibuat untuk membersihkan air tanah yang tercemar. Seperti telah kita ketahui bahwa kualitas air di tanah sulfat masam menjadi salah satu permasalahan utama bagi lingkungan, khususnya pada negara-negara maju yang memiliki perhatian serius terhadap kelestarian lingkungan.

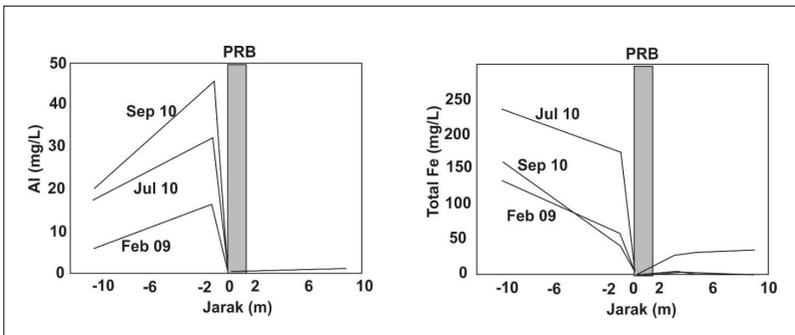


**Gambar 5.16** Ilustrasi Konsep Teknologi PRB untuk Memperbaiki Kualitas Air Drainase di Tanah Sulfat Masam

Sampai saat ini, teknologi ini belum banyak diterapkan di Indonesia karena penerapan teknologi ini memerlukan biaya atau input yang cukup besar sehingga berpotensi menurunkan pendapatan, khususnya bagi petani padi yang sampai hari ini masih tergolong sangat rendah.

Dengan kondisi demikian, penerapan teknologi ini di lahan pertanian tentunya memerlukan perhatian lebih, pengembangan lebih lanjut, dan bantuan dari pemerintah.

Pemanfaatan teknologi PRB telah dilaksanakan di negara tetangga kita, yaitu Australia. Telah banyak penelitian yang mereka lakukan dalam pengembangan teknologi PRB. Beberapa hasil penelitian, baik di laboratorium oleh Pathirage (2014) maupun di lapangan oleh Indraratna et al. (2011) (Gambar 5.17) dan Regmi et al. (2011), telah membuktikan bahwa terjadi peningkatan pH serta penurunan konsentrasi Al dan Fe dalam air tanah yang telah dilewatkan PRB. Menurut Regmi et al. (2009), efektivitas pemanfaatan PRB dalam menurunkan konsentrasi Al dan Fe dalam air tanah mencapai 95%. Secara prinsip, sangat banyak jenis bahan yang dapat digunakan sebagai bahan PRB, baik organik maupun anorganik. Beberapa bahan yang berpotensi digunakan sebagai PRB, antara lain batu kapur, zeolite, cangkang kerang, dan limbah beton (Golab et al., 2009). Hasil penelitian Golab et al. (2009) menunjukkan bahwa pemanfaatan cangkang kerang dan limbah beton mampu meningkatkan pH air di tanah sulfat masam dari 3,0 menjadi 7,0, menurunkan  $SO_4$  dan Fe, serta meningkatkan Ca.



Sumber: Diolah dari Indraratna et al. (2011)

**Gambar 5.17** Konsentrasi Al dan N-total Fe dalam Air Tanah Berdasarkan Jarak Transek dari Titik Penempatan PRB yang Diamati pada Waktu yang Berbeda

## BAB 6

# Pengelolaan Tanah Gambut

Luas lahan gambut di Indonesia sekitar 13.41 juta ha (Anda et al., 2021), tetapi baru sekitar 5 juta ha yang dimanfaatkan, khususnya untuk pertanian. Penggunaan lahan gambut untuk pertanian mulai populer sejak tahun 1969 melalui Proyek Pembukaan Persawahan Pasang Surut (P4S) untuk mendukung program nasional transmigrasi. Puncaknya, pada saat Proyek Pembukaan Lahan gambut (PLG) Sejuta Hektare di Kalimantan Tengah tahun 1995 (Noor, 2010). Sejak tahun 1920-an, masyarakat secara terbatas di Kalimantan Selatan memanfaatkan lahan gambut untuk bercocok tanam padi. Beberapa pihak meragukan pemanfaatan tanah gambut untuk pertanian dapat dilakukan secara berkelanjutan dan menghasilkan keuntungan. Namun, pada kenyataannya, penggunaan tanah gambut makin pesat, khususnya untuk tanaman pangan dan perkebunan kelapa sawit. Oleh karena itu, pengelolaan tanah gambut perlu mendapatkan perhatian serius mengingat potensi dampak negatif yang dapat ditimbulkannya serta potensi dan peluangnya sebagai lahan pertanian alternatif yang dipandang penting dan strategis.

Pengelolaan pertanian di tanah gambut yang baik (*good agriculture practice*) sudah banyak diperbincangkan melalui seminar, lokakarya, grup diskusi, bahkan simposium. Menurut Pons dan Driessen (1975), lahan gambut tidak cocok untuk pertanian, tetapi Stephens dan Speir (1969) berpendapat bahwa tanah gambut dapat digunakan untuk pertanian apabila dikelola dengan baik dan benar melalui pembuatan drainase dan input yang tepat sesuai kebutuhan tanaman. Di beberapa negara, seperti Amerika, Malaysia, dan Tiongkok, tanah gambut digunakan untuk pertanian, baik tanaman semusim, seperti padi, jagung, tebu, sayuran, maupun tanaman tahunan. Menurut Sabiham (2010), pengelolaan tanah gambut untuk pertanian memerlukan kehati-hatian dan persyaratan kriteria yang ketat.

Pengelolaan tanah gambut yang dimaksud dalam buku ini adalah pengelolaan tanah gambut pada lahan gambut yang telah terlanjur dibuka ataupun lahan gambut yang telah dimanfaatkan oleh masyarakat jauh sebelumnya. Sesuai dengan ketentuan perundang-undangan, yaitu PP No. 150 Tahun 2000 tentang Pengendalian Kerusakan Tanah untuk Produksi Biomassa, termasuk lahan gambut; Permentan No. 14 Tahun 2009 tentang Pedoman Pemanfaatan Lahan Gambut untuk Budi Daya Kelapa Sawit; dan PP No. 71 Tahun 2014 (yang diganti dengan PP No. 57 Tahun 2016) tentang Perlindungan dan Pengelolaan Ekosistem Gambut, mensyaratkan penggunaan lahan gambut dengan ketentuan yang tertera pada masing-masing peraturan tersebut.

Tanah gambut yang cocok untuk tanaman pangan, khususnya padi, dicirikan sebagai berikut (Moormann & Breemen, 1978):

- 1) mempunyai lapisan atas (permukaan) yang bercampur dengan tanah mineral setebal 20 cm atau merupakan lahan yang berada di tepi-tepi sungai yang ditutupi endapan dari sungai;
- 2) mempunyai lapisan organik dangkal dengan lapisan bawah (*substratum*) berada pada kedalaman <50 cm; dan
- 3) mempunyai kandungan bahan organik <25%, sesudah mengalami reklamasi atau drainase.

Untuk mencapai kriteria tanah ideal bagi pertanian lahan gambut sangatlah sulit terpenuhi karena sifat inheren gambut yang marginal. Hal ini diperparah dengan adanya sebagian lahan gambut yang pernah mengalami kebakaran sehingga dapat dikategorikan sebagai lahan yang rusak atau terdegradasi (Noor, 2016). Selain itu, perlu dipahami bahwa secara umum, makin tebal, mentah, dan masam gambut, makin tidak subur tanahnya. Selain itu, gambut yang mempunyai lapisan bawah (*substratum*) berupa pasir atau bahan sulfidik juga dinyatakan tidak subur (Noor, 2001).

Tanah gambut yang digunakan untuk budi daya tanaman pertanian sering mengalami kebakaran, terutama pada musim kemarau sehingga terjadi perubahan sifat kesuburan tanahnya. Sebagian besar penyebab kebakaran hutan dan lahan gambut adalah akibat perbuatan manusia, baik yang sengaja melakukan pembakaran untuk membuka lahan ataupun akibat kelalaian dalam menggunakan api (BNPB, 2019; Widiatmoko et al., 2022). Tanah gambut bekas terbakar bersifat hidrofobik dan mengapung (*floating*) di permukaan air yang disebut *ambul* oleh masyarakat Kalimantan Selatan. Tanah gambut dengan kondisi seperti ini menyulitkan bagi akar tanaman padi untuk berjangkar. Oleh karena itu, pertumbuhan dan hasil tanaman pada tanah gambut bekas terbakar ini tidak optimal. Tanah gambut bekas terbakar ini memerlukan perbaikan sifat fisiknya, misalnya dimampatkan (*compaction*) sebelum ditanami atau dengan menurunkan genangan air sampai gambut betul-betul berada di permukaan tanah. Namun, cara terakhir ini memerlukan pendekatan secara makro yang membutuhkan waktu, tenaga, dan biaya yang besar. Pilihan ini tentu bukan pilihan terbaik dan mudah dalam kondisi ekonomi dan finansial yang masih sulit.

Beberapa ketentuan yang bersifat normatif dalam pemanfaatan dan pengelolaan tanah gambut agar berkelanjutan yang perlu mendapatkan perhatian (Noor, 2010; 2016).

- 1) Pemanfaatan tidak mempercepat amblasan (*subsidence*).
- 2) Pemanfaatan tidak menimbulkan pengatusan berlebih (*over drainage*).

- 3) Pemanfaatan tidak menyebabkan pemasaman akibat tereksposnya lapisan bahan sulfidik.
- 4) Pencegahan agar tidak terjadi kering tak balik (*irreversible drying*).
- 5) Menjaga muka air tetap tinggi agar gambut tetap basah.
- 6) Menjaga muka air pada aras (level) sesuai dengan kebutuhan tanaman.
- 7) Menjaga tetap tersimpannya air di dalam tanah gambut sehingga mencegah kebakaran lahan.
- 8) Mempertahankan lengas tanah sehingga kebutuhan tanaman akan air tetap tersedia dan konservasi gambut berlangsung.
- 9) Menghindari pembukaan dan penyiapan lahan (*land clearing*) dengan sistem bakar.
- 10) Menghindari pembuatan saluran terlalu dalam sehingga memacu drainase.
- 11) Menyediakan sepertiga areal pengembangan untuk kawasan hijau atau konservasi air.
- 12) Tidak menimbulkan emisi GRK yang berlebihan.

Tulisan ini adalah rangkuman masalah pengelolaan dan pengembangan pertanian di tanah gambut secara komprehensif dari berbagai sumber atau pihak meliputi berbagai aspek, antara lain pengelolaan air, penataan lahan, dan ameliorasi. Untuk dapat memberikan manfaat yang lebih baik dari segi pertanian maupun keberlanjutan lingkungan, perlu dilakukan langkah-langkah pengelolaan lahan gambut untuk pertanian yang tepat.

## A. Sistem Pengelolaan Air

Pengelolaan air merupakan salah satu faktor penentu keberhasilan dalam pengelolaan tanah gambut, baik untuk pengembangan tanaman pangan, hortikultura, tanaman perkebunan, maupun hutan tanaman industri. Dasar pengelolaan air adalah melakukan upaya pengaturan muka air tanah (*ground water level*) sehingga tanah gambut di bagian permukaan tetap terjaga dalam keadaan lembap (kandungan air

tanahnya selalu di atas batas kritis). Pengelolaan air dimaksudkan tidak hanya untuk penyediaan air untuk tanaman, tetapi juga untuk konservasi gambut itu sendiri agar gambut tidak kering, terutama pada musim kemarau (Notohadiprawiro, 2001). Pengelolaan air di lahan gambut perlu berbasis partisipasi masyarakat. Dengan kata lain, perlu melibatkan masyarakat terkait dengan keinginan mereka mengembangkan lahan gambut untuk pertanian yang sekaligus ditujukan untuk pencegahan kebakaran lahan. Keterlibatan masyarakat harus dilakukan mulai dari tahap perencanaan, implementasi, sampai pada penilaian keberhasilan (Noor, 2013).

Sebagaimana pengelolaan air di tanah sulfat masam, pengelolaan air pada tingkat makro di tanah gambut juga menerapkan sistem anjir, sistem garpu, sistem sisir, dan sistem handil. Penjelasan lebih detail mengenai sistem pengelolaan air tersebut dapat dilihat dalam Bab 5. Adanya kesamaan sistem pengelolaan air ini disebabkan pada prinsipnya sistem pengelolaan air tersebut dibangun dengan tujuan utama untuk pencucian atau irigasi yang mampu menyediakan air dengan kualitas terbaik bagi lahan tanpa memperhatikan jenis tanah. Seiring dengan perkembangan teknologi, kebutuhan air dengan kualitas yang baik pada akhirnya harus dikelola sampai pada skala mikro.

Uraian berikut akan mengemukakan tentang praktik pengelolaan air di tanah gambut untuk pengembangan pertanian, khususnya untuk tanaman pangan (padi, palawija, dan hortikultura), meliputi yang disebut sebagai sistem tata air satu arah, sistem tabat, sistem drainase dangkal, dan sistem drainase parit. Selain itu, dikemukakan juga tentang praktik-praktik pengelolaan oleh petani dan pengaruh pengelolaan air tersebut terhadap geobiofisik-kimia, produktivitas tanaman, dan lingkungan atau emisi GRK.

## 1. Sistem Tata Air Satu Arah

Seperti halnya di tanah sulfat masam, sistem tata air satu arah di tanah gambut merupakan sistem pengelolaan air yang mengatur aliran pada satu arah melalui saluran irigasi (*inlet*) dan kemudian keluar melalui saluran drainasi (*outlet*) dalam satu unit hamparan lahan usaha tani.

Sistem pengelolaan air ini mengatur aliran air masuk (irigasi) dan keluar (drainase) melalui saluran yang berbeda sehingga secara berkala terjadi pergerakan dan pergantian air mengikuti siklus satu arah (Gambar 5.9). Pada muara *inlet*, dipasang pintu air (*flapgate*) semi otomatis yang membuka ke arah dalam dengan memanfaatkan energi pasang. Sebaliknya, pada *outlet* dipasang pintu air semi otomatis yang membuka ke arah luar sehingga menutup apabila pasang dan membuka saat surut. Sebagaimana di tanah sulfat masam, aliran satu arah yang diperlukan dalam pengelolaan tanah gambut dimaksudkan secara khusus untuk mencuci asam-asam organik yang berpotensi meracuni tanaman. Secara operasional dan teknis, tidak terdapat perbedaan yang nyata antara sistem tata air satu arah di tanah sulfat masam dan di tanah gambut sebagaimana dijelaskan dalam Bab 5.

## 2. Sistem Tabat

Sistem tabat adalah pengembangan sekat atau dam kecil. Sistem ini dibangun dengan pemasangan sekat pada saluran tersier atau kuarter agar air tertahan bangunan yang disebut pintu tabat (*dam overflow*) pada muara saluran sehingga muka air di saluran dan lahan usaha tani dapat dipertahankan pada ketinggian muka air tertentu. Ketinggian tabat lebih rendah atau tepat pada muka air yang ingin dipertahankan sehingga saat terjadi luapan pasang (banjir), air melimpas keluar. Pada lahan gambut, tabat juga dapat berfungsi untuk mencegah terjadinya kebakaran karena lahan dapat bertahan basah selama musim kemarau. Pintu tabat dapat dibangun dengan berbagai bentuk dan bahan yang digunakan sesuai kebutuhan (Gambar 6.1). Tuntutan masyarakat yang masih mengandalkan air atau sungai sebagai sarana transportasi, maka pintu tabat dibuat sedemikian rupa untuk mudah dilewati perahu. Tabat cocok untuk daerah pasang surut tipe C dan D yang sekarang dikembangkan dengan menggunakan paralon dan sambungan *elbow* (leher angsa) yang disebut “*taralesa*” (tabat rawa leher angsa).



Foto: (a) Muhammad Noor (2012); (b) Arifin Fahmi (2016)

**Gambar 6.1** (a) Pintu Tabat dari Kayu Meranti yang Dilapisi Terpal dan (b) Pintu Tabat dari Kayu Ulin di Lahan Gambut Pasang Surut

### 3. Sistem Drainase Dangkal

Sistem ini merupakan salah satu cara menyasiasi lahan rawa pasang surut yang biasanya basah menjadi lebih kering sehingga tanaman lahan kering (*drylands crop*) dapat tumbuh secara optimal. Sistem drainase dangkal adalah pembuatan saluran-saluran drainase dangkal di lahan sawah usaha tani. Kerapatan antarsaluran 60–120 m, setiap saluran berdimensi lebar 30–40 cm dan dalam 40–50 cm. Kerapatan dan dimensi tersebut ditentukan oleh tipologi lahan dan tipe luapan pasang surut dan komoditas yang akan ditanam. Masing-masing tanaman memerlukan saluran drainase dengan kedalaman berbeda-beda. Misalnya, palawija memerlukan kerapatan saluran antara 6 sampai 12 m, karet memerlukan saluran drainase dengan kedalaman rata-rata sekitar 20 cm, kelapa memerlukan kedalaman 30–50 cm, kelapa sawit memerlukan kedalaman 40–60 cm, sedangkan kopi dan kakao memerlukan kedalaman 30–50 cm (Masganti et al., 2015). Menurut Singh (1992), pada budi daya kelapa sawit di Teluk Intan, Malaysia, pengerutan (*subsidence*) dan pengeringan lapisan atas dapat ditekan dengan mempertahankan kedalaman muka air tanah pada saluran drainase 50–75 cm dari permukaan tanah. Makin dalam saluran drainase, makin cepat terjadi penurunan permukaan (*subsidence*) dan dekomposisi gambut sehingga ketebalan gambut akan

cepat berkurang dan daya retensinya terhadap air menjadi menurun. Tanaman padi sawah pada lahan gambut hanya memerlukan parit sedalam 10–30 cm (Masganti et al., 2015). Menurut Noor (2001), muka air tanah untuk tanaman padi perlu dipertahankan antara 30–40 cm dan untuk palawija 40–50 cm (Gambar 6.2). Fungsi saluran drainase adalah untuk membuang kelebihan air, menciptakan keadaan tidak jenuh untuk akar tanaman, dan mencuci sebagian asam-asam organik (Noor, 2001). Makin pendek interval/jarak antarparit drainase, makin tinggi hasil tanaman.



Foto: (a) Arifin Fahmi (2018); (b) Arifin Fahmi (2017)

**Gambar 6.2** Sistem Drainase Dangkal untuk Budi Daya Palawija dan Sayuran di Lahan Gambut

Pengelolaan air mempunyai hubungan erat dengan perkembangan sifat-sifat tanah gambut, produktivitas tanaman, dan emisi gas rumah kaca (Noor, 2010). Menurut Alwi et al. (2004), pemasangan tabat pada saluran tersier dapat mempertahankan kadar lengas tanah gambut sebanyak 80%–90%. Vadari et al. (1995) melaporkan bahwa pembuatan saluran drainase dangkal dan kemalir (lebar 40 cm dan kedalaman 30–50 cm) di lahan gambut terbukti memperbaiki sifat fisika dan kimia tanah serta dapat meningkatkan hasil tanaman jagung dan kedelai.

Pengelolaan air juga mempunyai kaitan erat dengan besaran emisi GRK, khususnya C atau CO<sub>2</sub> yang dikhawatirkan memicu terjadinya perubahan iklim dan pemanasan global. Bahan dasar gambut yang

merupakan sisa-sisa tanaman tersusun oleh senyawa C sehingga berpotensi sebagai penyumbang emisi C yang cukup besar apabila kemudian terekspos. Oleh karena itu, pengelolaan air juga merupakan salah satu upaya dari mitigasi dalam menghadapi perubahan iklim.

Pembuatan saluran drainase di tanah gambut tropika disinyalir menimbulkan kehilangan karbon dalam bentuk emisi CO<sub>2</sub> sebesar 355–855 juta t/th, di antaranya 82% dari Indonesia (Hooijer et al., 2010). Joosten (2007) menyatakan bahwa emisi CO<sub>2</sub> gambut Indonesia tertinggi di dunia pada tahun 2008, yaitu setara dengan 500 juta t CO<sub>2</sub>, disusul Rusia yang memiliki tanah gambut lebih luas, tetapi emisi yang dihasilkan hanya mencapai 139 juta t CO<sub>2</sub>. Menurut Hooijer et al. (2010), emisi meningkat sekitar 0,9 t/ha/th CO<sub>2</sub> bila kedalaman drainase bertambah 1 cm. Namun, apabila tanah gambut tersebut dikelola dengan baik, emisi yang dihasilkan bisa lebih rendah. Hasil penelitian Dariah et al. (2013) menunjukkan bahwa tanah gambut yang dikelola untuk kelapa sawit di Provinsi Jambi menghasilkan emisi CO<sub>2</sub> hanya berkisar 34–38 t/th CO<sub>2</sub>. Dengan demikian, salah satu upaya yang efektif dalam menurunkan emisi GRK adalah dengan mengatur atau menjaga kedalaman muka air tanah pada hamparan tanah gambut yang dimanfaatkan.

#### 4. Sistem Drainase Parit

Pada awalnya, peruntukan lahan gambut utamanya untuk konservasi atau budi daya padi sawah sebagaimana dilakukan oleh petani lokal pada lahan di sekitar kediamannya. Introduksi pemanfaatan lahan rawa untuk tanaman perkebunan memerlukan penataan lahan. Tanaman kelapa sawit dan karet mempunyai daya adaptasi yang cukup baik pada lahan gambut, tetapi kurang toleran terhadap genangan. Oleh karena itu, untuk mendapatkan hasil yang optimal perlu penataan lahan yang tepat. Penataan lahan gambut dilakukan dengan membuat parit dengan kedalaman tertentu sehingga muka air tanah menjadi turun (Gambar 6.3). Menurut Permentan No. 14 Tahun 2009, ditentukan bahwa kedalaman dan lebar saluran yang diperbolehkan adalah 1,8–2,5 m untuk saluran primer, 1,2–1,8 m untuk saluran sekunder, dan 0,9–1,0 m untuk saluran tersier.



Foto: (a) Arifin Fahmi (2020); (b) Arifin Fahmi (2008)

**Gambar 6.3** Parit yang Dibuak untuk Menurunkan Muka Air Tanah di Lahan Gambut

## B. Penataan Lahan

Pada awalnya, tanah gambut diperuntukkan untuk budi daya padi atas dasar kuatnya pengaruh rezim air. Namun, dalam perkembangannya, untuk peningkatan hasil pertanian dan pendapatan petani, pemanfaatan tanah gambut tidak cukup hanya dengan mengandalkan hasil padi yang ada kalanya berhasil baik, tetapi juga tidak jarang gagal panen akibat banjir, kekeringan, atau serangan hama dan penyakit tanaman (HPT). Oleh karena itu, dibangun sistem usaha dengan introduksi sistem surjan yang terinspirasi dari sistem pertanian di Pulau Jawa (KEPAS, 1985). Sistem surjan membuka peluang bagi tanaman palawija, hortikultura, dan perkebunan untuk dikembangkan di lahan rawa, termasuk lahan gambut (Nursyamsi et al., 2014).

Dalam upaya peningkatan pendapatan petani di lahan gambut, diversifikasi menjadi pilihan penting sehingga pertanian dapat berkelanjutan secara finansial. Selain itu, dengan penataan lahan dan pengaturan pola tanam dengan sistem surjan dan sistem drainase dangkal, petani dapat terhindar dari “kebangkrutan” usaha tani karena apabila bertanam padi gagal, masih ada tanaman palawija atau sayuran yang dipanen dan dijual (Noor, 2004; Nursyamsi et al., 2014).

Penataan lahan dimaksudkan untuk menciptakan lingkungan tumbuh yang sesuai bagi komoditas tertentu. Tanah gambut umum-

nya memiliki kadar air yang tinggi. Kondisi ini tidak ideal bagi sebagian tanaman budi daya, khususnya palawija. Pada hamparan lahan gambut, untuk menurunkan kelembapan tanah yang tinggi, petani biasanya membuat galangan/bedengan. Sayuran ditanam pada galangan-galangan sepanjang 6–12 m atau lebih dengan tinggi 20–30 cm. Lebar galangan tergantung jenis tanaman. Galangan sayuran kecil dan tidak merambat, seperti bawang daun, caisim, petsai, bayam cabut, dan selada dibuat selebar 1,2 meter. Khusus tomat, cabai, terung, melon, dan semangka, galangan hanya memuat satu atau dua barisan tanaman saja sehingga ukuran galangan menyesuaikan jarak tanamnya. Galangan semacam ini sering pula disebut guludan. Pada musim kemarau, penanaman cabai dan tomat disarankan menggunakan mulsa plastik berwarna hitam yang banyak dijual di pasaran.

Sistem drainase yang tepat dan benar sangat diperlukan pada lahan gambut, baik untuk tanaman pangan maupun perkebunan. Sistem drainase yang tidak tepat akan mempercepat kerusakan tanah, seperti kering tak balik dan subsidens. Salah satu komponen penting dalam pengaturan tata air lahan gambut adalah bangunan pengendali berupa pintu air di setiap saluran.

Menurut Sutikno dan Noor (1997), lahan gambut yang telah dibuka dan digunakan untuk tanaman pangan banyak mengalami penurunan kesuburan karena awalnya para petani transmigran menyamakan tanah gambut layaknya tanah-tanah di Jawa dan Bali. Adanya perubahan beberapa sifat fisika dan kimia serta produktivitas tanah gambut setelah dibuka dan jadi lahan usaha tani padi dalam jangka panjang dari Desa Banyuur (dibuka pada tahun 1920), Gandari (1927), Babat Raya (1977), Pinang Habang (1978), Kolam Kanan (1979), Suryakanta (1981) di Kalimantan Selatan, Kantan Atas (1982), dan Kantan Dalam (1982) di Kalimantan Tengah telah dilaporkan oleh NoorGINAYUWATI et al. (1996). Oleh karena itu, diperlukan upaya pengelolaan yang berkelanjutan dengan memperhatikan sistem pengelolaan dan konservasi air, teknologi budi daya, dan penataan lahan. Dalam praktiknya, dikenal tiga bentuk penataan lahan, yaitu sistem surjan, sistem tukang, dan sistem sawah.

## 1. Sistem Surjan

Sistem surjan adalah pengembangan penataan lahan dengan meninggikan sebagian lahan agar tidak terluapi pasang pada saat musim tanam. Pada musim hujan, kebanyakan lahan rawa tergenang atau terluapi pasang sehingga tanaman budi daya, khususnya tanaman yang berasal dari lahan kering, seperti palawija, memerlukan keadaan kering agar dapat tumbuh dengan baik.

Menurut Nursyamsi et al. (2014), sistem surjan dapat dipilih menjadi tiga model, yaitu model galangan dengan tukang, galangan tanpa tukang, dan galangan bertahap yang terakhir dibangun dari asal mula tukang (Gambar 5.11). Dimensi galangan umumnya lebar atas 3 m, lebar bawah 3,5 m, dan tinggi rata-rata 1 m, tergantung pada tipe luapan. Untuk lahan rawa pasang surut tipe luapan A, tinggi yang ideal adalah 90 cm, tipe luapan B tinggi 75 cm, dan tipe luapan C tinggi 60 cm. Pada sistem surjan, padi ditanam pada bagian bawah atau *tabukan*, sedangkan tanaman palawija, hortikultura, atau tanaman tahunan (jagung, kedelai, jeruk, pisang, cabai, tomat, kelapa, atau karet) ditanam pada bagian galangan atau tukang. Jenis komoditas yang ditanam dapat berbeda antara petani satu dan lainnya. Jenis komoditas yang ditanam menyesuaikan dengan tipe luapan dan tipologi lahan.

Sistem surjan dengan tambahan tukang untuk menghindari genangan pada saat pasang tinggi banyak diterapkan pada daerah rawa pasang surut tipe luapan A. Model surjan bertahap diterapkan dengan pembuatan tukang terlebih dahulu sebagai tahap awal. Kemudian, sambil menunggu besarnya tanaman, luas tukang diperpanjang dan setelah tanaman berumur 4–5 tahun, tukang disatukan sehingga akhirnya antara tukang satu sama lain yang sebaris disatukan membentuk galangan. Jarak antargalangan adalah 14 m agar traktor dapat bekerja dengan mudah. Galangan dibuat memanjang, biasanya setengah dari panjang kepemilikan lahan (100 m) atau sepanjang lahan, seperti kebanyakan petani lokal dengan lahan yang lebih panjang (200 m), galangan biasanya sekaligus berfungsi sebagai batas kepemilikan lahan. Komoditas yang diusahakan, selain

padi, palawija, atau sayur, dapat juga diperkaya dengan pemeliharaan ikan pada saluran yang membatasi galangan atau tukang (8,5–9,0 m) yang disebut dengan sistem keren (Noor, 2014).

Pembuatan dan perkembangan galangan menunjukkan adanya perubahan pada sifat-sifat fisika, kimia, dan biologi tanah. Dilaporkan bahwa kematangan tanah bagian atas galangan lebih cepat dibandingkan bagian bawah karena pembasahan atau genangan secara berkala pada bagian bawah, khususnya yang ditanami kelapa dan rambutan dibandingkan nangka dan petai (Notohadiprawiro, 1979). Galangan mempercepat pelapukan (dekomposisi) pada lahan gambut. Apabila tanah yang digali untuk galangan masih mentah, amblasan (subsidence) menjadi sangat tinggi (Nursyamsi et al., 2014). Dilaporkan bahwa pembuatan galangan menimbulkan terjadinya pemasaman tanah pada saat awal. Untuk menyasiasi hal ini, petani biasanya memberikan bahan amelioran kapur untuk meningkatkan pH tanah sebelum ditanami.

## 2. Sistem Tukungan

Sistem tukungan merupakan penataan lahan dengan membuat/meninggikan sebagian lahan dengan membentuk bujur sangkar (kubus) atau kerucut yang disebut tukungan (Gambar 5.11). Tukungan dibuat dengan mengambil tanah di sekitarnya sehingga pada bagian atas tukungan dapat ditanami tanaman lahan kering seperti palawija/hortikultura, seperti jagung, kedelai, ubi, jeruk, cabai, tomat, dan sebagainya. Dimensi tukungan umum di lahan rawa, antara lain lebar atas 2 m, lebar bawah 2,5 m, dan tinggi rata-rata 50 cm, tergantung tipe luapan. Untuk lahan rawa pasang surut tipe luapan A, tinggi tukungan adalah 90 cm, tipe luapan B tinggi 75 cm, dan tipe luapan C tinggi 60 cm. Tukungan dapat berbentuk kubus (empat persegi) juga dapat dalam bentuk kerucut (limas), tergantung kondisi tanah. Tukungan disebut juga sebagai tahap awal pembuatan galangan karena umumnya tukungan diperluas dan ditinggikan mengikuti pertumbuhan tanaman sehingga apabila tanaman sudah berumur 4 atau 5 tahun, tukungan kemudian dipersatukan atau disambung satu sama lain sehingga menjadi galangan.

Praktik pembuatan tukang atau galangan tidak disarankan pada tipologi gambut sedang (ketebalan gambut  $>1$  m) karena akan mempercepat keringnya gambut sehingga rentan akan risiko kebakaran. Adapun pada lahan gambut yang pada lapisan bawahnya berupa lapisan bahan sulfidik, pembuatan galangan dibatasi untuk tidak sampai mengambil atau menyingkap lapisan bahan sulfidik. Pembuatan galangan sebaiknya untuk tanah bagian atas diambil dari lapisan atas (*topsoils*) dan bagian bawahnya diambil dari tanah lapisan bawah (Gambar 5.10). Namun, praktik ini sulit dilakukan. Dalam tradisi petani, penyusunan lapisan tanah untuk galangan tanah bagian bawah diambil dari permukaan tanah di sampingnya, kemudian ditumpuk berlapis sehingga tanah bagian bawah menjadi bagian atas galangan. Hal ini menyebabkan bagian lapisan atas bercampur dengan tanah bagian bawah (*subsoils*) yang kadang-kadang berupa lapisan bahan sulfidik (Noorsyamsi et al., 2014).

### 3. Sistem Sawah

Sistem sawah merupakan salah satu bentuk penataan lahan yang biasanya dalam praktik pembukaan lahan disebut percetakan sawah. Percetakan sawah meliputi kegiatan penebangan, pembersihan lahan dari pohon, semak, dan belukar (*land clearing*), perataan lahan permukaan, baik dengan tenaga manusia atau dengan bantuan alat *escavator* dan/atau traktor, pembuatan galangan, pembuatan saluran drainase atau saluran kemalir dan saluran keliling, serta perataan permukaan lahan (*levelling*). Dalam percetakan sawah ini, seyogianya juga dirancang sistem jaringan tata air berupa saluran dan kemalir-kemalir beserta pintu-pintu air (*stoplog*). Saluran kemalir dapat buat untuk mempercepat penurunan air ke saluran pembuangan (*outlet*) sekaligus berfungsi sebagai pencucian (*leaching*) ion atau senyawa meracun hasil oksidasi bahan sulfidik atau asam-asam organik yang larut. Penelitian Noor dan Saragih (1993) di lahan rawa pasang surut tipe luapan B menunjukkan adanya perbaikan tata air dengan sistem satu arah dapat mencapai kenaikan hasil tani rata-rata 60% pada musim kemarau dan 150% pada musim hujan hingga mencapai rata-rata 4 t/ha/musim GKG. Penelitian Harsono (2010) di Delta Air

Saleh, Sumatra Selatan menunjukkan bahwa sistem tata air satu arah meningkatkan hasil padi dari semula 2,39 menjadi 5,59 t/ha/musim GKG dan perbaikan kemasaman tanah dari pH 4,33 menjadi pH 5,59.

Dalam praktiknya, pengelolaan air oleh di petani di Kalimantan Tengah disebut dengan sistem *tatah*, yaitu mengalirkan air dari sungai ke lahan melalui saluran alami yang sudah tersedia (*tatah*). Kemudian, untuk mengalirkan dan mendistribusikan air ke lahan sawah, dibuatlah parit dan pintu air (*tabat*). Parit keliling berukuran lebar 40 cm dan dalam 50 cm. Pada bagian tengah petak sawah, dibuat saluran cacing (*kemalir*) yang membagi lahan menjadi 4 bagian dengan ukuran lebar dan dalam sekitar 20 cm × 20 cm, berfungsi untuk mempercepat aliran air keluar apabila hujan (Maftu'ah et al., 2014; Umar et al., 2014).

### C. Ameliorasi

Ameliorasi lahan adalah sebuah upaya memberikan bahan baru ke tanah dengan tujuan memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah sehingga pertumbuhan dan produksi atau hasil tanaman dapat ditingkatkan. Artinya, suatu amelioran dapat bersifat atau berfungsi sebagai pupuk dan/atau bahan pembenah tanah (Fahmi & Khairullah, 2018). Pupuk memiliki pengertian setiap bahan organik atau anorganik alami atau sintetis yang ditambahkan ke tanah untuk secara nyata memasok satu atau lebih unsur hara penting untuk mendukung pertumbuhan tanaman. Dengan kata lain, tujuan utama pupuk adalah untuk menyediakan unsur hara yang cukup dan seimbang bagi tanaman. Adapun pembenah tanah adalah bahan organik atau anorganik alami atau sintetis yang dapat mengandung sejumlah terbatas unsur hara, dikelola utamanya untuk memperbaiki sifat biologis, fisik, atau kimia tanah. Pada kondisi tertentu, bahan tersebut dapat juga digunakan sebagai media pertumbuhan tanaman. Bahan-bahan tertentu memiliki sifat yang memungkinkan digunakan sebagai keduanya, yaitu baik sebagai pupuk maupun pembenah tanah. Pada kondisi ini, maka bahan tersebut harus dikelola sebagai pupuk.

## 1. Aplikasi Bahan Pembenah Tanah

Tanah gambut dikenal memiliki pH yang sangat rendah. Rata-rata pH 3,3 pada gambut ombrogen yang berada di sekitar kubah (*dome*) dan makin tinggi menuju tepi sungai. Lahan gambut (*topogen*) yang berada di dekat sungai umumnya mempunyai pH 4,0–4,5. Salah satu cara untuk memperbaiki kemasaman gambut adalah dengan ameliorasi tanah, seperti kapur pertanian (*kaptan*) atau dolomit yang besarnya tergantung tingkat kemasaman. Pemberian amelioran untuk meningkatkan pH dan memperbaiki media perakaran tanaman adalah penting dan mutlak. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemberian 4 t/ha kapur dapat menurunkan kemasaman tanah gambut dari pH 3,3 menjadi pH 4,5–4,8. Amelioran berupa kapur, tanah mineral, pupuk kandang, dan abu sisa pembakaran dapat meningkatkan pH dan basa-basa tukar (Salampak, 1999; Mario, 2002; Masganti et al., 2003). Namun, peningkatan pH tanah gambut cukup sampai pH 4,5 atau pH 5,0 saja karena gambut tidak memiliki potensi Al yang beracun.

Walaupun pH 6,0 adalah ideal bagi tanaman padi, tetapi pemberian kapur berlebihan (*overliming*) untuk mencapai nilai tersebut dapat merusak gambut dan juga tidak selalu dapat meningkatkan hasil tanaman (padi). Peningkatan pH >5 dapat mempercepat laju dekomposisi gambut (Noor, 2001). Pengaruh buruk asam-asam organik beracun dapat dikurangi dengan menambahkan bahan-bahan amelioran yang banyak mengandung kation polivalen, seperti terak baja, tanah mineral laterit, atau lumpur sungai (Salampak, 1999; Sabiham & Ismangun, 1997; Masganti et al., 2002).

Ameliorasi di lahan gambut sejak awal diterapkan melalui program pembukaan lahan rawa atau optimalisasi lahan. Namun, setelah kepemilikan lahan diserahkan kepada petani setelah 2 atau 2,5 tahun masa jaminan hidup, sebagian besar petani tidak melakukan ameliorasi. Pupuk sering diberikan dengan tidak sesuai rekomendasi. Alasan petani tidak melakukan ameliorasi sesuai rekomendasi secara penuh, antara lain karena tidak mampu membeli pupuk atau kapur, pupuk atau kapur tidak tersedia di tempat, serta adanya anggapan lahan telah cukup subur sehingga kadang-kadang hanya dipupuk setengahnya atau seadanya.

Praktik-praktik ameliorasi pada beberapa lokasi sering mengan-dalkan abu dari hasil pembakaran serasah dan tonggak-tonggak kayu, batang, ranting, dan semak-semak yang banyak tersedia di lokasi. Abu tersebut dianggap sebagai pupuk yang pada dasarnya bersifat sementara karena bahan mineral dari abu tersebut akan terlarut atau tercuci dan hilang bersamaan dengan aliran permukaan.

Beberapa negara mempraktikkan pencampuran tanah gambut dengan tanah mineral dapat dikategorikan sebagai tindakan ameliorasi atau upaya perbaikan sifat-sifat tanah gambut. Misalnya, di Jerman, tanah mineral di sekitar tanah gambut dicampurkan setebal 10–12 cm di bagian atas gambut (setara dengan 1000–1200 m<sup>3</sup>/ha), tanpa diaduk. Di Belanda, petani mencampurkan tanah mineral yang ada di bawah lapisan tanah gambut dengan mengaduknya merata hingga kedalaman 40 cm. Di Rusia, tanah mineral dicampurkan dengan menyebarkannya di atas permukaan gambut setebal 3–4 cm atau setara 300–400 m<sup>3</sup>/ha (Hartatik & Suriadikarta, 2006). Di Indonesia, petani di Kalimantan Barat memberikan abu hasil pembakaran berbagai serasah, ranting kayu, patok-patok sisa pohon kayu, kotoran ayam/babi/sapi, dan sampah ikan pada lubang-lubang tanam sayurannya. Peringkat urutan bahan amelioran yang memberikan pengaruh nyata, yaitu abu gergaji > abu gergaji+terak baja > dolomit > dolomit+terak baja. Hartatik et al. (1995) melaporkan bahwa untuk tanaman jagung di tanah gambut Air Sugihan, Sumatra Selatan, pemberian 5–10 t/ha abu (gergaji) dapat memberikan hasil 3,9–4,5 t/ha.

Penambahan bahan amelioran penting dan perlu untuk stabilitas bahan gambut agar sumber pelepasan C, utamanya dari gugus fungsional, dapat berinteraksi dengan bahan aktif amelioran (kation logam) membentuk ikatan kompleks (*organo-metal complexes*) sehingga menjadi lebih tahan (stabil). Asam organik monomer dalam bahan gambut, terutama dari bentuk fenolat, sebagian dapat menjadi bersifat racun bagi tanaman yang diusahakan (Sabiham & Ismangun, 1997). Dalam upaya perbaikan atau peningkatan kesuburan tanah gambut, para peneliti di negara-negara Eropa dan Jepang telah memberikan bahan pembenah tanah, misalnya tanah mineral, tanah mineral kaya

Fe, dan lumpur laut (Hartatik & Suriadikarta, 2006). Pencampuran tanah mineral berkadar Fe tinggi yang ditujukan untuk peningkatan status hara tanah, pertumbuhan, dan produksi tanaman padi dilaporkan oleh Halim (1987), Salampak (1999), dan Sagiman (2001).

Miyake (1982) melaporkan bahwa pemberian tanah mineral setebal 6 cm atau setara 600 t/ha pada tanah gambut di Hokaido dapat meningkatkan hasil padi hingga 4,3 t/ha. Halim (1987) melakukan pencampuran tanah gambut Sumatra dengan tanah mineral dari tanggul sungai (*levee*) sebesar 16 t + 3 t dolomit + 1,5 t kalsit + 80 kg/ha tanah mineral mengandung Fe dan terjadi peningkatan hasil kedelai sebesar 1,7 t/ha. Rahim et al. (1995) melaporkan bahwa pemberian tanah berpirit sebanyak 20% bobot dari tanah gambut dapat meningkatkan hasil padi dan jagung, tetapi apabila takaran campuran tanah berpirit menjadi 40%, justru terjadi penurunan hasil karena meningkatnya jumlah gabah hampa. Sagiman (2001) melaporkan bahwa pemberian lumpur laut 7,5% pada tanah gambut Kalimantan Barat dikombinasi dengan 3 t/ha kapur dapat meningkatkan hasil kedelai. Salampak (1999) melaporkan bahwa pemberian tanah mineral berkadar Fe tinggi pada tanah gambut dapat menurunkan kadar asam fenolat sekitar 30% dan meningkatkan hasil padi dari 0,73 t/ha menjadi 3,24 t/ha. Mario (2002) melaporkan bahwa pemberian tanah mineral berkadar Fe tinggi pada tanah gambut Kalimantan Tengah yang dikombinasi dengan terak baja dapat menurunkan kadar asam fenolat. Program pemberian tanah mineral juga pernah diterapkan pada tanah gambut di Desa Kelampangan, Kalimantan Tengah pada sekitar tahun 1982-an untuk tanaman kedelai dan jagung.

## 2. Pengaruh Ameliorasi Terhadap Emisi Gas Rumah Kaca

Pemberian bahan amelioran di tanah gambut sangat berpengaruh terhadap tingkat emisi GRK, khususnya CO<sub>2</sub>. Hasil penelitian Setyanto et al. (2014) menunjukkan bahwa pemberian bahan amelioran pada tanaman perkebunan, terutama pemberian pupuk kandang sapi, pupuk gambut, dan tandan kosong sawit, dapat meningkatkan pelepasan GRK. Namun, emisi CO<sub>2</sub> pada tanaman sela (nanas) justru

menurun dengan pemberian bahan amelioran tersebut. Pemberian tandan kosong paling efektif menurunkan emisi CO<sub>2</sub> mencapai 25% dibandingkan tanpa bahan amelioran di tanah gambut Provinsi Riau (Setyanto et al, 2014). Pada penelitian tanah gambut Jambi, pupuk kandang menunjukkan hasil paling baik dalam menurunkan emisi CO<sub>2</sub> (Tabel 6.1). Pemberian bahan amelioran pada tanah gambut dengan tanaman jagung di Provinsi Kalimantan Barat juga menunjukkan pengaruh positif terhadap penurunan emisi CO<sub>2</sub> (Tabel 6.2).

**Tabel 6.1** Pengaruh Ameliorasi Lahan terhadap Fluk CO<sub>2</sub> pada Tanah Gambut di Riau, Jambi, dan Kalimantan Tengah

Jenis Amelioran	Emisi CO <sub>2</sub> (t/ha/tahun)		
	Piringan	Tanaman Sela	Piringan+Sela <sup>1)</sup>
<b>Riau</b>			
Kontrol	28+ 6	28+ 12	28+9
Pupuk kandang	35 + 13	23+ 8	25+9
Pupuk gambut	41+ 12	28+ 8	31+7
Tandan kosong sawit	29+ 4	27+ 9	17+8
Cara petani	32+ 5	33 + 14	33+9
<b>Jambi</b>			
Kontrol	27 + 9	13 + 2	16 +1
Pupuk kandang	19 + 3	17 + 11	17 +9
Pupuk gambut	26 + 5	17 + 6	19 + 4
Tandan kosong sawit	18 + 3	11 + 2	12 +1
<b>Kalimantan Tengah</b>			
Kontrol	17+ 5	21+ 4	20+4
Pupuk kandang	21+ 3	22+ 5	22+5
Pupuk gambut	21+ 9	18+ 4	19+5
Tanah mineral	17+ 8	20+7	19+7
Cara petani	14 + 3	–	–

<sup>1)</sup> Asumsi proporsi luasan dan sela adalah 20% dan 80%, maka emisi CO<sub>2</sub> total= (0,2 x emisi CO<sub>2</sub> piringan)+(0,2 x emisi CO<sub>2</sub> tanaman sela).

Sumber: Setyanto et al. (2014)

**Tabel 6.2** Pengaruh Ameliorasi Lahan terhadap Fluk CO<sub>2</sub> pada Lahan Gambut di Kalimantan Barat

Jenis Amelioran	Emisi CO <sub>2</sub> (t/ha/tahun)	
	Jagung <sup>1)</sup>	Nanas <sup>1)</sup>
Kontrol	2,2 ± 0,6	11,9 ± 5,0
Pupuk kandang	2,4 ± 0,8	15,2 ± 4,4
Pupuk gambut	2,7 ± 1,0	15,3 ± 6,4
Dolomit	2,4 ± 0,5	10,8 ± 1,9
Cara petani	2,2 ± 0,7	11,3 ± 1,9

<sup>1)</sup> Umur panen jagung 3 bulan, sedangkan nanas 8 bulan

Sumber: Setyanto et al. (2014)

Selain dipengaruhi oleh komoditas yang ditanam, tingkat emisi GRK juga dimungkinkan oleh sifat dan jenis gambut dari masing-masing tempat yang berbeda. Tanpa memperhatikan jenis komoditas, tingkat emisi CO<sub>2</sub> rata-rata dari gambut di Kalimantan Barat jauh lebih kecil dibandingkan Provinsi Riau, Jambi, dan Kalimantan Tengah. Kemudian, apabila tanpa memperhatikan jenis gambut, emisi CO<sub>2</sub> paling rendah adalah pada tanaman jagung, disusul nanas, karet, dan kelapa sawit.

#### D. Pemupukan Anorganik

Sifat-sifat fisika, kimia, dan biologi tanah gambut memerlukan perbaikan. Pemberian hara sebagai tambahan untuk meningkatkan kesuburan tanah gambut adalah sebuah keniscayaan. Pemupukan diperlukan karena status hara makro (N, P, dan K) dan mikro (Cu, Zn, B, dan Mo) tanah gambut umumnya rendah. Unsur hara utama yang perlu ditambahkan untuk tanaman pangan, hortikultura, maupun tanaman tahunan di tanah gambut adalah unsur P dan K. Unsur hara lainnya, seperti N, dibutuhkan dalam jumlah yang relatif rendah karena dapat tersedia dari proses dekomposisi gambut dan bahan organik. Akan tetapi, N juga penting sebagai *starter* sehingga tetap

diperlukan, meskipun dalam jumlah yang sedikit. Menurut Fahmi et al. (2012), gambut dan material organik yang selalu ditambahkan dari sisa-sisa makhluk hidup di atasnya merupakan salah satu sumber N di lahan gambut. Beberapa hasil penelitian menunjukkan bahwa pemberian bahan pembenah tanah dan pupuk secara lengkap, termasuk hara mikro (Cu dan Zn), dapat meningkatkan hasil dan kualitas tanaman (Hartatik et al., 1995; Anwar & Alwi, 2000; Hartatik & Suriadikarta, 2006). Kapur atau dolomit yang diperlukan berkisar antara 0,5 sampai 2,0 t/ha, tergantung tingkat kemasaman tanahnya (Noor, 2001). Hartatik et al. (1995) melaporkan bahwa pemberian abu gergaji+terak baja dan dolomit+terak baja dikombinasi dengan pupuk P dan K pada tanah gambut Siantan, Kalimantan Barat dapat meningkatkan pH tanah, kation tertukar Ca, Mg, K, dan P tersedia. Kombinasi 40 kg/ha P, 50 kg/ha K, dan abu gergaji dapat meningkatkan hasil kedelai hingga sebesar 1,2 t/ha. Anwar dan Alwi (2000) menganjurkan untuk tanaman kedelai di tanah gambut dangkal pemberian 135 kg/ha N, 90 kg/ha  $P_2O_5$ , dan 90–120 kg/ha  $K_2O$  secara tugal atau pemberian 0,5 t/ha CaO, 300 kg/ha abu dari sekam atau limbah gergaji, 300 kg brangkasian yang dipotong kecil-kecil, serta pupuk mikroba biofosfat atau rhizoplus untuk perlakuan benih.

Pemberian pupuk P dalam bentuk mudah larut sering kali tidak memberikan respons yang nyata. Hal ini disebabkan sebagian P tercuci dan tidak diserap tanaman (Hartatik & Suriadikarta, 2006). Pemberian fosfat alam pada tanah gambut Kelampangan, Kalimantan Tengah menunjukkan respons terhadap hasil jagung lebih baik dibanding dengan SP-36 (Subiksa et al., 1997). Secara umum, pertanaman padi di tanah gambut membutuhkan pupuk sebanyak 45–125 kg/ha N (setara 100–250 kg/ha Urea), 45–60 kg/ha  $P_2O_5$  (setara 125–170 kg/ha SP-36), 25–50 kg/ha  $K_2O$  (50–100 kg/ha KCl), 2–5 kg/ha Cu, dan 2–5 kg/ha Zn. Pemberian pupuk dengan dosis tersebut dapat diganti dengan jenis pupuk majemuk (NPK) yang disesuaikan dengan dosis tersebut dan diperkaya dengan pupuk organik atau pupuk hayati. Dilaporkan bahwa pemberian bahan amelioran atau pupuk organik atau sejenisnya dapat meningkatkan emisi  $CO_2$  (Subiksa, 2013).

Rekomendasi pupuk dan kapur yang disarikan dari berbagai hasil penelitian dan pengalaman petani dalam budi daya tanaman pangan, seperti padi, jagung, kedelai, kacang tanah, dan ubi kayu disajikan pada Tabel 6.3. Pada tanaman hortikultura, petani sering memberikan pupuk kandang atau pupuk organik, sedangkan pada tanaman perkebunan umum diberikan pupuk yang lepas lambat (*slow release*), seperti fosfat alam (Noor, 2001).

**Tabel 6.3** Rekomendasi pupuk di lahan gambut untuk budi daya tanaman pangan.

Kapur (t/ha) dan pupuk (kg/ha)	Komoditas					
	Padi Lokal*)	Padi Unggul	Jagung	Kedelai	Kacang Tanah	Ubi kayu
Kapur	0,0–0,5	0,5–2,0	0,5–1,0	0,5–1,5	1,0–2,0	0,5–1,0
N	20–40	45–125	60–90	30–45	30–45	25–50
P (P2O5)	15–30	45–60	45–60	45–60	45–90	45–60
K (K2O)	0	25–50	25–50	45–60	45–60	60–120
Cu (CuSO4)	0	0	2–5	2–5	0	0
Zn (ZnSO4)	0	0	0	0	0	0
B	0	0	5–10	2–5	0	0
Mo	0	0	0	0,01–0,05	0	0

\*)petani sering menambahkan abu sekam dan garam dapur untuk sawahnya

Sumber: Noor (2001)

## **BAB 7**

# **Budi Daya Tanaman di Tanah Sulfat Masam**

### **A. Kendala Budi Daya Tanaman di Tanah Sulfat Masam**

Kendala agronomis yang dihadapi pada tanah sulfat masam untuk meningkatkan produksi tanaman pangan, tanaman perkebunan, dan tanaman hortikultura utamanya berkaitan dengan kondisi fisik-kimia tanah dan kondisi tata air. Tingkat kesuburan tanah yang rendah berakibat pada rendahnya hasil tanaman yang diusahakan. Tanaman pangan, khususnya padi yang merupakan komoditas paling luas dibudidayakan, akhir-akhir ini makin terdesak oleh komoditas lain, terutama kelapa sawit. Budi daya padi di tanah sulfat masam umumnya masih bersifat tradisional yang diusahakan sekali setahun dengan menggunakan sistem tanam pindah, varietas lokal, pupuk terbatas, dengan produktivitas rendah antara 1,5–2,0 t/ha GKG (Khairullah, 2007; Saragih & Nurzakiah, 2011). Sedangkan padi unggul dengan input dan pengelolaan yang baik produktivitasnya dapat mencapai 4,80–6,61 t/ha GKG (Widjaja-Adhi & Alihamsyah, 1998; Balittra, 2013). Walaupun tanah sulfat masam memiliki sifat marginal, selain

peluang untuk peningkatan produktivitas, intensitas pertanaman (IP) juga berpotensi ditingkatkan pada beberapa lokasi. Peningkatan IP menjadi 2 atau 3 (IP 200–300) memerlukan dukungan, antara lain revitalisasi jaringan tata air makro, jaringan tata air mikro pada hamparan persawahan yang baik, varietas yang adaptif dan berumur genjah, alat dan mesin pertanian, serta pupuk dan pestisida.

Tanah sulfat masam dikenal memiliki tingkat kemasaman tanah yang tinggi (pH tanah berkisar 2,80–4,30). Hal ini berakibat pada rendahnya ketersediaan hara, tingginya kelarutan unsur yang berpotensi meracuni, dan rendahnya aktivitas mikrobial dekomposer. Tanah sulfat masam dikenal pula memiliki tingkat kelarutan  $\text{Fe}^{2+}$  dan Al (kejenuhan Al yang tinggi). Pada kondisi tergenang, tanah menjadi lebih reduktif sehingga menyebabkan peningkatan kelarutan  $\text{Fe}^{2+}$ , bahkan pada kondisi tertentu mampu mencapai 4500 ppm (Fahmi et al., 2009). Hal ini yang menyebabkan tanaman padi mengalami keracunan  $\text{Fe}^{2+}$  (Gambar 7.1). Selain itu, pH tanah yang sangat rendah mendorong tingginya kelarutan Al dengan tingkat kejenuhannya dapat mencapai 35%–70% (Subagyo, 2006).

Selain padi, tanaman palawija, seperti jagung, kedelai, kacang hijau, kacang tanah, dan ubi kayu, dapat ditanam secara monokultur setelah tanam padi atau ditanam di atas galangan pada lahan tipe luapan B. Hasil tanaman palawija yang dicapai petani untuk jagung



Foto: Arifin Fahmi (2021)

**Gambar 7.1** Tanaman Padi yang Mengalami Keracunan  $\text{Fe}^{2+}$

rata-rata 3,24 t/ha, kedelai 0,8 t/ha, kacang hijau 0,9 t/ha, dan ubi kayu 19,53 t/ha (Dinas Pertanian Tanaman, 2013). Padahal, hasil penelitian menunjukkan bahwa jagung dapat mencapai 5,53 t/ha, kedelai 1,77 t/ha, kacang hijau 2,85 t/ha, dan ubi kayu 25,50 t/ha (Balitkabi, 2011; Balittra, 2013). Produktivitas palawija yang dicapai petani pada tanah sulfat masam umumnya masih sangat rendah karena kemasaman tanah dan senyawa racun yang tinggi, kebasahan pada musim hujan, kekeringan pada musim kemarau, kualitas air yang rendah, dan serangan gulma, hama, dan penyakit yang masih tinggi. Kesenjangan antara hasil penelitian dan realitas di tingkat usaha tani menunjukkan bahwa produktivitas tanah sulfat masam sejatinya dapat ditingkatkan dengan penerapan inovasi teknologi.

Jenis tanaman perkebunan yang banyak dikembangkan di tanah sulfat masam adalah kelapa sawit dan karet. Komoditas ini merupakan komoditas strategis yang diharapkan memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan pendapatan, kesempatan kerja, dan devisa negara. Pengembangan kedua komoditas tersebut di tanah sulfat masam telah menggeser areal tanaman pangan (Asmono et al., 2005). Produktivitas tanaman kelapa sawit di tanah sulfat masam dengan penerapan sistem surjan dan pemeliharaan yang baik dapat menghasilkan 20–30 t/ha tandan buah segar (TBS) setelah 10 tahun, tetapi hasil yang dicapai petani hanya 1,6–5,0 t/ha TBS (Fauzi et al., 2006). Adapun produksi tanaman karet sebesar 0,7–0,8 t/ha/th, tetapi produktivitas karet rakyat di lahan rawa umumnya hanya mencapai 0,5–0,6 t/ha/th (Firmansyah et al., 2012; Barani, 2012).

Masalah produktivitas pada perkebunan kelapa sawit dan karet di tanah sulfat masam, antara lain disebabkan kemasaman tanah, keracunan Al, kahat hara, serta serangan hama dan penyakit tanaman sehingga diperlukan bahan amelioran yang relatif besar. Masalah lainnya terkait dengan infrastruktur, seperti tata air yang belum optimal. Proses pembuatan galangan di tanah sulfat masam disinyalir dapat menimbulkan dampak pencemaran lingkungan, antara lain pemasaman air akibat melarutnya sumber kemasaman tanah.

## B. Budi Daya Tanaman di Tanah Sulfat Masam

Budi daya tanaman pangan dan hortikultura di tanah sulfat masam memerlukan teknologi yang tepat agar memiliki produktivitas yang tinggi. Beberapa teknologi budi daya tanaman di tanah sulfat masam mencakup teknologi pengelolaan air, penataan lahan dan komoditas, pola tanam, penyiapan lahan, ameliorasi, pemilihan varietas, pengendalian organisme pengganggu tanaman, dan mekanisasi pertanian. Dalam bab ini hanya akan dipaparkan tentang pengelolaan air, pemilihan varietas, pola dan sistem tanam, penyiapan lahan, ameliorasi, serta pengendalian organisme pengganggu tanaman secara lebih detail.

### 1. Pengelolaan Air

#### a. Tanaman Pangan dan Hortikultura

Pengelolaan air adalah faktor utama dan kunci yang menentukan keberhasilan pertanian di tanah sulfat masam lahan pasang surut. Beberapa teknologi pengelolaan air untuk tanaman pangan yang banyak ditemui di lahan pasang surut, antara lain sistem tata air satu arah, sistem tabat, dan sistem tata air satu arah dengan tabat konservasi (SISTAK). Setiap sistem pengelolaan air tersebut dapat dipraktikkan secara tunggal atau kombinasi, tergantung pada kebutuhan dan kondisi di lahan.

Penerapan sistem tata air satu arah cocok untuk rawa pasang surut tipe luapan A dan B. Sistem ini dapat diterapkan pada saluran tersier dan sekunder. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengelolaan air yang sesuai untuk tanaman pangan pada tanah sulfat masam di lahan rawa pasang surut tipe luapan B adalah sistem aliran satu arah. Noorinayuwati (1991) melaporkan bahwa penerapan pengelolaan sistem tata air satu arah menghasilkan hasil padi paling tinggi dibanding dengan tata air tradisional maupun pengelolaan air dua arah (Tabel 7.1).

Setiap pertanaman memerlukan ketersediaan air dalam jumlah tertentu, tidak hanya untuk keperluan metabolismenya, tetapi juga untuk menjaga kondisi lingkungan tumbuhnya yang ideal agar

**Tabel 7.1** Produksi Padi pada Tiga Sistem Pengelolaan Air di Lahan Pasang Surut Tanah Sulfat Masam Danda Jaya, Kalimantan Selatan

Sistem Pengelolaan Air dan Varietas	Rata-Rata Hasil (kg/ha)
Padi lokal dengan pengelolaan air tradisional	1.817
Padi unggul dengan pengelolaan air dua arah	3.261
Padi lokal dengan pengelolaan air dua arah	2.506
Padi unggul dengan pengelolaan air satu arah	4.188

Sumber: Noorinayuwati (1991)

dapat berproduksi maksimum. Tanaman padi memerlukan jumlah air yang cukup banyak sampai tergenang selama beberapa fase pertumbuhannya. Adapun tanaman palawija memerlukan air untuk menjaga aerasi perakarannya tetap ideal. Salah satu cara untuk menjaga atau mempertahankan tinggi muka air tanah di lahan adalah dengan membuat suatu bangunan air yang mampu mempertahankan tinggi muka air tanah dalam saluran dan di lahan, yaitu tabat (*dam overflow*). Tinggi bangunan tabat bervariasi tergantung kebutuhan. Misalnya, untuk palawija/sayuran tinggi tabat cukup <30 cm. Adapun hortikultura/perkebunan membutuhkan tinggi tabat <60 cm di bawah permukaan tanah. Hasil percobaan pengelolaan air sistem tabat dengan mengonservasi air hujan untuk pertanaman padi varietas IR-66 pada musim hujan dengan pola padi-padi di lahan pasang surut tipe luapan C dapat meningkatkan hasil padi dari 3,31 menjadi 4,53 t/ha (Sarwani et al., 1997).

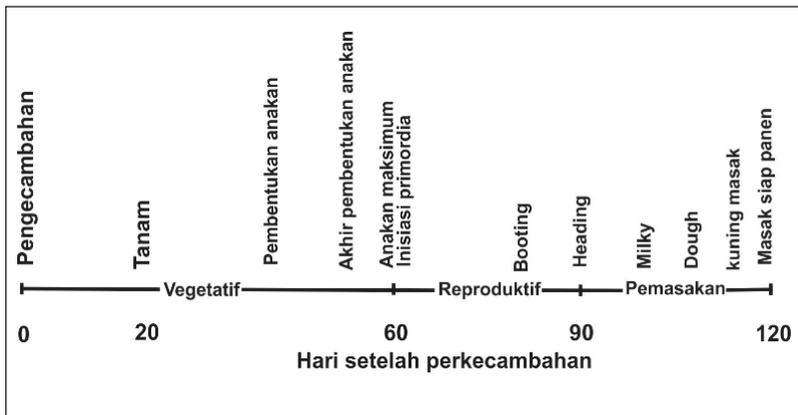
Pertanaman padi pada daerah-daerah tertentu memerlukan strategi pengelolaan air yang khusus. Diperlukan upaya yang tepat agar pertumbuhan dan perkembangan tanaman padi tetap baik. Penerapan sistem tata air satu arah pada daerah-daerah rawa yang relatif tinggi dengan tipe luapan B atau mendekati tipe luapan C (tipe luapan B/C) perlu dikombinasikan atau terintegrasi dengan tabat agar air dalam saluran tersier tidak terkuras habis ketika surut, khususnya pada musim kemarau. Sistem pengelolaan air ini disebut tata air satu arah dengan tabat konservasi (SISTAK).

Sistem drainase dangkal berbeda dengan pengelolaan air pada pola sawah dan sawah/surjan, yaitu air pasang diusahakan tidak menggenangi areal pertanian. Oleh karena itu, saluran-saluran tersier diatur sedemikian rupa agar hanya berfungsi sebagai saluran drainase. Pada areal pertanian, dibuat saluran-saluran drainase dangkal. Sistem drainase dangkal ini dapat diterapkan apabila lapisan bahan sulfidik cukup dalam. Pada lahan usaha tani, dibuat saluran drainase di sekeliling lahan tersebut untuk mempertahankan muka air tanah berada pada kedalaman 20 cm.

Berbeda dengan tanaman lain, tanaman padi memerlukan air lebih banyak untuk pertumbuhan dan produksinya. Hasil produksi padi sawah menurun jika tanaman mengalami cekaman air (*water stress*). Gejala yang tampak pada padi apabila kekurangan air, antara lain daun menggulung, daun terbakar, anakan padi berkurang, tanaman kerdil, pembungaan tertunda, dan biji hampa. Tanaman padi membutuhkan air dengan volume berbeda untuk setiap fase pertumbuhannya. Ilustrasi fase pertumbuhan padi disajikan pada Gambar 7.2. Makarim dan Suhartatik (2009) membagi fase pertumbuhan dan kebutuhan air pada tanaman padi sebagai berikut.

- 1) Fase vegetatif. Fase ini merupakan fase setelah tanam yang mencakup tahap pemulihan dan pembentukan akar, tahap pertumbuhan anakan maksimum, serta pertunasan efektif dan tidak efektif. Kelembapan yang cukup diperlukan pada fase ini untuk perkembangan akar-akar baru. Kekeringan akan menyebabkan pertumbuhan yang tidak bagus dan hambatan pertumbuhan anakan.
- 2) Fase reproduktif. Fase ini mencakup tahap perkembangan awal malai, masa bunting, dan pembentukan bunga. Pada sebagian besar fase ini dikonsumsi banyak air. Kekeringan akan menyebabkan beberapa kerusakan yang disebabkan oleh terganggunya pembentukan malai, pembungaan, dan fertilisasi yang berakibat pada peningkatan sterilisasi.

- 3) Fase pemasakan. Fase ini merupakan fase terakhir, termasuk di dalamnya adalah pembentukan susu, pembentukan pasta, matang kuning, dan matang penuh. Selama fase ini, kebutuhan akan air sedikit dan secara berangsur-angsur berkurang sampai sama sekali tidak diperlukan air sesudah tahap matang kuning. Selama fase ini, pengeringan perlu dilakukan. Akan tetapi, pengeringan yang terlalu awal dapat menyebabkan bertambahnya gabah hampa dan beras pecah, sedangkan pengeringan yang terlambat akan menyebabkan kondisi rebah.



Sumber: Diolah dari De Datta (1981)

**Gambar 7.2** Fase Pertumbuhan Padi

Kebutuhan air bagi tanaman (*consumptive use*) dapat didekati dengan menghitung evapotranspirasi tanaman yang besarnya dipengaruhi oleh jenis tanaman, umur tanaman, dan faktor klimatologi. Pada saat tanaman mulai tumbuh, kebutuhan air konsumtif meningkat sesuai pertumbuhannya dan mencapai maksimum pada saat fase vegetatif maksimum. Kebutuhan air untuk tanaman dari pembibitan sampai panen untuk padi lokal diperkirakan mencapai sekitar 36,5 mm/hari, sedangkan padi varietas unggul sekitar 33,9 mm/hari (Tabel 7.2). Setelah mencapai maksimum dan berlangsung beberapa saat menurut jenis tanaman, nilai kebutuhan konsumsi air akan menurun sejalan dengan pematangan biji.

**Tabel 7.2** Kebutuhan Air Tanaman Padi Sesuai Tahap Pertumbuhannya

Tahap Kegiatan/ Pertumbuhan	Varietas Lokal			Varietas Unggul		
	mm/ hari	l/det/ ha	Periode (hari)	mm/ hari	l/det/ ha	Periode (hari)
Pengolahan tanah	12.7	1.5	-	12.7	1.5	-
Pembibitan	3.0	0.4	20	3.0	0.4	20
Tanam s.d. primordial	7.5	0.9	40	6.4	0.75	35
Primordial s.d. bunga	8.8	1.0	25	7.7	0.9	20
Bunga 10% s.d. penuh	8.8	1.0	20	9.0	1.0	20
Bunga penuh s.d. panen	8.4	1.0	20	7.8	0.9	20

Sumber: Departemen Permukiman (2000)

Pengelolaan air sistem irigasi *intermittent* dengan menjaga air tetap macak, bahkan terkadang kering dapat meningkatkan efisiensi penggunaan air (Shastry et al., 2000) dan menghemat air 15%–30%. Subagyono (2001) menambahkan bahwa dengan irigasi berselang, hasil padi meningkat sekitar 7% dibanding dengan lahan yang terus-menerus digenangi. Efisiensi penggunaan air pada budi daya padi sawah dengan kondisi tidak tergenang sebesar 19%, sedangkan pada pengairan penggenangan terus-menerus efisiensinya sebesar 10% (Sumardi et al., 2007).

### a. Tanaman Perkebunan

Prinsip pengelolaan air pada perkebunan adalah untuk menciptakan kondisi air agar sistem perakaran tanaman tidak tergenang dan kebutuhan air terpenuhi serta aspek lingkungan terjaga. Untuk menciptakan kondisi tersebut, diperlukan sistem drainase dan irigasi yang terkendali dengan membuat saluran drainase yang dilengkapi pintu tabat. Untuk tanaman perkebunan, diperlukan ketinggian muka air tanah agak dalam dibandingkan tanaman pangan, antara lain pada tahun pertama sampai ketiga, muka air tanah perlu dipertahankan sekitar 40–50 cm. Adapun pada tahun selanjutnya dipertahankan sekitar 60 cm. Tinggi

muka air di saluran kuarter pada tahun pertama sampai ketiga antara 50–60 cm, selanjutnya pada tahun keempat sekitar 70 cm pada tanah sulfat masam yang bahan sulfidiknya dalam. Pada tanah sulfat masam yang mempunyai lapisan bahan sulfidik dangkal, muka air tanah dan saluran kuarter dipertahankan tetap berada di sekitar atas lapisan bahan sulfidik. Adapun kerapatan saluran drainase pada petakan di tanah sulfat masam adalah 2:1, artinya dua jalur tanaman dengan satu saluran drainase (Balittra, 2016).

Salah satu komponen penting dalam pembangunan jaringan drainase di tanah sulfat masam untuk perkebunan adalah pintu air yang berfungsi untuk mengatur tinggi muka air tanah (*water table*). Prinsip pengelolaan air di lahan perkebunan harus memperhatikan pelestarian lahan dan pemenuhan kebutuhan air optimum bagi tanaman (Balittra, 2016) yang dapat dirumuskan sebagai berikut.

$Q_i$  (air diterima) = air untuk memenuhi kebutuhan tanaman + air hilang akibat penguapan (evapotranspirasi) + perkolasi + air tersimpan dalam tanah + air yang harus dikeluarkan (didrainase).

Selisih antara air yang diterima dan air yang hilang merupakan jumlah air yang harus dibuang melalui saluran drainase. Hal ini dijadikan acuan dalam pembuatan jaringan drainase menyangkut arah, kerapatan, dan dimensi saluran, serta tata letak pintu air yang didasarkan pada kondisi topografi lahan.

## 2. Pemilihan Varietas

Pemilihan varietas padi di tanah sulfat masam ditentukan oleh banyak faktor. Faktor-faktor dominan yang memengaruhi pemilihan varietas padi di lahan rawa, yaitu potensi hasil, toleran cekaman biotik dan abiotik, permintaan pasar, preferensi atau rasa, umur tanaman, serta tinggi tanaman (Khairullah, 2017).

Potensi hasil yang tinggi menjadi fokus utama dalam pemilihan varietas padi di tanah sulfat masam. Varietas padi dengan potensi hasil tinggi hanya dapat diperoleh dari varietas unggul. Di lahan rawa, suatu

varietas dengan potensi hasil tinggi belum tentu dapat menunjukkan potensi hasilnya tersebut karena tingkat adaptasinya yang rendah. Sebaliknya, varietas dengan potensi hasil rendah (varietas lokal) sering lebih dapat beradaptasi di lahan rawa sulfat masam tersebut.

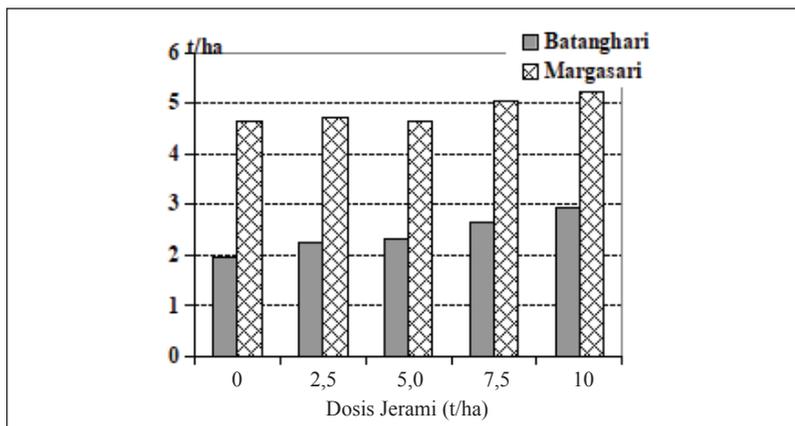
Di lahan pasang surut tanah sulfat masam, cekaman utama adalah tingginya konsentrasi  $Fe^{2+}$  dan rendahnya pH. Adanya perubahan iklim yang makin berdampak pada kekeringan dan genangan yang dalam harus menjadi pertimbangan khusus dalam pemilihan varietas. Varietas padi dengan tingkat toleransi tinggi terhadap cekaman tanah dan air lebih cepat dipilih petani, meskipun kadang-kadang potensi hasilnya tergolong relatif rendah.

Kemasaman tanah dan keracunan  $Fe^{2+}$  adalah kendala paling utama yang dihadapi oleh petani dalam pengembangan tanaman, khususnya padi di tanah sulfat masam. Teknik budi daya, seperti cara tanam, metode ameliorasi, pengelolaan air, dan penggenangan tanah sebelum tanam merupakan beberapa teknologi yang telah diterapkan untuk mengatasi keracunan  $Fe^{2+}$ . Akan tetapi, selain pengelolaan air, cara yang paling efektif dalam mengatasi masalah keracunan  $Fe^{2+}$  adalah penggunaan varietas toleran (Ponnamperuma, 1978; Neue, 1994). Secara tradisional, petani di tanah sulfat masam lahan pasang surut umumnya membudidayakan padi varietas lokal yang berumur panjang (8 bulan). Padi varietas lokal ini disukai petani karena selain benihnya mudah didapat dan rasa nasi yang digemari oleh banyak anggota masyarakat, juga lebih tahan terhadap kondisi lingkungan dan gangguan hama atau penyakit, lebih hemat pupuk dan pemeliharaannya tidak intensif, serta gabahnya tidak mudah rontok. Kekurangannya hanya pada hasilnya yang masih rendah, berkisar antara 2–3 t/ha GKG dengan intensitas tanam sekali setahun (Noor, 1996).

Padi varietas lokal yang telah dibudidayakan oleh petani lokal dengan segala kelebihan dan kekurangannya selama ini telah mampu menyediakan kebutuhan pangan bagi masyarakat di Kalimantan Selatan dan sekitarnya. Demikian pula untuk daerah-daerah di Pulau Sumatra. Kemampuan adaptasi yang tinggi dari varietas lokal salah satunya adalah kemampuannya tumbuh dan berkembang pada kondisi

tanah sulfat masam yang marginal, seperti pH tanah yang sangat masam dan ketersediaan hara yang terbatas. Menurut Purnomo et al. (2005; 2009), padi varietas lokal, seperti siam, mampu mengatasi kekurangan N dan P di tanah sulfat masam melalui adanya simbiosis mutualisme dengan mikroorganisme yang ada di sekitar perakarannya.

Seiring dengan perkembangan teknologi, saat ini telah banyak dihasilkan varietas padi unggul spesifik lahan rawa atau tanah sulfat masam, seperti Barito, Mahakam, Kapuas, Musi, Sei Lilin, Lematang, Banyuasin, Lalan, Margasari, Martapura, Ciherang, Inpara 2, Inpara 3, Inpara 4, dan Inpara 5. Varietas ini toleran terhadap genangan dan kemasaman tanah. Varietas-varietas tersebut telah memiliki produksi gabah yang lebih tinggi dan berumur lebih pendek daripada varietas lokal. Walaupun demikian, setiap varietas tersebut masih memiliki daya adaptif yang berbeda-beda terhadap permasalahan utama di tanah sulfat masam. Hasil penelitian Jumberi et al. (2007) di Kalimantan Selatan pada kondisi tanah dengan pH <3,5 dan konsentrasi Fe dapat mencapai 5.000 ppm menunjukkan adanya perbedaan hasil yang diperoleh antara varietas Margasari dan Batanghari (Gambar 7.3).



Sumber: Jumberi et al. (2007)

**Gambar 7.3** Produksi Gabah Kering Panen Padi Varietas Margasari dan Batanghari yang Ditanam di Tanah Sulfat Masam pada Beberapa Perlakuan Dosis Jerami

Tidak bisa dimungkiri bahwa sebaran varietas yang dominan berkaitan erat dengan permintaan pasar. Kondisi di lahan pasang surut Kalimantan Selatan dan Kalimantan Tengah yang sebagian besar ditanami varietas lokal adalah karena harga jualnya yang tinggi. Bahkan, sering terjadi pihak pembeli sudah menunggu di tepi sawah untuk membeli padi saat petani sedang panen. Hal ini menjadi salah satu kebanggaan petani menanam varietas tertentu.

Faktor preferensi berkaitan dengan harga jual yang tinggi. Di lahan rawa, terdapat preferensi yang berbeda-beda antarwilayah terhadap suatu varietas. Masyarakat di Sumatra dan Sulawesi pada umumnya menyukai varietas dengan tekstur nasi pulen. Sebaliknya, masyarakat di Kalimantan Selatan dan Kalimantan Tengah lebih menyukai tekstur nasi pera. Selain tekstur nasi, hal yang juga menentukan preferensi adalah beras jernih dan terawang (*transluscent*) serta ukuran gabah kecil ramping. Varietas dengan potensi hasil tinggi disertai rasa nasi yang disukai lebih cepat dipilih petani untuk ditanam dan dikembangkan.

Meskipun tanaman tinggi dapat menurunkan intersepsi cahaya matahari ke daun bagian bawah, tetapi sifat ini menjadi cukup penting di lahan rawa. Tanaman yang tinggi dapat mengimbangi tinggi genangan di lahan sulfat masam, terutama lahan pasang surut tipe A pada musim hujan. Tanaman yang tinggi memungkinkan malai-malai padi berada di atas genangan dan dapat berkembang dengan baik. Sebagian varietas unggul memiliki malai yang tidak muncul penuh dan ini sangat berisiko jika terendam air genangan.

Pemilihan varietas yang tahan hama (kecuali tikus) dan penyakit akan mempercepat penyebaran varietas unggul baru padi di lahan sulfat masam. Hama utama yang menyerang tanaman padi adalah tikus dan wereng coklat, sedangkan penyakit utamanya adalah tungro, blas, dan hawar daun bakteri. Selain faktor internal tanaman tersebut, pemilihan varietas di tingkat petani juga ditentukan oleh faktor eksternal, antara lain adanya informasi yang terus-menerus tentang keunggulan suatu varietas dan ketersediaan benih bermutu dalam jumlah dan waktu yang tepat.

Pemilihan varietas padi untuk tanah sulfat masam di lahan pasang surut tergantung jenis tanah dan tipologi luapan airnya. Pada lahan pasang surut sulfat masam, pilihan varietas lebih terbatas karena faktor cekaman tanah, terutama konsentrasi Fe dan Al yang tinggi dan pH yang rendah (tanah masam). Pada lahan sulfat masam yang cekaman agrofisik lahannya lebih ringan, banyak varietas unggul yang dapat dipilih untuk dikembangkan, baik varietas unggul spesifik lahan rawa maupun sawah irigasi. Varietas yang dapat dipilih adalah varietas unggul padi rawa, seperti Margasari, Inpara-1 sampai Inpara-9, atau Inpari-13 dan Inpari-30. Khusus untuk tanah sulfat masam dengan tingkat cekaman tinggi sampai sangat tinggi, varietas Margasari dan Inpara-1 dapat dipilih untuk dikembangkan. Varietas unggul baru padi sawah irigasi berpotensi hasil tinggi yang dapat ditanam, antara lain Inpari-23 (potensi hasil 9,2 t/ha), Inpari-25 (potensi hasil 9,4 t/ha), dan Inpari-29 (potensi hasil 9,5 t/ha) (Mejaya et al., 2014). Margasari dan Martapura adalah varietas unggul padi rawa pasang surut yang dirakit di Balai Penelitian Pertanian Lahan Rawa (Balittra) tahun 1990 yang sudah terbukti toleran keracunan  $Fe^{2+}$  dan tanah masam. Meskipun sampai saat ini telah dilepas banyak varietas unggul padi spesifik lahan rawa, tetapi tidak semua varietas tersebut tersebar di masyarakat.

Beberapa varietas unggul jagung yang adaptif di tanah sulfat masam, antara lain adalah varietas Sukmaraga dan Padmaraga dengan hasil 4,0–5,5 t/ha pipilan kering. Umumnya, varietas unggul jagung yang adaptif di lahan kering masam juga bisa dikembangkan di tanah sulfat masam, seperti varietas Arjuna, Bisma, Bayu, Semar, dan Bisi-2 dengan hasil 3,9–4,5 t/ha pipilan kering. Jagung manis varietas Baruna, Super Sweet Corn, Kumala F1, Madu, dan Sweet Boy juga adaptif di tanah sulfat masam (William et al., 2010). Varietas unggul baru kedelai yang adaptif di tanah sulfat masam, antara lain Lawit, Menyapa, Anjasmoro, Seulawah, Grobogan, dan Argomulyo dengan hasil 1,6–2,8 t/ha. Kacang hijau yang toleran pada tanah sulfat masam adalah varietas Murai, Betet, dan Vima-1 dengan hasil 1,7–2,8 t/ha (Koesrini & William, 2009). Adapun kacang tanah yang toleran adalah varietas Jerapah dengan hasil 3,7 t/ha (Balitkabi, 2011).

Beberapa tanaman dari komoditas hortikultura (tomat, cabai, terung, buncis, kubis, melon, semangka, rambutan, dan jeruk siam) adaptif dan mempunyai potensi untuk dikembangkan di tanah sulfat masam. Beberapa varietas tomat yang adaptif, antara lain varietas Permata, Mirah, Berlian, Opal, dan Sakina dengan hasil berturut-turut 29,8; 28,5; 24,4; 20,4; 15,0 t/ha (Khairullah et al. 2003). Cabai besar varietas Tanjung I (7,5 t/ha), cabai rawit varietas Bara (2,2 t/ha) dan Hot Pepper (2,4 t/ha), terung varietas Mustang (4,3 t/ha) dan Egg Plant (5,3 t/ha), buncis varietas Lebat (8,7 t/ha), serta kubis varietas KK cross (18,9 t/ha). Adapun melon varietas Action 434 dengan hasil 23,8 t/ha (Saleh & Raihan, 2011). Menurut petani, rambutan yang berkembang di tanah sulfat masam adalah varietas Garuda, Manalagi, dan Si Batuk dengan hasil rata-rata 8.000–8.500 buah/pohon, serta jeruk siam dengan hasil 664 buah/pohon/th (Antarlina et al., 2005).

### 3. Pola dan Sistem Tanam

Pola tanam adalah usaha penanaman pada sebidang lahan dengan mengatur susunan tata letak dan urutan tanaman selama periode waktu tertentu, termasuk masa pengolahan tanah dan bera selama periode tertentu. Pola tanam terdiri atas tiga macam, yaitu monokultur, polikultur, dan rotasi tanaman (Anwar, 2012). Pola tanam monokultur adalah pertanian dengan menanam satu jenis tanaman saja. Pola tanam polikultur adalah menanam lebih dari satu tanaman dalam satu bidang lahan yang dibagi dalam tumpang sari (*intercropping*), tanaman bersisipan (*relay cropping*), tanaman campuran (*mixed cropping*), tumpang gilir (*multiple cropping*), dan tanaman bergiliran (*sequential planting*). Tumpang sari adalah penanaman lebih dari satu tanaman secara bersamaan pada waktu dan/atau periode tanam dan lahan yang sama (Warman & Kristiana, 2018). Tanaman bersisipan merupakan pola tanam yang menyisipkan satu atau beberapa jenis tanaman selain tanaman pokok (dalam waktu tanam yang bersamaan atau berbeda). Perbedaan metode tanaman bersisipan dengan tumpang sari adalah waktu tanamnya. Pada tanaman bersisipan, penanaman bisa dilakukan tidak serentak asal daur hidup tanaman pertama belum habis sebelum tanaman yang lain ditanam. Adapun

pola tanam campuran merupakan penanaman beberapa jenis tanaman yang ditanam pada lahan dan waktu yang sama tanpa pengaturan jarak tanam dan penentuan jumlah populasi. Kegunaan sistem ini adalah untuk dapat melawan atau menekan kegagalan panen (N-total) (Kustantini, 2012). Dengan kata lain, tanaman campuran adalah tumpang sari yang tidak memperhatikan jarak tanam.

Selanjutnya, tumpang gilir (*multiple cropping*) adalah teknik budi daya tanaman pada lahan yang sama dalam waktu satu tahun dengan menanam lebih dari satu tanaman pada satu musim, kemudian dilanjutkan menanam lebih dari satu jenis tanaman pada musim berikutnya. Tumpang gilir adalah tumpang sari yang dilakukan secara berurutan pada lebih dari satu periode tanam. Tanaman bergiliran (*sequential planting*) adalah menanam lebih dari satu jenis komoditas pada satu lahan pertanian dalam waktu yang tidak bersamaan (bergiliran). Komoditas lain baru ditanam setelah komoditas lainnya dipanen. Jadi, dalam satu periode tanam hanya menanam satu jenis komoditas.

Rotasi (pergiliran) tanaman (*crop rotation*) merupakan penanaman dua jenis atau lebih komoditas secara bergiliran pada lahan yang sama dalam periode waktu tertentu, seperti tanaman semusim yang ditanam secara bergilir dalam satu tahun. Rotasi tanam dilakukan secara beruntun sepanjang tahun dengan mempertimbangkan beberapa faktor untuk mendapat keuntungan maksimum, seperti faktor pengolahan tanah menjadi bisa dihemat dan kerusakan tanah yang dapat dihindari. Hasil panen secara beruntun dapat memperlancar penggunaan modal dan meningkatkan produktivitas lahan serta mencegah serangan hama dan penyakit yang meluas. Lahan yang selalu tertutup tanaman mencegah terjadinya erosi. Sisa jaringan tanaman yang diusahakan dapat dimanfaatkan sebagai amelioran.

Dari berbagai pola tanam, pola rotasi tanam merupakan pola tanam yang paling sesuai dengan kondisi lahan pasang surut tanah sulfat masam, khususnya pada tipe luapan C. Hal ini karena pemilihan komoditas untuk dirotasikan dengan tanaman padi sebagai tanaman pokok dapat disesuaikan dengan kebutuhan dan ketersediaan

air komoditas lain, seperti jagung dan kacang-kacangan. Pola rotasi juga dapat menekan perkembangan hama dan penyakit yang dapat berakibat pada penurunan produktivitas tanaman.

Pola tanam dapat digunakan sebagai landasan untuk meningkatkan produktivitas lahan. Selain itu, manfaat lain dari pola tanam, yaitu efisiensi tenaga kerja, pengawasan yang lebih mudah, hasil tanaman lebih banyak dan beragam, risiko kegagalan panen dapat berkurang, optimalisasi penggunaan lahan, energi sinar matahari lebih tinggi, serta dapat mengondisikan stabilitas biologis terhadap serangan organisme pengganggu tanaman.

Pola tanam di tanah sulfat masam lahan pasang surut terdiri atas beberapa macam, tergantung kondisi lahannya. Tipe luapan lahan cukup menentukan pola tanam tersebut yang berhubungan dengan penataan lahan. Tanah sulfat masam di lahan pasang surut dapat ditata dalam bentuk sawah saja, surjan, atau tegalan. Lahan yang ditata sebagai sawah saja dapat ditanami padi dua kali setahun menggunakan varietas unggul, varietas unggul-varietas lokal (sistem sawit dupa), ataupun hanya monokultur varietas lokal saja. Pada lahan yang ditata sebagai sistem surjan, sebagian lahan ditinggikan untuk ditanami palawija atau hortikultura yang tidak tahan genangan air (Gambar 5.10). Lahan yang ditata sebagai tegalan dapat ditanami palawija dan/atau padi tadah hujan.

Pola tanam padi di tanah sulfat masam dapat berupa padi yang menggunakan varietas unggul, varietas unggul kemudian varietas lokal, atau varietas lokal saja. Setiap pola tanam yang diterapkan memiliki keuntungan dan kerugiannya, baik dari aspek teknis maupun aspek ekonomi dan sosial. Salah satu kendala dalam optimalisasi lahan dengan pola tanam intensif adalah ketersediaan tenaga kerja. Jika sistem mekanisasi sudah diterapkan, masalah tenaga kerja ini bisa dimarginalisasi.

Hamparan tanah sulfat masam di lahan pasang surut dapat ditanami beragam komoditas sehingga terhindar dari “kerugian” karena hasil usaha tani tidak tergantung hanya pada satu komoditas seperti padi saja. Galangan biasanya ditanami petani dengan jeruk atau tana-

man palawija, seperti jagung, kedelai, dan kacang tanah. Jika ditanami palawija, penanamannya dapat dilakukan pada awal dan akhir musim hujan. Pendapatan usaha tani meningkat jauh dengan penerapan pola tanam jeruk berbasis padi pada sistem surjan. Teknologi ini sudah diterapkan di tanah sulfat masam lahan pasang surut seluruh Indonesia, terutama di Kalimantan dan Sumatra. Berdasarkan analisis usaha tani, keuntungan yang dapat diperoleh dalam satu ha lahan sistem surjan dapat mencapai 11–12 juta rupiah dalam sekali musim panen padi (Balittra, 2006). Keuntungan ini akan makin besar karena jeruk yang ditanam pada galangan dapat dipanen tiga kali dalam setahun.

Penataan komoditas adalah usaha penataan tanaman untuk mencapai hasil maksimal dengan cara memilih, menata, dan mengelola komoditas berdasarkan kesesuaian lahan dan kebutuhan pasar. Dalam hal ini, penataan komoditas tanaman bersifat spesifik lokasi karena tidak semua komoditas bisa berkembang optimal di tanah sulfat masam. Pola tanam yang sudah dikembangkan, antara lain pola tanam padi sekali setahun, sawit dupa (padi lokal-padi unggul/IP180), dan duwit dupa (padi unggul-padi unggul). Pada bagian galangan sistem surjan, dapat dikembangkan tanaman palawija (jagung atau kacang-kacangan), sayuran (sawi atau bayam), dan hortikultura (jeruk atau rambutan).

Pada sistem surjan dengan usaha tani berbasis padi, produksi padi varietas IR 66 dapat mencapai 6 t/ha, tomat 17,8 t/ha, terong 42,8 t/ha, dan kubis 28,5 t/ha. Hal ini mengindikasikan produktivitas lahan dan tanaman cukup tinggi. Berdasarkan hasil analisis biaya dan pendapatan dengan memasukkan nilai penyusutan galangan dan alat-alat, diperoleh nilai keuntungan sebesar Rp10,7 juta/0,93 ha; tomat Rp1,7 juta/0,028 ha; terong Rp2,2 juta/0,028 ha; dan kubis Rp0,9 juta/0,028 ha. Pengusahaan komoditas padi, tomat, terong, dan kubis cukup efisien dengan nilai R/C >1. Kebutuhan tenaga kerja (HOK) sebesar 115,95 HOK/ha dengan perincian tanaman padi sebanyak 69 HOK; tomat 18,4 HOK; terong 19,7 HOK; dan kubis 8,85 HOK. Terdapat peningkatan keperluan tenaga kerja sebesar 35,99 HOK/ha dibanding dengan usaha tani padi di tingkat petani umumnya.

Sistem surjan dengan usaha tani padi + jeruk di lahan rawa pasang surut cukup layak dikembangkan karena dengan tingkat bunga 12%, 15%, dan 40%, diperoleh nilai  $B/C > 1$ , *net present value positive*, masa pengembalian investasi lebih kecil dari umur perusahaan, dan *internal rate of return* lebih besar dari tingkat bunga. Pengembangan sistem surjan dengan tanaman jeruk akan memberikan keuntungan yang cukup besar (Rina et al., 2006).

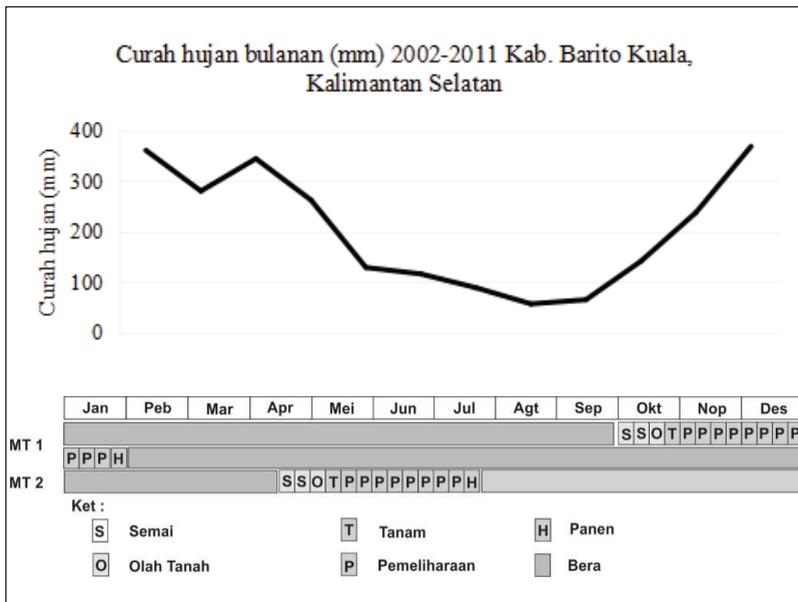
Penerapan penataan lahan sistem surjan memerlukan investasi lebih besar karena terdiri dari pembuatan galangan dan pembelian alat-alat. Investasi ini diperhitungkan untuk menentukan penyusutan yang akan menjadi komponen biaya untuk tahun berikutnya. Galangan yang dibuat mempunyai masa ekonomis lebih dari satu tahun. Galangan tersebut harus dipelihara (ditinggikan, diratakan, dan dirapikan) setiap musim atau tahun. Berdasar asumsi tersebut, penyusutan dapat dihitung dengan *discount factor*. Nilai dari investasi yang diberikan dibagi dengan umur ekonomisnya sehingga menghasilkan nilai penyusutan galangan dan alat sebesar Rp297.288/th (Rina et al., 2006).

#### a. Padi Unggul-Padi Unggul

Pola tanam padi-padi di tanah sulfat masam mengikuti pola curah hujan setempat dan kondisi pasang-surutnya air di lahan. Misalnya, pada lahan rawa pasang surut sulfat masam di Kabupaten Barito Kuala, Kalimantan Selatan, pola curah hujan dalam 10 tahun (2002–2011) ditampilkan pada Gambar 7.4. Awal musim hujan terjadi pada bulan Oktober dengan puncak curah hujan terjadi pada bulan Desember hingga Januari dan kemudian mulai berkurang. Adapun musim kemarau umumnya jatuh pada bulan Juli sampai September.

Berdasarkan pola curah hujan tersebut, terdapat potensi untuk meningkatkan IP hingga 300 dengan menggunakan padi unggul. Meskipun demikian, karena kondisi lahan dan fluktuasi air genangan, pertanaman padi unggul-unggul hanya dapat dilakukan dua kali setahun (IP 200). Pertanaman padi pertama dimulai pada awal musim hujan (bulan Oktober). Setelah satu atau dua kali turun hujan, benih padi disemai, kemudian dilakukan penyiapan lahan dan pengaturan

tata airnya. Tanam dilakukan pada minggu terakhir bulan Oktober dengan menggunakan jarak tanam *jajar legowo* 2:1 atau 4:1, atau jarak tanam 20 cm × 20 cm. Setelah tanam, dilakukan pemeliharaan yang meliputi pemupukan, penyiangan, dan pencegahan/pengendalian hama dan penyakit. Panen dilakukan pada akhir Januari atau awal Februari. Setelah itu, lahan menjadi bera karena pada bulan Februari sampai April, kondisi lahan biasanya tergenang air cukup dalam.



**Gambar 7.4** Pola Tanam untuk Pertanaman Padi IP 200 di Lahan Pasang Surut sesuai Pola Curah Hujan di Kabupaten Barito Kuala, Kalimantan Selatan

Untuk melakukan pertanaman padi kedua, dimulai pada minggu ke-2 bulan April (persemaian basah atau kering). Persemaian basah langsung dilakukan di pertengahan sawah, sedangkan persemaian kering dilakukan di luar lokasi sawah yang agak kering dengan cara ditugal. Penyiapan lahan dilakukan pada minggu pertama Mei dengan cara lahan *digelebeg* (persemaian basah). Jika menggunakan bibit dari hasil tugal, umur persemaian mundur satu minggu. Penanaman

Buku ini tidak diperjualbelikan.

dilakukan pada minggu ketiga Mei dengan menggunakan jarak tanam seperti pada padi pertama. Panen diperkirakan akan dilakukan pada minggu kedua atau ketiga bulan Agustus pada saat lahan kering.

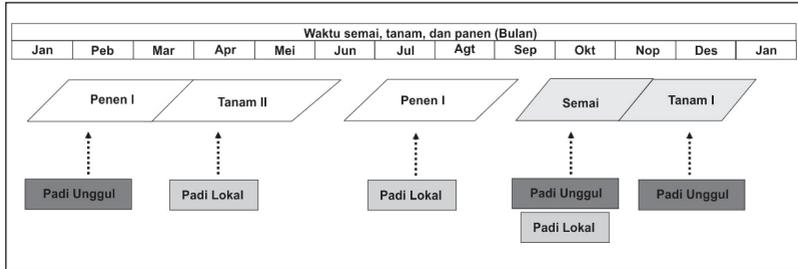
### **b. Padi Unggul-Padi Lokal**

Hampir 90% lahan rawa pasang surut sulfat masam, khususnya di Kalimantan, hanya ditanam sekali setahun dan umumnya dengan varietas lokal fotoperiod yang mempunyai waktu semai sampai panen 8–11 bulan. Padahal, pada beberapa wilayah, dapat dikembangkan pola tanam dua kali setahun dengan memadukan varietas padi lokal dengan padi varietas unggul yang berumur 3–4 bulan.

Pola Tanam ‘sawit dupa’ merupakan istilah akronim dari “sekali *mewiwit* (menyemai) dua kali panen”, yaitu sebuah pendekatan pola tanam di tanah sulfat masam yang memadukan antara sistem budi daya padi lokal dan sistem pertanian modern padi varietas unggul (IP 180) dalam suatu hamparan sehingga pemanfaatan lahan dapat optimal dan hasil padi berlipat (Gambar 7.5). Teknologi pola tanam sawit dupa ini dapat diterapkan di tanah sulfat masam tipe luapan A, B, dan C tanah dengan penerapan tata air satu arah, penyiapan lahan dengan traktor, pemupukan berimbang, dan pengelolaan hama dan penyakit tanaman secara terpadu. Hasil analisis biaya dan keuntungan menunjukkan bahwa penerapan teknologi sawit dupa dapat memberikan keuntungan sebesar 43,8%–48,4% dengan nisbah penerimaan dan biaya (R/C ratio) 1,74–1,85 dan Nisbah Keuntungan dan Biaya Marjinal (MBCR) 1,58–1,77. Sekitar 80% lahan rawa pasang surut sulfat masam di Kalimantan Selatan dan Kalimantan Tengah hanya ditanami sekali setahun (IP 100). Dengan adanya pola tanam sawit dupa ini, indeks pertanaman dapat ditingkatkan dari IP 100 menjadi IP 170. Skema teknologi dan waktu tanam pada pola sawit dupa disajikan pada Gambar 7.5.

### **c. Padi Lokal**

Teknologi budi daya varietas padi lokal mencakup persemaian yang dilakukan dalam beberapa tahap (*teradak*, *ampak*, dan *lacak* atau pindah tanam), penyiapan lahan, penanaman, pemupukan, pemeliharaan



Sumber: Khairullah & Fahmi (2018)

**Gambar 7.5** Skema Waktu Semai, Tanam, dan Panen pada Pola Tanam Sawit Dupa

dan pengendalian OPT, panen, dan pemrosesan hasil atau pascapanen yang dilakukan secara *indigenous*. Sampai sekarang, di persawahan pasang surut sulfat masam seperti di Kalimantan Selatan, teknologi budi daya *indigenous* ini masih banyak dilakukan petani, terutama untuk kepemilikan sawah yang sempit atau terbatas (Khairullah, 2016; 2018).

Persemaian padi varietas lokal dilakukan dengan cara pindah tanam sebanyak dua sampai tiga kali. Persemaian benih dilakukan secara tugal atau *teradak* (persemaian kering) karena cara ini paling lazim dilakukan petani di tanah sulfat masam lahan pasang surut, selain persemaian basah (*palai*). Persemaian kering (tugal) dimulai pada bulan Oktober/November. Kira-kira 5 kg benih cukup untuk lahan teradakan seluas 150 m<sup>2</sup> dan cukup untuk 1 ha sawah. Biasanya petani memberikan abu dapur atau abu sekam di atas lubang-lubang tugal. Umur bibit sekitar 30–40 hari setelah tabur untuk siap dipindahtanamkan.

Pindah tanam bibit pertama ditanam (*diampak*) pada sebagian kecil areal persawahan (20% dari areal sawah) yang dilaksanakan pada bulan Desember–Januari. Satu rumpun bibit *teradakan* dibagi menjadi 4–5 bagian yang kemudian ditanam di *ampakan*. Lama bibit berada di *ampakan* sekitar 40 hari untuk selanjutnya dipindahtanamkan lagi. Pindah tanam kedua (*dilacak*) dilaksanakan pada bulan Januari–Februari. Sekitar sepertiga luas sawah diperlukan untuk *lacakan*

ini dan terletak di tengah sawah. Umur bibit di *lacakan* untuk siap ditanam di areal sawah adalah antara 55–60 hari.

Pembibitan dengan cara tanam pindah ini memakan waktu sampai empat bulan. Hal ini tentu saja tidak efisien, mengingat selama periode tersebut, lahan dapat ditanami dengan satu musim tanam varietas unggul. Di sisi lain, kondisi lahan secara alami masih tergenang cukup dalam yang tidak memungkinkan bibit dari teradakan ditanam langsung di sawah. Pemindahtanaman bibit beberapa kali ini secara tidak langsung bertujuan pula untuk memperbesar, memperkuat, dan memperbanyak bibit. Kelebihan lainnya adalah jumlah benih yang digunakan lebih sedikit, yaitu kira-kira 1/6 dibandingkan bibit yang ditanam langsung. Untuk mengatasi waktu pembibitan yang lama ini, diperlukan tata air yang sesuai dengan memanfaatkan air pasang dan surut sehingga air di sawah dapat diatur.

Penyiapan lahan dilaksanakan kira-kira satu bulan setelah bibit berada di *lacakan*, yaitu bulan Februari. Gulma di sawah dibersihkan dengan menggunakan alat pemotong *tajak* dan potongan gulma ini dibiarkan berada di air selama 10–15 hari (Gambar 5.14). Penyiapan lahan dengan menggunakan alat *tajak* tidak mengganggu lapisan bahan sulfidik sehingga cukup aman bagi tanaman. Gulma yang telah dipotong secara tidak langsung dijadikan sebagai bahan organik yang dapat memperkaya hara. Gulma tersebut kemudian dipuntal membentuk bola-bola. Secara periodik, puntalan tersebut dibalik untuk mempercepat dekomposisi. Puntalan tersebut disebar merata pada permukaan sawah sambil menunggu air surut. Kadang-kadang pada periode tunggu tersebut, tumbuh gulma baru sehingga dilakukan “*penjajaban*” (mencincang) dengan menggunakan parang panjang yang tajam. Meskipun demikian, proses dekomposisi bahan organik tersebut dianggap cukup lama. Oleh karena itu, untuk mempercepat dekomposisi, dapat digunakan bahan dekomposer yang aman bagi lingkungan.

Penanaman dilakukan pada bulan Maret/April saat permukaan air telah turun. Petani tidak mempunyai standar baku jarak tanam, tetapi biasanya 5 rumpun tanaman untuk setiap depa (1 depa =

1,70 m) atau kira-kira 42,5 x 42,5 cm. Jumlah bibit per rumpun 2–3 bibit, di mana bibit ini telah besar dan kuat. Penanaman di waktu tersebut lebih menguntungkan bagi tanaman karena kelarutan  $\text{Fe}^{2+}$  sedang mengalami penurunan sehingga bibit terhindar dari cekaman keracunan  $\text{Fe}^{2+}$ . Kegiatan pertanaman varietas lokal telah diuraikan oleh Khairullah (2007).

Panen dilakukan pada bulan Juli–September, tergantung varietas dan waktu tanamnya. Sebagian petani secara tradisional memanen dengan ani-ani yang meskipun lambat, tetapi dapat mengurangi kehilangan hasil. Panen dengan ani-ani ini cukup menguntungkan, terutama ketika padi matang tidak serempak. Panen dengan menggunakan sabit lebih cepat, tetapi hasil berasnya sering pecah saat digiling karena tingkat kematangan gabah yang tidak seragam. Apabila dikaitkan dengan kebutuhan tenaga kerja, tentu panen dengan ani-ani memerlukan tenaga kerja yang lebih banyak dan waktu yang lebih lama. Adapun pemrosesan hasil (perontokan) di tingkat petani kebanyakan masih tradisional dengan cara diirik. Biasanya pengirikan dilakukan pada malam hari dan hal ini sering pula dianggap sebagai hiburan karena dilakukan secara bersama-sama. Diperlukan tenaga kerja yang cukup banyak dan waktu yang lebih lama untuk kegiatan perontokan. Saat ini, sebagian petani sudah menggunakan mesin panen *combine harvester* pada lahan yang sudah terbentuk *lapis bajak*. Dengan ini, hasil panen langsung dikemas dalam karung.

Hasil varietas lokal padi pasang surut cukup bervariasi, khususnya pada tanah sulfat masam, yaitu berkisar antara 2–3 t/ha GKG. Hal ini tergantung varietas, kesuburan tanah, dan cara budi dayanya. Hasil ini termasuk rendah dibandingkan varietas unggul. Hasil yang rendah ini masih dapat dikompensasi dengan harga jual yang lebih tinggi. Fluktuasi harga tergantung saat penjualan, di mana pada saat panen harga gabah turun dan akan naik lagi setelah tiga bulan kemudian. Kemampuan petani menahan penjualan gabah sampai saat harga naik merupakan permasalahan di tingkat petani. Kebanyakan petani menjual gabahnya pada saat panen untuk melunasi hutang mereka selama periode penanaman sampai panen (Khairullah, 2007).

#### d. Padi Unggul-Palawija/Hortikultura

Penerapan pola padi unggul-palawija/hortikultura di tanah sulfat masam memerlukan penataan lahan dalam bentuk sistem surjan. Padi unggul ditanam di bagian *tabukan* atau bagian bawah, sedangkan palawija/hortikultura di bagian galangan (bagian atas) (Gambar 5.10). Pola sistem monokultur, tumpang sari, dan tumpang gilir padi-palawija dan musim tanamnya dapat dilihat pada Tabel 7.3.

Penanaman kacang tanah, kedelai, dan jagung dilakukan dengan cara tugal atau alat tanam mekanis lainnya. Jarak tanam kedelai 20×20 cm atau 15×40 cm dengan jumlah tanaman yang dibiarkan tumbuh 2 tanaman/lubang. Jarak tanam kacang tanah 15×30 cm atau 20×20 cm dengan 2 tanaman/lubang. Adapun jarak tanam jagung diatur berdasarkan umur panennya. Jagung berumur panjang (>100 hari) menggunakan jarak tanam 40×100 cm dengan 2 tanaman/lubang, jagung berumur sedang (80–100 hari) menggunakan jarak tanam 25×75 cm dengan jumlah 1 tanaman/lubang, dan jagung berumur pendek (<80 hari) menggunakan jarak tanam 20 cm×50 cm dengan 1 tanaman/lubang (Balittra, 2016). Jarak tanam dan jumlah benih yang ditanam dengan lebih detail dapat dilihat pada Tabel 7.4.

**Tabel 7.3** Contoh Sistem Monokultur, Tumpang Sari, dan Tumpang Gilir Padi-Palawija dan Musim Tanam

Sistem Tanam	Bulan											
	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7
Mono-kultur	Padi gogo			Jagung			Kedelai			Bera		
Tumpang sari	Jagung			Jagung			Kedelai			Bera		
	Padi gogo			Kacang tanah			Jagung			Bera		
Tumpang gilir	Jagung											
	Kacang tanah											
	Jagung						Bera					

Sebelum disemai, benih biasanya dicampur terlebih dahulu dengan fungisida untuk mencegah serangan penyakit yang dibawa oleh benih. Pada lahan yang belum pernah ditanami kedelai atau kacang tanah, perlu diberi rhizobium sebanyak 15 g/ha dengan cara benih dibasahi terlebih dahulu, lalu dicampur dengan rhizobium. Jagung yang ditumpangsarikan dengan padi gogo, kacang tanah, atau kedelai bisa menggunakan jarak antarbarisan 5–6 kali jarak barisan tanaman tumpang sari. Adapun jarak dalam barisan dan jumlah benih per lubangnya sama dengan aturan tersebut. Hal ini berarti bahwa pada setiap kelipatan 5–6 barisan tanaman padi gogo/kacang tanah/kedelai, akan terdapat satu barisan tanaman jagung.

Ubi kayu dan ubi jalar ditanam dengan cara setek batang. Setek ubi kayu harus segera ditanam setelah dipotong-potong sepanjang 25–30 cm. Penanaman dilakukan dengan cara menancapkan setek kira-kira sedalam 10 cm secara tegak lurus pada lahan yang telah dipersiapkan sebelumnya. Jarak tanam bervariasi antara 100×100 cm. Setek ubi jalar sepanjang 30–35 cm ditanam mendatar sedalam 7–10 cm dengan bagian pucuk menyembul (keluar) ke permukaan tanah. Bagian yang tertanam 1/2–2/3 bagian setek dengan jarak tanam bervariasi antara 25×100 cm (Tabel 7.4).

**Tabel 7.4** Jarak Tanam Monokultur Beberapa Komoditas Palawija

Komoditas	Jarak tanam (cm)
Kedelai	15×20; 15×40; 20×30; 20×30;
Kacang tanah	15×30; 20×20
Jagung	40×100; 25×75; 20×50
Kacang hijau	15×40; 20×30; 25×25
Ubi Kayu	60×100; 80×100; 100×100
Ubi jalar	25×100; 30×75

#### 4. Penyiapan Lahan

Umumnya, petani lokal dalam penyiapan lahan untuk budi daya padi menggunakan sistem *tajak-puntal-balik-ampar* (*tapulikampar*) yang merupakan kearifan lokal masyarakat tani Kalimantan. Percepatan tanam dan pola intensifikasi dua kali tanam setahun (IP 200) memerlukan waktu tanam yang tepat dan penyiapan lahan yang cepat. Pada budi daya padi sawah di tanah sulfat masam, telah dikenal penyiapan lahan yang inovatif, yakni tanpa olah tanah (TOT) menggunakan herbisida, olah tanah minimum (OTM) dengan rotari, dan sistem olah tanah sempurna bersyarat (OTSB).

Penyiapan lahan dengan TOT dan OTM dapat dilakukan pada sawah yang intensif, sedangkan OTM pada lahan yang padat dan permukaan bergelombang. Persyaratan yang diperlukan untuk menerapkan OTSB adalah lahan sawah harus dalam keadaan berair, kedalaman olah tidak lebih dari 20 cm atau kedalaman ideal sekitar 12–15 cm, dan dilakukan upaya pencucian lahan setelah selesai pengolahan tanah. Penyiapan lahan untuk tanaman palawija di tanah sulfat masam dapat dilaksanakan dengan sistem olah konservasi yang dilakukan dengan cara OTM maupun TOT. Penanaman hortikultura di tanah sulfat masam diusahakan pada tipologi luapan C dan D, sedangkan pada tipologi luapan B penanaman dilakukan di atas surjan. Penyiapan lahan dimulai dari pembuatan saluran kemalir dengan lebar 25–30 cm, kedalaman 20–25 cm, dan jarak antarkemalir 9 m. Pengolahan tanah dilaksanakan dengan sistem olah konservasi yang dilakukan dengan cara OTM maupun TOT dengan menggunakan herbisida sistemik atau kontak (Balittra, 2016).

Berdasarkan kepemilikan lahan, lahan pasang surut tanah sulfat masam umumnya dimiliki minimal 2,25 ha per kepala keluarga, sedangkan ketersediaan tenaga kerja keluarga hanya mampu mengusahakan lahan secara intensif seluas 0,7 ha. Oleh karena itu, pengolahan tanah memerlukan mekanisasi. Kebutuhan tenaga kerja untuk penyiapan lahan secara manual sebesar 33,5 HOK/ha, sedangkan secara mekanis hanya 8 HOK/ha. Kegiatan tanam secara manual/tradisional membutuhkan tenaga sebesar 29 HOK/ha, sedangkan secara mekanis

3 HOK/ha. Kegiatan panen secara manual membutuhkan tenaga kerja 21 HOK/ha, sedangkan secara mekanis 9 HOK/ha. Adapun untuk kegiatan perontokan secara manual memerlukan tenaga kerja 17 HOK/ha, sedangkan secara mekanis 4 HOK/ha (Balittra, 2013). Dengan demikian, teknologi mekanisasi pertanian dapat menghemat tenaga kerja dalam kegiatan seperti penyiapan lahan, pengolahan tanah, penanaman, panen, dan pemrosesan hasil.

Aspek penyiapan lahan, pemupukan, dan pemberian bahan amelioran menjadi sangat penting dalam pola tanam ini. Penyiapan lahan merupakan pekerjaan awal dari persiapan tanam. Cara penyiapan lahan disesuaikan dengan karakteristik lahan pada rencana lokasi pertanaman dan waktu. Untuk pertanaman pertama, penyiapan lahan dapat dilakukan dengan sistem *tapulikampar* ataupun OTSB. Jika kedalaman lapisan bahan sulfidik <50 cm, sebaiknya dilakukan TOT ataupun *tapulikampar*, tetapi jika >50 cm, dapat dilakukan OTSB. Pengolahan tanah dapat dilakukan dengan membajak tanah kemudian digaru. Penggaruan lahan sebaiknya dilakukan pada saat pasang tunggal agar air pasang dapat ditahan di dalam petakan sawah untuk dikeluarkan pada keesokan harinya, dan kemudian pada saat pasang berikutnya, diisi kembali dengan air pasang. Pekerjaan ini dimaksudkan untuk pencucian terhadap unsur/senyawa toksik yang terangkut ke permukaan saat pengolahan tanah, seperti Fe (Saragih & Nurzakiah, 2011).

Pada pertanaman kedua, penyiapan lahan dapat dilakukan dengan sistem TOT. Menurut Ar-Riza et al. (2007), pengolahan tanah tidak perlu dilakukan setiap musim tanam, tetapi cukup sekali dalam dua musim tanam. Namun, mengingat waktu yang cukup sempit, penyiapan lahan sebaiknya dilakukan dengan menggunakan *gelebeg* pada saat lahan sawah berair.

## 5. Ameliorasi

Ameliorasi lahan merupakan upaya memberikan bahan amelioran untuk memperbaiki sifat fisika, kimia, dan biologi tanah sehingga kondisi tanah menjadi lebih sesuai (*favorable*) bagi tanaman dan

mampu memproduksi maksimum. Petani di tanah sulfat masam menggunakan beberapa amelioran, antara lain pupuk, kompos, gipsum, fosfat alam, biochar, dan kapur.

#### **a. Aplikasi Kapur dan Bahan Organik**

Selain pupuk kandang, petani bisa menggunakan jerami padi dan gulma *insitu* dengan sistem *tapulikampar*. Kegiatan ini merupakan proses pengomposan secara alami pada kondisi anaerobik yang dapat mengurangi kehilangan nitrogen dan mengkhelat Fe dan Al. Bahan amelioran lainnya yang dianjurkan adalah kapur atau dolomit yang bertujuan untuk membenahi atau memperbaiki sifat kimia tanah. Dosis kapur/dolomit sebagai bahan amelioran disesuaikan dengan kondisi lahan. Pada lahan sulfat masam bukaan baru dengan tingkat kemasaman tanah ( $\text{pH} < 5$ ), pemberian kapur yang dibutuhkan sekitar 1,0–1,5 t/ha. Adapun pada lahan yang sebelumnya telah dimanfaatkan untuk pertanaman padi, dosis kapur diberikan hanya 0,5 t/ha (Khairullah, 2018). Pemberian kapur dilakukan setelah pengolahan tanah atau dua minggu sebelum tanam dengan cara disebar merata di seluruh petakan sawah.

Amelioran yang digunakan biasanya kapur ditambah dengan pupuk kandang, kompos, abu, atau tanah klei. Amelioran diberikan untuk tanaman palawija, seperti jagung, kedelai, dan kacang tanah, sedangkan ubi kayu dan ubi jalar umumnya tidak menggunakan bahan tersebut. Pada penanaman tahap pertama, biasanya jumlah kapur yang digunakan antara 3–5 t/ha dan diberikan dengan cara disebar. Pada penanaman kedua dan seterusnya, untuk menghemat biaya, biasanya menggunakan kapur sebanyak 0,2–0,5 t/ha yang diberikan pada larikan tanaman (Balittra, 2016).

#### **b. Pemupukan Anorganik**

Pada awalnya, petani tidak melakukan pemupukan anorganik, seperti urea, TSP/SP-36, atau KCl. Hasil dekomposisi bahan organik dianggap cukup untuk pertumbuhan tanaman sehingga sebagian petani hanya memberikan garam dapur dengan dosis seadanya. Akan tetapi, akhir-akhir ini sebagian petani telah melakukan pemupukan anorganik.

Hal ini berkaitan dengan telah menipisnya ketersediaan bahan organik dalam tanah. Meskipun demikian, pupuk yang diberikan kebanyakan hanya urea dan/atau SP-36 saja dengan dosis tidak menentu. Sangat jarang diperoleh informasi petani melakukan pemupukan dengan menggunakan pupuk KCl. Hal ini tentu saja merugikan tanaman. Berdasarkan informasi yang didapat dari petani, hasil padi dapat meningkat dengan melakukan pemupukan. Pemberian garam dapur dalam jangka pendek mungkin menguntungkan petani, tetapi dalam jangka panjang justru merugikan karena amelioran tersebut akan merusak struktur tanah. Untuk meningkatkan hasil padi lokal, dapat dilakukan pemupukan 45 kg/ha N, 60 kg/ha  $P_2O_5$ , dan 60 kg/ha  $K_2O$  (Balittra, 2016).

Pemupukan bertujuan untuk menambah unsur hara agar tingkat ketersediaannya meningkat. Penambahan unsur hara dilakukan berdasarkan status hara tanah dan kebutuhan tanaman agar kondisi hara dalam tanah berimbang atau sesuai target produksi tanaman yang akan dicapai. Penentuan dosis N, P, dan K berdasarkan uji tanah dapat menggunakan alat Perangkat Uji Tanah Rawa (PUTR), sedangkan pemberian pupuk N susulan dilakukan dengan menggunakan Bagan Warna Daun (BWD).

Aplikasi *Decision Support Sistem* (DSS) dapat digunakan untuk rekomendasi pemupukan padi. Aplikasi DSS kini sudah dikembangkan menjadi aplikasi PATRA (Pemupukan Tanaman di Lahan Rawa) yang dapat diakses menggunakan *smartphone* melalui Google Playstore. Dosis pemupukan dalam aplikasi ini menyesuaikan dengan karakteristik lahan atau status hara tanahnya.

Selain rekomendasi dari aplikasi tersebut, pertanaman padi dapat juga menggunakan dosis pupuk dengan kisaran 67,5–90 N + 70–90  $P_2O_5$  + 50–60  $K_2O$  (kg/ha). Pupuk N diberikan bertahap dua atau tiga kali. Pemberian pertama dilakukan satu minggu setelah tanam sebanyak sepertiga atau setengah dosis pupuk N yang bersumber dari urea dan diberikan bersamaan dengan seluruh dosis pupuk P dan K. Sisa pupuk N diberikan saat umur tanaman 30 hari setelah tanam. Saat ini, petani sering memberikan pupuk urea dan pupuk mejemuk

NPK. Dosis aplikasinya sekitar 200 kg/ha urea dan 300 kg/ha NPK. Upaya peningkatan efisiensi penggunaan pupuk di lahan rawa pasang surut dilakukan melalui pemberian pupuk yang disesuaikan dengan ketersediaan hara tanah dan varietas tanaman yang ditanam. Dari beberapa hasil penelitian pengelolaan hara yang dilakukan oleh Balittra, diperoleh dosis pupuk untuk tanaman padi seperti pada Tabel 7.5.

**Tabel 7.5** Dosis Amelioran pada Tanaman Padi di Lahan Pasang Surut

Tipe Lahan	Dosis Amelioran (kg/ha)				
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CuSO <sub>4</sub>	ZnSO <sub>4</sub>
Potensial	45–90	22,5–45	50	-	-
Sulfat masam	67,5–135	45–70	50–75	-	-
Gambut	45	60	50	5	10

Sumber: Noor (2004)

Metode pemupukan anorganik yang dianjurkan Dinas Pertanian terdiri atas pupuk urea, TSP, dan KCl dengan dosis yang disesuaikan dengan kondisi setempat. Pada tanaman kedelai dan kacang tanah, TSP biasanya diberikan sekaligus pada saat tanam. Namun, urea dan KCl diberikan dua kali yaitu ½ bagian pada saat tanam dan sisanya pada umur 3 minggu setelah tanam atau bersamaan dengan pembuatan galangan dan penyiangan. Pupuk-pupuk tersebut diberikan dengan cara dimasukkan ke dalam lubang memanjang (larikan) yang dibuat sejajar dengan barisan tanaman. Setelah pupuk dimasukkan, tanah kemudian ditutup dan dipadatkan.

Untuk meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk anorganik, dapat dilakukan pemberian pupuk hayati, yakni Biotara dan Biosure. Biotara merupakan pupuk hayati yang terdiri dari konsorsium mikroba dekomposer (*Trichoderma sp*), pelarut-P (*Bacillus sp*), dan penambat N (*Azospirillum sp*) yang dapat meningkatkan hasil padi sampai 20% dan mengefisienkan penggunaan pupuk NPK sebesar 30%. Biosure merupakan pupuk hayati yang terdiri dari konsorsium

bakteri pereduksi  $\text{SO}_4$  (*Desulfovibrio sp*) yang berperan dalam proses reduksi  $\text{SO}_4$  sehingga dapat meningkatkan pH tanah dan produktivitas tanaman padi (Mukhlis et al., 2010).

Pada tanaman jagung, pupuk urea dan KCl diberikan tiga kali, yaitu 1/3 bagian pada saat tanam, 1/3 bagian pada saat umur satu bulan, dan 1/3 bagian pada saat umur 45 hari. Pupuk untuk tanaman jagung sebaiknya ditempatkan di lubang yang dibuat dengan menggunakan tugal pada jarak 7–15 cm dari lubang tanaman.

## 6. Pengendalian Organisme Pengganggu Tanaman

Organisme pengganggu tanaman (OPT) yang terdiri dari hama, penyakit, dan gulma, merupakan masalah utama yang sering menyerang tanaman pangan dan hortikultura di tanah sulfat masam. Organisme tersebut, apabila tidak dikendalikan dengan benar, dapat menurunkan kualitas dan kuantitas hasil tanaman. Meskipun demikian, pengendalian hama dan penyakit tanaman masih minim dilakukan. Pengendalian yang sangat dianjurkan adalah pengendalian secara terpadu, seperti pengaturan pola tanam, termasuk pergiliran varietas dan penggunaan musuh alaminya. Secara kimiawi, biasanya dilakukan penyemprotan terhadap hama dengan bergantung pada jenis hamanya dan pestisida yang diaplikasikan harus yang sudah direkomendasikan oleh pemerintah.

### a. Pengendalian Hama dan Penyakit Tanaman

Hama yang sering menyerang tanaman di tanah sulfat masam sama dengan di tanah mineral lahan kering, yaitu tikus, penggerek batang, walang sangit, lembing batu atau kepinding tanah, hama putih palsu, dan wereng coklat. Adapun penyakit yang sering menyerang adalah blas leher, bercak coklat daun, dan hawar pelepah daun. Pada tanaman kelapa sawit, hama utama yang menyerang adalah ulat pemakan daun (ulat api, ulat kantong, ulat bulu, dan tungau), perusak buah (tikus), penggerek pucuk (kumbang), dan tandan buah (*Tirathaba mundella* dan *Tirathaba rificivena*). Penyakit utama pada kelapa sawit adalah busuk tandan buah (*Marasmius palmivorus*), busuk pangkal batang, dan busuk kering pangkal batang. Hama utama yang menyerang

ranting dan daun tanaman karet umur di bawah 6 tahun adalah kutu (*Lacciper greeni* dan *Planococcus citri*). Penyakit utama yang menyerang daun muda tanaman karet adalah penyakit embun tepung (*Oidium heveae*) dan penyakit daun (*Colletotrichum gloeosporioides*). Selain itu, penyakit kanker garis (*Phytophthora palmivora* Butl), jamur upas (*Cortisium salmonicolor*), penyakit bidang sadapan (*Ceratocystis fimbriata*), dan penyakit akar putih (*Fomes lignosus*) juga dapat menyebabkan penurunan produktivitas tanaman. Serangan tersebut sering terjadi pada musim hujan karena kondisi lingkungan kebun yang lembap sehingga menstimulasi berkembangnya penyakit.

Pengendalian hama dan penyakit perlu dilakukan secara terpadu melalui cara:

- 1) menanam varietas toleran atau tahan terhadap serangan hama/ penyakit,
- 2) mengendalikan gulma yang menjadi inang hama dan penyakit,
- 3) melakukan pergiliran tanaman untuk memutus siklus hama,
- 4) melakukan tanam serentak,
- 5) memperbaiki drainase,
- 6) mempertahankan musuh alami,
- 7) menjaga sanitasi lingkungan, dan
- 8) menggunakan pestisida dalam batas ambang ekonomi sebagai alternatif terakhir.

Hama dan penyakit yang menyerang tanaman perkebunan di tanah sulfat masam cukup tinggi. Oleh karena itu, perlu dilakukan pencegahan dan penanggulangan serangan hama dan penyakit secara umum dengan:

- 1) menjaga kebersihan lingkungan,
- 2) menggunakan varietas yang tahan atau toleran terhadap hama dan penyakit penting,
- 3) melakukan pemupukan segera apabila ada gejala kahat hara,
- 4) melakukan pemangkasan tanaman secara disiplin sehingga udara di pertanaman tidak terlalu lembap saat musim hujan, serta
- 5) mencabut, membongkar, dan membakar tanaman yang terserang penyakit menular.

Adapun pencegahan penularan penyakit dilakukan dengan cara menyemprotkan fungisida.

## **b. Pengendalian Gulma**

Penyiangan rumput/gulma biasanya hanya dilakukan pada awal-awal pertumbuhan saja. Namun, kebanyakan petani tidak melakukan penyiangan karena bentuk tajuk padi yang panjang menjuntai sehingga dapat menutup permukaan tanah. Dengan demikian, pertumbuhan gulma dapat ditekan akibat distribusi sinar matahari yang kurang di bagian bawah/permukaan tanah. Meskipun demikian, penyiangan sangat diperlukan untuk meningkatkan hasil tanaman. Gulma dapat menurunkan hasil padi hingga 50% karena persaingan penyerapan hara, air, serta sinar matahari. Batas kritis penutupan gulma 25%–30%. Apabila penutupan tersebut di atas batas kritis, diperlukan pengendalian. Pengendalian dapat menggunakan herbisida kontak maupun sistemik yang efektivitasnya tergantung pada jenis gulma sasaran, dosis herbisida, cara, dan waktu aplikasi.

Pengendalian gulma dilakukan setiap dua minggu dengan cara mencabut gulma dengan menggunakan tangan, koret, atau cangkul. Pembumbunan biasanya dilakukan pada tanaman jagung untuk mencegah kerebahan. Pembumbunan pada tanaman ubi kayu dimaksudkan untuk menutup perakaran yang muncul ke permukaan tanah. Pembumbunan dilakukan dengan sedikit meninggikan bagian barisan tanaman dengan menggunakan tanah.

Tanaman ubi jalar memerlukan perawatan tambahan berupa pembalikan batang. Hal ini dimaksudkan untuk mencegah terbentuknya umbi di sepanjang batang karena batangnya menjalar dan sebagian besar menempel di permukaan tanah. Akar dan umbi yang dibiarkan tumbuh hanya yang terbentuk pada buku-buku batang yang terpendam di dalam tanah. Pembalikan batang dilakukan tiga minggu setelah tanam dan selanjutnya setiap dua minggu sekali dengan cara mengangkat batang yang menjalar dan membalikkannya agar tidak terbentuk akar.

### c. Panen dan Pascapanen

Panen dilakukan apabila tanaman sudah mencukupi umurnya dengan melihat tanda-tanda kematangan buah/bulir padi. Buah padi yang masak akan terlihat berisi, berwarna kuning, dan kandungan airnya sekitar 25%. Tanaman padi yang sudah dapat dipanen terlihat dari batangnya yang mulai menguning dan menunduk (tidak tegak) pada lebih dari 80% luas areal tanaman. Seminggu sebelum panen, sawah dikeringkan terlebih dahulu untuk mencegah terjadinya rebah dan memudahkan proses panen. Panen dapat menggunakan alat, seperti sabit atau parang, dengan memotong ujung pangkal batang bawah. Padi lokal yang tidak mudah rontok biasanya dipanen secara tradisional dengan menggunakan ani-ani. Penggunaan ani-ani membutuhkan tenaga kerja relatif banyak sehingga akhir-akhir ini kurang diminati.

Setelah seluruh areal sawah dipanen, gabah dirontokkan dari tangkainya. Kegiatan ini dapat dilakukan melalui dua cara, yaitu dengan menggunakan mesin perontok padi atau dengan cara dibanting dan diinjak-injak. Gabah yang rontok kemudian dijemur di bawah sinar matahari sampai kering (kadar air 12%–15%). Ciri gabah yang sudah kering, yakni sudah keras dan dapat dipatahkan dengan tangan dan apabila digigit, patah dan berbunyi.

Selain secara konvensional, panen dapat dilakukan dengan menggunakan alat mesin pertanian, seperti *combine harvester* untuk tanaman padi. Akan tetapi, penggunaan *combine harvester* memerlukan persyaratan kondisi lahan tertentu, seperti tingkat genangan lahan. Meskipun demikian, penggunaan alat *combine harvester* secara ekonomis lebih menguntungkan karena mampu menghemat biaya dan waktu.

## **BAB 8**

# **Budi Daya Tanaman di Tanah Gambut**

Secara sederhana, tanah gambut didefinisikan sebagai tanah yang komposisi penyusunnya didominasi oleh bahan organik yang relatif resistan terhadap proses dekomposisi. Definisi tersebut juga harus memperhatikan kandungan klei dalam tanah tersebut serta ketebalan lapisan organiknya. Tanah gambut di Kalimantan terbentuk dari sisa vegetasi yang terakumulasi pada kondisi tergenang sehingga mengakibatkan terhambatnya proses dekomposisi. Menurut Chimner dan Ewel (2005), laju penimbunan gambut di daerah tropika relatif lebih cepat daripada daerah nontropika. Akan tetapi, oleh karena gambut di daerah tropika tersusun dari bahan berkayu, pembaruannya berjalan lambat sehingga jika terjadi degradasi, kerusakan yang terjadi hampir tidak dapat dipulihkan.

Pada Bab 8 tentang budi daya tanaman di lahan gambut ini, dibahas secara khusus lahan gambut yang telah dimanfaatkan sebelumnya oleh masyarakat luas yang umumnya digunakan untuk pertanian. Sesuai dengan kebijakan pemerintah, pembukaan lahan gambut untuk pertanian telah dibatasi dengan ditetapkannya Inpres No. 5

Tahun 2019. Konvensi Ramsar telah mengakui perlunya peningkatan perhatian atas konservasi lahan gambut dan pemanfaatannya secara bijaksana serta perannya dalam menanggulangi perubahan iklim. Berdasarkan ketentuan perundangan-undangan, telah diatur syarat penggunaan lahan gambut dengan ketentuan yang tertera pada masing-masing peraturan, antara lain PP No. 150 Tahun 2000 tentang Pengendalian Kerusakan Tanah untuk Produksi Biomassa (termasuk mengatur tentang lahan gambut); Permentan No. 14 Tahun 2009 tentang Budi Daya Kelapa Sawit di Lahan Gambut; dan PP No. 71 Tahun 2014 (yang kemudian diganti oleh PP No. 57 Tahun 2016) tentang Perlindungan dan Pengelolaan Ekosistem Gambut. Pada peraturan-peraturan tersebut, dinyatakan bahwa lahan gambut yang dapat dimanfaatkan untuk pertanian adalah lahan gambut yang ketebalannya kurang dari 3 meter dan di bawah lapisan gambutnya bukan merupakan sulfat masam atau pasir kuarsa, tinggi muka air tanah tidak lebih dari 50 cm dari permukaan tanah, serta 30% dari wilayah pengembangan merupakan wilayah konservasi (lindung). Sehubungan dengan hal tersebut, pemanfaatan lahan gambut untuk pertanian haruslah dilakukan dengan sangat hati-hati dan memperhatikan aspek-aspek lainnya, antara lain aspek lingkungan dan sosial-ekonomi masyarakat.

### **A. Kendala Budi Daya Tanaman di Tanah Gambut**

Pengembangan lahan bergambut dan gambut dangkal untuk persawahan menghadapi beberapa kendala, terutama masalah biofisik lahan. Selain tingkat kemasaman tanah yang tinggi dan keracunan asam-asam organik, juga terdapat permasalahan kahat hara makro terutama P, K, dan basa-basa dapat tukar, serta kahat unsur mikro Cu, Zn, dan B (Widjaja-Adhi et al., 2000; Sarwani & Widjaja-Adhi, 1994). Pada lahan gambut, asam-asam organik tinggi yang menyebabkan tanah menjadi masam. Oleh karena itu, diperlukan bahan amelioran untuk memperbaiki kondisi lahan tersebut (Widjaja-Adhi et al., 2000).

Budi daya padi di lahan gambut umumnya masih bersifat tradisional yang diusahakan sekali setahun dengan menggunakan sistem

tanam pindah, varietas lokal, pupuk terbatas, dan produktivitas rendah antara 1,5–2,0 t/ha GKG (Khairullah, 2007; Saragih & Nurzakiah, 2011). Selain peluang untuk peningkatan produktivitas, di beberapa lokasi, IP juga berpeluang ditingkatkan. Peningkatan intensitas tanam menjadi dua atau tiga kali setahun (IP 200–300) memerlukan dukungan, antara lain revitalisasi jaringan tata air makro, jaringan tata air mikro pada hamparan persawahan yang baik, varietas yang adaptif dan berumur genjah, alat dan mesin pertanian, serta pupuk dan pestisida.

Adapun masalah produktivitas pada perkebunan kelapa sawit dan karet di lahan gambut, antara lain kemasaman tanah, keracunan asam-asam organik, kahat hara terutama hara mikro, serta hama dan penyakit tanaman sehingga diperlukan bahan amelioran yang relatif besar. Selain itu, kendala lainnya terkait dengan infrastruktur, seperti tata air yang belum optimal. Proses pembuatan surjan di lahan gambut disinyalir dapat menimbulkan dampak pencemaran lingkungan, antara lain pemasaman air akibat dari melarutnya asam organik. Gejala kekurangan unsur hara dengan tanda-tanda spesifik sering juga terjadi pada tanaman padi di lahan gambut. Misalnya, bulir hampa yang umumnya disebabkan karena kekurangan unsur mikro Cu. Apabila tanaman menunjukkan gejala ini, pada penanaman berikutnya perlu ditambah dengan pupuk yang mengandung unsur tersebut, seperti  $\text{CuSO}_4$  (terusi).

## **B. Budi Daya Tanaman Pangan**

Teknologi budi daya tanaman pangan, hortikultura, dan perkebunan di lahan gambut bersifat spesifik. Tanaman pangan yang umum diusahakan adalah padi di lahan gambut dangkal (<1 m) sampai gambut sedang (1–2 m). Sistem pertanian padi di tanah gambut lahan pasang surut dengan tipe luapan B diarahkan kepada budi daya padi sawah, sedangkan pada tipe luapan C dan D, pertanian diarahkan kepada padi gogo atau padi lahan kering. Umumnya, permasalahan tanaman padi di lahan gambut adalah terkait pengelolaan air. Produktivitas padi di lahan gambut sangat beragam, misalnya padi lokal antara

2,0–3,0 t/ha GKG dan padi varietas unggul antara 3,5–5,5 t/ha GKG. Tanaman pangan lainnya berupa palawija, seperti jagung dan kacang-kacangan banyak diusahakan di lahan gambut, khususnya tipe luapan C. Komoditas jagung bisa ditanam secara monokultur atau polikultur bersama padi menggunakan sistem surjan. Potensi lahan gambut untuk tanaman palawija cukup baik, misalnya jagung dapat mencapai 2,0–2,5 t/ha (pipilan kering), kedelai 2,0–2,3 t/ha (biji kering), kacang hijau 2,5 t/ha (biji kering), dan kacang tanah 3,0 t/ha (biji kering) (Balittra, 2011). Komponen teknologi untuk pengembangan tanaman pangan di lahan gambut adalah pengelolaan air, penataan lahan, pemilihan varietas, penyiapan lahan dan pengolahan tanah, ameliorasi dan pemupukan, pemilihan varietas, serta pola tanam.

Palawija yang sering ditanam di lahan gambut, di antaranya jagung, kacang tanah, kedelai, ubi kayu, dan ubi jalar. Varietas yang digunakan harus yang telah diseleksi secara khusus dan direkomendasikan untuk lahan rawa. Beberapa varietas kacang tanah, kedelai, dan jagung yang telah terbukti tumbuh dan berproduksi baik di lahan rawa bisa dilihat pada Tabel 8.1. Hingga saat ini, belum banyak penelitian varietas ubi kayu, ubi jalar, dan hortikultura semusim khusus untuk lahan rawa. Namun, dari pengamatan di beberapa daerah, oleh karena umur ubi kayu yang relatif panjang, sebaiknya dipilih varietas yang umurnya relatif pendek (7–8 bulan) untuk menghindari kebanjiran. Contoh varietas ubi kayu yang berumur pendek ialah Gading, Muara, dan Adira.

**Tabel 8.1** Beberapa Contoh Varietas Tanaman Palawija di Lahan Gambut

No.	Komoditas	Varietas
1.	Kacang tanah	Gajah, Macan, Kidang, Pelanduk, Kelinci, Badak
2.	Kedelai	Kerinci, Lokon, Wilis, Guntur, Tidar, Dempo, Lawit
3.	Jagung	Wiyasa, Arjuna, Kalingga, Abimayu, Semar 1, Sukmaraga
4.	Ubi kayu	Gading, Muara, Adira
5.	Ubi jalar	AB94001-8, MIS 110-1

## 1. Pemilihan Varietas

Tanaman pangan adalah tanaman yang hasil/produksinya merupakan bahan konsumsi manusia sebagai sumber karbohidrat atau protein. Dari jenis tersebut, tanaman yang banyak dibudidayakan secara intensif di lahan gambut, antara lain jagung, kacang tanah, kedelai, padi, ubi kayu, ubi jalar, dan sagu. Adapun jenis lainnya dipelihara untuk sekadar mencukupi kebutuhan sendiri atau diambil dari tumbuhan liar di hutan. Dalam kelompok ini, juga terdapat jenis tanaman pangan tahunan, yaitu sagu yang umumnya belum dibudidayakan secara intensif di lahan gambut.

Permasalahan kesuburan tanah di lahan gambut adalah kahat unsur hara mikro Cu dan Zn. Pemupukan Cu dan Zn, baik melalui tanah maupun lewat daun dengan pupuk cair, menjadi keharusan untuk keberhasilan pertanaman padi di lahan gambut. Pilihan varietas padi dapat beragam, sepanjang kedua unsur tersebut dapat dipenuhi. Varietas unggul padi yang dapat dipilih adalah Inpara-1 sampai Inpara-9 atau menggunakan varietas unggul padi sawah irigasi, seperti Inpari-11, Inpari-21, dan/atau Inpari-26.

## 2. Penyiapan Benih dan Bibit

Penyiapan bibit padi untuk varietas padi lokal mencakup persemaian yang dilakukan beberapa tahap (*teradak*, *ampak*, dan *lacak* atau pindah tanam), penyiapan lahan, tanam, pemupukan, pemeliharaan dan pengendalian OPT, serta panen dan pemrosesan hasil atau pascapanen yang dilakukan secara *indigenous*. Teknologi budi daya *indigenous* ini sampai sekarang di persawahan pasang surut sulfat masam, seperti di Kalimantan Selatan, masih banyak dilakukan petani, terutama untuk kepemilikan sawah yang sempit atau dengan luas terbatas (Khairullah, 2016; 2018). Secara detail, persiapan benih padi varietas lokal dapat dilihat dalam Bab 7.

Untuk padi varietas unggul, diperlukan benih sekitar 25–30 kg/ha. Persemaian basah dilakukan di lahan sawah dengan cara ditabur pada bedeng yang sudah disiapkan sebelumnya. Bibit dipelihara hingga berumur 21–25 hari setelah semai.

Kacang tanah, kedelai, dan jagung diperbanyak secara generatif dengan menggunakan benih. Adapun ubi kayu dan ubi jalar ditanam secara vegetatif dan menggunakan setek batang. Selain setek, ubi kayu juga bisa diperbanyak dengan okulasi, yaitu dengan menyambungkan batang bawah dari jenis ubi kayu biasa dengan karet (*M glaziovii*) sebagai batang atas. Ubi kayu jenis ini biasanya berproduksi tinggi, tetapi mengandung senyawa asam sianida (HCN) beracun yang tinggi sehingga rasanya pahit dan hanya boleh untuk diproses menjadi tepung.

Untuk tahap pertama, benih dan bibit harus diambil dari sumber benih/bibit yang benar-benar dapat dipercaya, seperti PT Pertani, dinas pertanian setempat, penangkar benih, dan toko-toko pertanian yang resmi sebagai penyalur benih agar mutu dan varietasnya betul-betul terjamin. Bibit atau benih yang berkualitas biasanya dijual dengan disertai label/sertifikat yang dikeluarkan oleh Balai Benih. Untuk tahap selanjutnya, benih bisa digunakan dari hasil pertanaman sendiri hingga 3–4 kali musim tanam. Benih dari pertanaman sendiri harus memenuhi syarat sebagai berikut.

- 1) Benih dipanen setelah buah matang fisiologis.
- 2) Benih diambil dari tanaman yang sehat, berproduksi tinggi, dan tumbuh seragam.
- 3) Benih harus bernas, tidak keriput, mengkilap, tidak luka; bersih dari kotoran, hama penyakit, dan gulma; serta berkadar air kurang lebih 11%.
- 4) Benih disimpan dalam ruangan berkadar air kurang dari 60%. Khusus untuk kedelai, harus digunakan sebelum 8 bulan di penyimpanan karena apabila lebih dari 8 bulan, benih biasanya sudah mati.

Bibit ubi kayu dan ubi jalar untuk pertanaman selanjutnya bisa terus menggunakan bibit dari pertanaman sendiri asal diambil dari tanaman yang sehat dan kuat, mempunyai pertumbuhan yang baik, dan berproduksi tinggi. Setek ubi kayu dipilih dari tanaman yang sudah tua atau lebih dari 7 bulan dan berbatang lurus. Bagian

batang yang diambil adalah bagian bawah sampai pertengahan yang warnanya sudah coklat dan memiliki tunas. Batang muda yang masih berwarna hijau kurang baik karena mudah busuk. Batang yang sudah disiapkan lalu dipotong-potong sepanjang 20–25 cm. Ujung setek bagian bawah dibuat meruncing.

Setek ubi jalar diambil dari tanaman yang sudah berumur kurang lebih 2,5 bulan. Untuk bagian batang yang ditanam, dipilih bagian pucuk yang segar dan kekar sepanjang 20–25 cm. Setelah itu, daun-daun setek dipotong dan disisakan 3 buah pada bagian ujungnya. Setek ini kemudian disimpan dalam keadaan kering (tidak basah) selama 1–6 hari di ruang yang teduh dan lembap.

### 3. Penyiapan Lahan

Penyiapan lahan yang dilakukan petani di lahan gambut dikenal sangat beragam, seperti (1) bersifat tradisional yang disebut sistem tebas-bakar (*slash and burn*), (2) menggunakan tajak (sejenis parang panjang, serta (3) menggunakan herbisida dan tanpa bakar. Pada lahan gambut sedang (agak tebal), tidak diperlukan olah tanah atau cukup dangkal (tidak intensif). Pengolahan tanah secara intensif, seperti yang dilakukan menggunakan cangkul dengan kedalaman olah 20 cm pada lahan gambut tebal di Sumatra Barat, justru dapat memperburuk kemasaman tanah, dari semula pH 4,2 turun menjadi pH 2,7 yang diikuti menurunnya hasil padi akibat lapisan bahan sulfidik yang tersingkap.

Secara umum, penyiapan lahan untuk budi daya padi di lahan gambut dapat dibedakan menjadi (1) penyiapan lahan pertama, kegiatan ini dikaitkan dengan pembukaan lahan atau pencetakan lahan untuk sawah atau ladang (padi); dan (2) penyiapan lahan kedua, kegiatan ini dilakukan pada lahan budi daya untuk mempersiapkan lahan sebelum ditanami, inilah yang disebut sebagai penyiapan lahan. Penyiapan atau pembukaan lahan gambut untuk tanaman pangan perlu mengacu pada Peraturan Pemerintah No. 150 Tahun 2000 tentang Pengendalian Kerusakan Tanah untuk Produksi Biomassa, dan Undang-Undang No. 18 Tahun 2004 tentang Perkebunan Pangan

yang antara lain mengatur tentang pembukaan atau penyiapan lahan tanpa bakar (PLTB).

Sistem tajak merupakan cara penyiapan lahan sekaligus pengolahan tanah dengan menggunakan tajak (sejenis parang panjang dengan tangkai pengendali, bentuknya seperti stik golf). Tajak digunakan dengan cara diayunkan untuk memotong sisa-sisa gulma rumput atau jerami sekaligus memotong (mengupas) dan membalikkan lapisan tanah bagian atas setebal 5 cm sehingga termasuk pengolahan tanah minimum (*minimum tillage*) (Gambar 5.14). Sistem tajak ini masih banyak digunakan petani tradisional. Setelah ditebas, sisa serasah dan rumput tersebut dipilin membentuk seperti bola (dipuntal), kemudian dibiarkan terendam air dan dibalik setelah agak lama dan matang, lalu ditebarkan (dihampar) ke permukaan lahan. Sistem penyiapan lahan ini disingkat dengan “*tapulikampar*” yang artinya setelah ditebas dengan tajak (*ta-*), gulma dan sisa jerami dipuntal (*pu-*) dijadikan satu seukuran bola kaki, kemudian dibalik (*lik-*) sehingga bagian bawah ke atas dan bagian atas ke bawah. Terakhir, gulma berbentuk bola kaki tersebut sudah cukup matang (terdekomposisi) lantas dihampar (*-ampar*) dan disebar merata di permukaan lahan sawah (Noor, 2012). Pada masa saat ini, sebelum gulma ditajak, petani menggunakan herbisida terlebih dahulu untuk mematikan gulma-gulma yang tumbuh di permukaan tanah sehingga menghemat waktu dan memudahkan pengoperasian tajak.

Teknologi pembukaan lahan PLTB dan penyiapan lahan dengan sistem olah tanah konservasi, termasuk *zero tillage* atau *minimum tillage* (tanpa olah tanah) dan olah tanah sempurna bersyarat yang penerapannya tergantung pada jenis tanaman, kedalaman gambut, kedalaman lapisan pirit, dan musim. Pengolahan tanah pada lahan gambut tebal (>1 m) dapat menimbulkan kekeringan sehingga rawan terbakar. Pada lahan gambut yang bersubstratum pirit, pengolahan tanah dapat menimbulkan pemasaman tanah dan keracunan Fe. Pengolahan tanah hanya dianjurkan pada musim hujan. Hal ini karena jika dilakukan pada musim kemarau, pengolahan tanah justru dapat mempercepat kekeringan.

Penyiapan lahan secara mekanis untuk mempercepat dan memudahkan sudah banyak diterapkan dengan dibantu herbisida yang dikombinasi dengan cangkul. Hal ini ternyata lebih baik dibanding dengan dibajak. Pada keadaan tanah yang sudah mantap, sudah tidak dijumpai lagi tunggul (patok-patok) kayu di permukaan lahannya sehingga dapat digunakan traktor tangan atau jenis traktor kura-kura. Pengolahan tanah dengan cangkul atau traktor tangan (*hand tractor*) hanya dapat dilakukan pada tanah gambut dangkal dan tidak dilakukan setiap musim tanam. Penggunaan traktor tidak dianjurkan untuk tanah gambut sedang (ketebalan 1–2 m).

Penyiapan lahan untuk palawija pada lahan gambut harus ditata sebagai tegalan di musim kemarau, khususnya tanah gambut di lahan lebak, dan galangan pada sistem surjan di lahan pasang surut. Tanaman ubi kayu dapat tumbuh dengan cukup baik di lahan gambut, sementara tanaman lainnya belum bisa tumbuh baik tanpa adanya pemberian bahan amelioran. Tanaman ubi kayu bisa mempercepat pematatan dan pematangan gambut. Adapun tanaman ubi jalar cukup adaptif di tanah sulfat masam tanpa pengapuran. Khusus ubi kayu, oleh karena umurnya yang relatif lama (7–12 bulan), umumnya hanya ditanam di lahan tegalan atau galangan surjan sehingga tidak ada risiko tergenang pada waktu musim hujan. Khusus ubi jalar yang ditanam di lahan tegalan, perlu dibuat galangan untuk setiap barisan tanaman karena tanaman ini peka terhadap genangan air dengan ketinggian galangan antara 25–30 cm.

Selain bertujuan agar tanah menjadi gembur sehingga aerasinya menjadi lebih baik, pengolahan tanah juga dimaksudkan untuk membersihkan lahan dari rumput-rumput, kayu, dan tunggul. Pengolahan tanah juga dimaksudkan untuk mencampur kapur agar rata di seluruh lapisan olah. Oleh karena itu, penebaran kapur dilakukan sebelum pengolahan tanah dimulai. Tanah gambut diolah dalam kondisi lembap/berair dengan mencacahnya menggunakan cangkul sedalam kurang lebih 10 cm tanpa pembalikan tanah. Jika gambutnya belum matang, setelah diolah, gambut perlu dipadatkan dengan alat pematat gambut. Jika tanahnya masih gembur, belum ditumbuhi gulma, dan

tidak dilakukan pengapuran dengan cara tebar, palawija bisa juga langsung ditanam pada lahan bekas tanaman padi. Dengan kata lain, pertanaman palawija tanpa olah tanah.

#### 4. Penanaman

Penanaman padi varietas lokal dilakukan pada bulan Maret/April, yaitu saat permukaan air telah surut dan cocok untuk ditanami bibit dari lacakan. Jarak tanam yang digunakan beragam, tetapi biasanya 5 rumpun tanaman untuk setiap depa (1 depa = 1,70 m) atau kira-kira  $42,5 \times 42,5$  cm. Jumlah bibit per rumpun 2–3 bibit, di mana bibit yang ditanam ini telah besar dan kuat. Penanaman di bulan Maret/April ini secara tidak langsung lebih menguntungkan tanaman, mengingat pada saat itu, periode kelarutan Fe mengalami penurunan sehingga bibit yang ditanam dapat terhindar dari cekaman keracunan  $Fe^{2+}$ . Meskipun demikian, jarak tanam yang tidak teratur cukup merugikan apabila dilihat dari sisi penyerapan sinar matahari (Khairullah, 2007). Untuk padi varietas unggul, penanaman dapat dilakukan dengan sistem *jajar legowo* 2:1 atau sistem tegel 20–25×20–25 cm.

Pada dasarnya, palawija bisa ditanam kapan saja asal sudah diperkirakan tidak akan mengalami banjir atau kekeringan. Banyaknya bertanam dalam setahun tergantung dari ketersediaan air. Khusus kedelai, sebaiknya tidak ditanam secara besar-besaran menjelang musim hujan jika tidak ada fasilitas pengering buatan. Hal ini karena biasanya akan mengalami kesulitan dalam pengeringan sehingga hasilnya akan membusuk.

Pola tanam tanaman pangan di lahan gambut dapat dilakukan dengan sistem tumpang gilir dan/atau tumpang sari serta sistem lorong. Penanaman sistem tumpang gilir adalah penanaman dua jenis tanaman atau lebih dalam satu hamparan lahan dengan waktu tanam yang berbeda (bergilir). Sebagai contoh, kedelai atau kacang tanah ditanam pada pertanaman jagung yang sudah berumur 70 hari sehingga pada saat panen jagung (umur 90–100 hari), kedelai atau kacang tanah sudah berumur 20–30 hari. Penanaman sistem tumpang sari adalah penanaman dua jenis tanaman atau lebih dalam

waktu yang bersamaan. Komoditas tersebut dapat terdiri atas tanaman palawija saja atau antara palawija dan padi gogo. Tanaman jenis C-4 (jenis tanaman yang memerlukan penyinaran matahari penuh), seperti jagung dan ubi kayu, dapat ditumpang-sarikan dengan tanaman C-3 (kedelai, kacang tanah, dan jenis kacang lainnya). Adapun pertanaman sistem lorong adalah penanaman tanaman semusim (termasuk palawija) di antara tanaman tahunan. Sebagai contoh, penanaman nanas di antara barisan tanaman karet dan penanaman jagung di antara barisan tanaman jeruk.

Keuntungan menggunakan sistem tumpang sari, tumpang gilir, dan sistem lorong adalah mengurangi risiko kegagalan panen, jenis komoditas yang dipasarkan lebih beragam, sebaran penggunaan tenaga kerja lebih merata, dan pendapatan petani meningkat. Jadwal sistem tanam monokultur, tumpang sari, dan tumpang gilir pada lahan gambut tidak berbeda dengan lahan pasang surut. Ini dapat dilihat pada Tabel 7.3.

Pada lahan yang memiliki galangan, palawija dapat ditanam sepanjang tahun. Pada lahan tegalan yang sepanjang tahun tidak terluapi air, palawija ditanam pada awal musim hujan atau pada akhir musim hujan setelah panen padi gogo. Oleh karena postur tanamannya yang tinggi, jagung dan ubi kayu bisa ditanam secara monokultur atau tumpang sari dengan padi gogo, kacang tanah, atau kedelai. Waktu tanam tumpang sari dapat dilakukan dalam waktu yang sama, tetapi waktu panennya biasanya berbeda tergantung dari umur tanaman. Jagung juga bisa ditanam dengan sistem tumpang gilir dengan tanaman lainnya. Biasanya, ini dilakukan untuk menghemat waktu dan memanfaatkan ketersediaan air. Misalnya, jagung ditanam terlebih dahulu. Satu bulan menjelang panen jagung, kacang tanah atau kedelai dapat ditanam di antara barisan tanaman jagung.

Penanaman kacang tanah, kedelai, dan jagung dilakukan secara langsung dengan menggunakan tugal atau alat tanam mekanis. Jarak tanam dan jumlah benih yang ditanam bisa dilihat pada Tabel 7.4. Jarak tanam kedelai 20×20 cm atau 15×40 cm dengan jumlah tanaman yang dibiarkan tumbuh 2 tanaman/lubang. Jarak tanam kacang tanah

15×30 cm atau 20×20 cm dengan 2 tanaman/lubang. Adapun jarak tanam jagung diatur berdasarkan umur panennya. Jagung berumur panjang (>100 hari) menggunakan jarak tanam 40×100 cm dengan 2 tanaman/lubang, jagung berumur sedang (80–100 hari) menggunakan jarak tanam 25×75 cm dengan jumlah 1 tanaman/lubang, dan jagung berumur pendek (<80 hari) menggunakan jarak tanam 20×50 cm dengan 1 tanaman/lubang.

Biasanya, benih dicampur terlebih dahulu dengan fungisida, seperti Ridomil, untuk mencegah serangan penyakit yang dibawa oleh benih. Di lokasi yang belum pernah ditanami kedelai atau kacang tanah, penanaman tanaman ini harus menggunakan *Rhizobium* sebanyak 15 g/ha dengan cara benih dibasahi terlebih dahulu, lalu dicampur dengan bahan tersebut, kemudian ditanam.

Jagung yang ditumpangsarikan dengan padi gogo, kacang tanah, atau kedelai menggunakan jarak antarbarisan 5–6 kali jarak barisan tanaman tumpang sari. Jarak dalam barisan dan jumlah benih per lubangnya sama dengan aturan yang sudah disebutkan. Ini berarti bahwa setiap kelipatan 5–6 barisan tanaman padi gogo/kacang tanah/kedelai, akan terdapat satu barisan tanaman jagung.

Ubi kayu dan ubi jalar ditanam dengan cara setek batang. Setek ubi kayu harus segera ditanam setelah dipotong-potong sepanjang 25–30 cm. Penanaman dilakukan dengan cara menancapkan setek sedalam 10 cm secara tegak lurus pada lahan yang telah dipersiapkan sebelumnya. Jarak tanam bervariasi antara 100×100 cm. Adapun setek ubi jalar sepanjang 30–35 cm ditanam mendatar sedalam 7–10 cm dengan bagian pucuk menyembul (keluar) ke permukaan tanah. Bagian yang tertanam 1/2–2/3 bagian setek dengan jarak tanam bervariasi antara 25×100 cm. Secara detail, dapat dilihat pada Tabel 7.4.

## 5. Ameliorasi

### a. Aplikasi Kapur dan Bahan Organik

Amelioran atau “pembenah tanah” yang umum digunakan pada lahan gambut berupa limbah tanaman (kompos), ternak (pupuk kandang), kapur (dolomit, kalsit, dan gipsum), abu vulkanis, lumpur, biochar,

dan sebagainya. Selain itu, beberapa bahan alami yang mengandung kation polivalen (Fe, Al, Cu, dan Zn) seperti terak baja dan tanah mineral laterit sangat efektif sebagai amelioran dalam mengurangi pengaruh asam fenolat (Salampak, 1999; Sabiham et al., 1997). Penambahan kation polivalen, seperti Fe dan Al, akan menciptakan tapak jerapan bagi ion fosfat sehingga bisa mengurangi kehilangan hara P melalui pencucian (Rachim, 1995). Pemberian tanah mineral berkadar  $Fe^{2+}$  tinggi dapat meningkatkan pertumbuhan dan produksi tanaman padi (Salampak, 1999). Pugam (nama jenis formula amelioran dan pupuk yang dikembangkan Balai Penelitian Tanah, Bogor) juga dapat meningkatkan produktivitas lahan. Pugam mengandung kation polivalen dengan konsentrasi tinggi sehingga takaran amelioran yang diperlukan tidak terlalu besar, yaitu cukup 750 kg/ha (Subiksa et al., 2009).

Pemberian kapur dimaksudkan untuk memperbaiki kesuburan lahan gambut. Kapur yang diberikan ke dalam tanah gambut akan memperbaiki kondisi tanah gambut dengan cara (1) menaikkan pH tanah, (2) mengusir senyawa-senyawa organik beracun, (3) meningkatkan kejenuhan basa, (4) menambah unsur Ca dan Mg, (5) menambah ketersediaan hara, serta (6) memperbaiki kehidupan mikroorganisme tanah, termasuk yang berada dalam bintil-bintil akar (Hardjowigeno, 1996). Menurut Suryanto (1994), pemberian kapur di lahan gambut dapat meningkatkan penyimpanan P dalam bahan gambut hingga 55%. Takaran kapur untuk lahan gambut berkisar antara 1–2 t/ha (Agus & Subiksa, 2008). Adapun untuk gambut yang telah terdegradasi, takaran kapur berkisar antara 2–5 t/ha (Maftu'ah, 2012). Pemberian kapur yang berlebihan dan terus-menerus dapat mempercepat dekomposisi gambut karena meningkatnya pH tanah dapat meningkatkan aktivitas mikroorganisme dekomposer.

Apabila pemberian bahan amelioran ditekankan pada peningkatan pH tanah gambut, bahan kapurlah yang secara teknis paling baik dibandingkan jenis amelioran lainnya. Menurut Widjaja-Adhi (1976), pemberian kapur merupakan syarat pertama dalam memperbaiki kesuburan tanah gambut.

Saat ini, perkiraan jumlah kebutuhan kapur hanya bisa dilakukan melalui metode inkubasi di laboratorium sehingga diperoleh dosis yang tepat untuk menaikkan pH gambut optimum, yaitu 5 (Widjaja-Adhi, 1995). Tingkat pH ideal bagi ketersediaan unsur hara di lahan gambut adalah 5,5 (Lucas & Davis dalam Setiadi, 1995). Namun, untuk mencapai pH 5,5, dibutuhkan dosis kapur yang cukup banyak karena setelah pH 4,8–5 dicapai, kurva peningkatan pH oleh penambahan kapur cenderung mendatar. Ini berarti penambahan kapur setelah pH 5 tidak ekonomis.

Di dalam tanah, unsur Ca dan Mg yang terkandung dalam kapur akan menggantikan posisi  $H^+$  dan asam-asam organik sehingga ketersediaan P dan unsur hara lainnya dalam tanah akan meningkat dan mudah diambil oleh akar tanaman. Unsur Ca dan Mg juga akan membantu dalam meningkatkan KB. Kapur yang diperdagangkan di Indonesia bisa dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu kapur giling atau kalsit, dolomit, dan kapur tohor. Kapur giling mengandung unsur utama  $CaCO_3$ , dolomit mengandung unsur utama  $CaCO_3$  dan  $MgCO_3$ , dan kapur tohor mengandung unsur utama CaO dan kadang-kadang juga mengandung MgO.

Hingga saat ini, belum ada rumus praktis yang bisa digunakan untuk memperkirakan jumlah kebutuhan kapur yang paling tepat di lahan gambut. Rumus yang ada hanya bisa digunakan untuk tanah mineral karena didasarkan atas perkiraan kadar unsur Al yang dapat dipertukarkan. Sedangkan di lahan gambut, kandungan Al sangat rendah sehingga peningkatan pH tidak ditujukan bagi penekanan keracunan Al.

Kelemahan kapur sebagai bahan amelioran ialah karena kandungan unsur haranya tidak lengkap sehingga pemberian kapur juga harus diikuti dengan pemupukan unsur lainnya, seperti N, P, K, dan terutama unsur-unsur mikro, seperti Cu dan Zn. Kelemahan lainnya, kapur tidak memiliki atau sedikit mengandung koloid sehingga cenderung tidak membentuk kompleks jerapan, mudah tererosi, dan kurang memperbaiki tekstur tanah gambut secara langsung. Kapur cenderung menggumpal jika diberikan ke tanah gambut. Selain itu,

kapur tidak dapat berfungsi baik pada tanah gambut yang kelembapannya kurang, bahkan dalam beberapa kasus, kapur malah dapat mempercepat proses kondisi kering tak balik. Dengan kelemahan tersebut, penggunaan kapur perlu diimbangi dengan pemakaian amelioran lain, terutama yang banyak mengandung koloid, seperti pupuk kandang, lumpur, dan tanah liat.

Pada lahan gambut dengan ketebalan lebih dari 1 m, selain kapur juga digunakan bahan amelioran lain, seperti tanah mineral, abu, dan/atau pupuk kandang. Tanah mineral umumnya digunakan dengan cara ditebar dengan dosis cukup tinggi, yaitu 50–100 m<sup>3</sup>/ha. Jika ini dinilai mahal dan sulit, amelioran yang digunakan cukup abu dapur, pupuk kandang, dan kompos. Pemberian amelioran dapat dilakukan dengan ditebar pada lubang yang dibuat pada larikan tanaman pada waktu tanam, bersamaan dengan pemberian kapur dan pupuk dasar.

Biochar juga dapat dijadikan salah satu alternatif bahan amelioran di lahan gambut. Biochar merupakan arang dari bahan organik yang diperoleh dari proses pembakaran tidak sempurna (pyrolysis). Pengaruh biochar terhadap tanah gambut tergantung pada kualitasnya. Kualitas biochar antara lain ditentukan oleh kadar air, luas permukaan, ukuran pori, dan kandungan hara (Lehmann & Joseph, 2009). Komposisi hara biochar berbeda-beda, tergantung pada bahan baku yang digunakan. Pencampuran biochar dan pupuk kandang memberikan komposisi kimia yang berbeda, dibanding dengan sifat biochar. Peran biochar, antara lain memberikan tempat (habitat) bagi mikroorganisme tanah dan dapat menyimpan hara dan air serta menjadikannya lebih tersedia bagi tanaman (Lehman & Rondon, 2006; Rondon et al., 2007).

## **b. Pemupukan Anorganik**

Pemupukan merupakan salah satu aspek yang berperan penting dalam meningkatkan produktivitas lahan gambut. Pertanaman padi di lahan gambut memerlukan pupuk anorganik, seperti Urea, SP-36, dan KCl dengan takaran 90–60–60 kg/ha, serta pupuk mikro (5,0 Cu kg/ha dan 5 kg Zn/ha). Pupuk Urea dan KCl diberikan dua kali,

yaitu  $\frac{1}{2}$  bagian pada saat tanam dan sisanya pada umur 3–4 minggu atau bersamaan dengan penyiangan. Adapun pupuk SP-36 diberikan sekaligus pada saat tanam. Pemberian Cu langsung ke tanah akan diserap kuat oleh gambut sehingga lebih efektif diberikan melalui daun. Pemberian Biotara (nama pupuk organik yang dikembangkan Balittra) mampu meningkatkan efisiensi pemupukan anorganik sampai 30% pada pertanaman padi dan meningkatkan hasil sampai 20%. Adapun Pugam mampu meningkatkan produktivitas lahan gambut dan menekan emisi CO<sub>2</sub> (Balittanah, 2012).

Pemupukan pada tanaman palawija, untuk tanaman jagung diberikan 200–250 kg/ha Urea, 125–150 kg/ha SP-36, dan 100–125 kg/ha KCl. Adapun untuk kacang tanah, diberikan takaran 75 kg/ha Urea, 100–125 kg/ha SP-36, dan 100–125 KCl kg/ha. Pada lahan gambut sedang (tebal >1 m), perlu ditambahkan pupuk mikro berupa Cu dan Zn masing-masing antara 2,5–10 kg/ha. Pada lahan yang belum pernah ditanami kedelai, benih kedelai ditanam setelah dicampur dengan rhizobium (legin) sebanyak 10–15 g/kg benih (Lestari, Noor, & Berlian, 2011).

Pada lahan gambut dengan ketebalan lebih dari 1 meter, pemberian pupuk mikro saat tanam sangat dianjurkan. Pupuk mikro yang sering digunakan, antara lain CuSO<sub>4</sub> (terusi) dan ZnSO<sub>4</sub> sebanyak masing-masing 2,5–7,5 kg/ha yang diberikan bersamaan dengan pemberian pupuk dasar. Makin kurang subur gambut (biasanya karena makin mentah dan tebal), kebutuhan pupuk mikro makin banyak. Tanaman ubi kayu dan ubi jalar biasanya tidak dipupuk oleh petani. Padahal, kedua jenis tanaman ini termasuk rakus unsur hara. Untuk memperoleh produksi yang baik dari kedua jenis tanaman ini dan mempertahankan kesuburan tanah, pemupukan perlu dilakukan (Tabel 8.2).

**Tabel 8.2** Dosis Pupuk Urea, KCl, dan SP-36 pada Tanaman Palawija di Lahan Gambut

Komoditas	Urea (kg/ha)	KCl (kg/ha)	SP-36 (kg/ha)	Waktu Pemberian
Kedelai	90	100	100	Seluruh SP-36 + ½ bagian Urea dan KCl diberikan pada saat tanam
Kacang tanah	75	100	100	½ bagian Urea dan KCl diberikan pada saat umur 1 bulan
Kacang hijau	80	100	100	Seluruh SP-36 + 1/3 bagian Urea dan KCl diberikan pada saat tanam
Jagung	150	100	100	1/3 bagian Urea dan KCl diberikan pada saat umur 1 bulan; 1/3 bagian Urea dan KCl diberikan pada saat umur 45 hari
Ubi kayu	100	100	100	Seluruh SP-36 + ½ bagian Urea dan KCl diberikan pada saat tanam; ½ bagian Urea dan KCl diberikan pada saat umur 2–3 bulan
Ubi jalar	100	100	100	Seluruh SP-36 + ½ bagian Urea dan KCl diberikan pada saat tanam; ½ bagian Urea dan KCl diberikan pada saat umur 6–9 minggu.

## 6. Pengendalian Organisme Pengganggu Tanaman

Organisme pengganggu tanaman pangan di lahan gambut adalah gulma, hama, dan penyakit. Hama utama padi di lahan gambut, antara lain orong-orong, tikus, kepinding tanah, walang sangit, wereng coklat, dan hama putih, sedangkan penyakit utamanya adalah blas dan bakanaai.

### a. Pengendalian Gulma

Gulma dapat menurunkan hasil padi hingga 50% karena persaingan terhadap penyerapan hara, air, serta sinar matahari. Batas kritis penutupan gulma adalah 25%–30%. Apabila penutupan tersebut di atas

batas kritis, diperlukan pengendalian (Simatupang, 2007). Pengendalian dapat menggunakan herbisida kontak dan/atau sistemik yang efektivitasnya tergantung pada jenis gulma sasaran, dosis herbisida, serta cara dan waktu aplikasi.

## **b. Pengendalian Hama dan Penyakit Tanaman**

Pengendalian hama dan penyakit perlu dilakukan secara terpadu melalui cara sebagai berikut.

- 1) Menanam varietas yang toleran atau tahan terhadap serangan hama/penyakit.
- 2) Mengendalikan gulma yang menjadi inang hama dan penyakit.
- 3) Melakukan pergiliran tanaman untuk memutus siklus hama.
- 4) Melakukan tanam serentak.
- 5) Memperbaiki drainase.
- 6) Mempertahankan musuh alami.
- 7) Menjaga sanitasi lingkungan.
- 8) Menggunakan pestisida dalam batas ambang ekonomi sebagai alternatif terakhir.

Pemeliharaan tanaman yang penting lainnya adalah pemberantasan hama dan penyakit. Hama yang sering menyerang adalah tikus, babi, orong-orong, lembing batu, wereng, lundi, dan walang sangit. Adapun penyakit penting yang sering menyerang adalah bercak coklat, blast, dan hawar pelepah daun. Pengendalian hama dan penyakit dilakukan secara terpadu dengan cara sebagai berikut.

- 1) Menanam varietas yang toleran atau tahan terhadap serangan hama/penyakit.
- 2) Mengadakan pergiliran tanaman untuk memutus siklus hama.
- 3) Melakukan cara tanam serentak.
- 4) Memberantas gulma yang menjadi inang hama dan penyakit.
- 5) Memperbaiki drainase.
- 6) Menjaga keberadaan musuh alami, seperti predator (kepip *coccinellidae* yang memangsa kutu dan aphid) dan parasit serangga *aphenteles ruficrus* untuk mengendalikan hama agrotis.

Penanganan serangan hama dalam jumlah sedikit dapat dilakukan secara mekanis, yaitu dengan memungut dan mematikan. Jika serangan berlanjut, perlu digunakan pestisida yang sesuai dengan peruntukannya. Penggunaan pestisida nabati, seperti akar tuba, sangat dianjurkan. Pestisida non-nabati harus digunakan sesuai dosis anjuran yang tercantum pada kemasan. Berikut adalah pengendalian hama secara khusus.

- 1) Teknik pengendalian untuk memberantas hama tikus adalah berupa pembersihan sarang atau tempat tinggal hama, *gropyokan*, umpan racun (seperti Klerat), dan pengemposan/pengasapan liang menggunakan belerang.
- 2) Orong-orong dan lundi dikendalikan dengan penggenangan lahan yang teratur dan penggunaan insektisida, terutama pada saat tanam.
- 3) Wereng dan serangga lainnya dikendalikan dengan insektisida, seperti dharmabas dan bassa 500 EC.

Penyakit hawar daun yang disebabkan oleh bakteri *xanthomonas* menyerang padi pada semua tingkat pertumbuhan. Gejalanya, mula-mula timbul bercak pada tepi daun, berkembang meluas berwarna hijau keabu-abuan, keriput, dan akhirnya daun layu terkulai seperti terkena air panas. Penyakit ini dikendalikan dengan cara menggunakan varietas yang tahan. Bila ada serangan, segera disemprot dengan pestisida.

Penyakit blast disebabkan oleh jamur *Pyricularia oryzae* (Amukelar & Kardim, 1991) dengan tanda-tanda timbulnya bercak pada daun, ruas batang, leher malai, cabang malai, dan kulit gabah. Bercak berwarna coklat pada bagian pinggir dan putih keabu-abuan. Serangan pada ruas batang menyebabkan tanaman patah. Serangan pada leher malai menyebabkan kehampaan. Penyakit ini dapat dikendalikan dengan cara menggunakan varietas yang tahan jamur serta penyemprotan fungisida.

## 7. Panen dan Pascapanen

Secara prinsip dan teknis, panen tanaman di lahan gambut tidak berbeda dengan di lahan sulfat masam. Sedikit perbedaannya hanya pada penggunaan alat mesin panen, seperti *combine harvester*. Alat panen seperti *combine harvester* kemungkinan besar tidak dapat digunakan pada lahan gambut karena daya dukung tanah yang rendah.

## C. Budi Daya Tanaman Hortikultura

Lahan gambut yang relatif dekat dengan perkotaan atau yang aksesnya baik banyak dikelola petani untuk budi daya sayuran dan buah semusim. Produk hortikultura ini memiliki nilai ekonomi yang cukup baik, tetapi sifatnya yang mudah rusak dan tidak tahan simpan menuntut pemasaran yang cepat. Oleh sebab itu, hanya lokasi yang aksesnya baik yang sesuai untuk budi daya sayuran dan buah semusim dalam jumlah banyak.

### 1. Pemilihan Komoditas dan Varietas

Hampir semua hortikultura semusim dataran rendah dapat dibudidayakan di lahan gambut. Sayuran yang banyak diusahakan petani, antara lain kacang panjang, cabe, mentimun, pare, labu, tomat, bawang daun, bawang merah, petersai, caisim, semangka, nanas, dan melon. Tomat biasanya lebih sesuai untuk dataran tinggi, tetapi dengan penggunaan varietas yang tepat, bisa berproduksi baik di dataran rendah. Varietas sayuran yang diproduksi khusus untuk lahan rawa memang belum tersedia, tetapi dapat dipilih varietas yang sesuai untuk dataran rendah atau varietas lokal. Tabel 8.3 menyajikan beberapa varietas sayuran dan buah semusim yang sesuai untuk dataran rendah.

**Tabel 8.3** Jenis dan Varietas Tanaman Sayuran di Lahan Gambut

No.	Jenis Tanaman	Jenis/Varietas
<b>Sayuran</b>		
1.	Bawang daun	Bawang Prei, Kucai, Bawang semprong
2.	Bawang putih	Lumbu putih, Jati barang, Bogor, Sanur

No.	Jenis Tanaman	Jenis/Varietas
3.	Bayam	Amaranthus tricolor, A.dubius, A.cruentus, Giti hijau, Giti merah.
4.	Cabe	Cabe merah lokal (Barito, Cipanas), Tanjung, Cabe keriting, Hot beauty, Tit super
5.	Sawi	Sawi hijau, Sawi putih
6.	Kacang panjang	KP-1, KP-2
7.	Kangkung	Air (lokal), Darat (sutra, bangkok)
8.	Kemangi	Lokal
9.	Kecipir	Lokal
10.	Mentimun	LV 1043, LV 308, LV 1723
11.	Labu	Labu siam, Waluh, Labu air
12.	Pare	Taiwan, Gajih, Ayam
13.	Selada daun	New York, Imperial, Great Lakes, Penlake
14.	Terung	Kopek, Craigi, Bogor, Gelatik, Medan
15.	Tomat	Mutiara, Ratna, Intan, Berlian
<b>Buah Semusim</b>		
1.	Semangka	Semindo 1 hingga 7 (berbiji), Stabindo 1 hingga 3 (tak berbiji), Monalisa F1
2.	Melon	Sky Rocket, Melindo 1,2,3,4
3.	Nanas	Palembang, Tangkit, Wajo

Sumber: Direktorat Jenderal Bina (2001)

Sayuran biasanya tidak diusahakan dalam lahan yang luas, tetapi dibudidayakan secara intensif dengan mengatur luas dan pergiliran tanaman sesuai dengan permintaan pasar. Dengan demikian, tidak ada patokan waktu dan pola tanam untuk tanaman sayuran. Setiap petani biasanya mengusahakan lebih dari satu jenis sayuran, seperti petsai, caisim, bawang daun, kangkung, dan selada dalam waktu yang

bersamaan. Akan tetapi, ada pula petani yang hanya tertarik untuk mengusahakan satu jenis tanaman sayuran. Sayuran yang dipelihara dengan cara seperti ini biasanya cabe, tomat, labu, dan terung.

Tanaman sayuran adalah tanaman yang produksinya biasa dikonsumsi manusia sebagai sayur. Sebagian besar tanaman sayuran tergolong semusim. Sebagian sayuran juga diproduksi oleh tanaman tahunan, di antaranya adalah keluih dan petai. Bagian yang digunakan untuk sayuran berupa batang, daun, atau buah. Tanaman sayuran yang dapat dibudidayakan di lahan gambut, seperti bawang merah, bawang daun, bawang kucai, bayam, cabai merah, cabai rawit, kacang panjang, katuk, kemangi, kenikir, kubis, labu, seledri, selada, dan tomat.

Tanaman buah-buahan adalah tanaman yang menghasilkan buah untuk dikonsumsi manusia dalam keadaan segar atau diolah terlebih dahulu, sebagai sumber vitamin dan serat. Dalam kelompok ini, terdapat tanaman buah sebanyak 22 jenis. Sebagian besar tanaman tersebut merupakan tanaman tahunan. Hanya ada tiga jenis yang merupakan tanaman semusim, yaitu nanas, melon, dan semangka.

## 2. Penyiapan Lahan

Sayuran ditanam pada lahan yang tidak tegenang air, yaitu pada lahan yang ditata dengan sistem tegalan atau pada galangan. Sayuran biasanya ditanam pada lahan yang dekat dengan jalan darat atau air untuk memudahkan pengangkutan hasil. Tanaman dari famili *solanaceae*, seperti tomat, cabe, dan terung sebaiknya tidak ditanam di lahan yang baru saja ditanami tanaman dari famili *solanaceae* karena tanaman ini sangat peka terhadap serangan penyakit layu bakteri. Lebih lanjut, tanaman tersebut juga jangan ditanam pada lahan yang drainasenya kurang baik karena penyakit layu bakteri mudah berkembang pada lahan yang tergenang. Persiapan yang perlu dilakukan adalah pengecekan kondisi saluran tersier, termasuk pintu-pintunya, serta saluran kuarter. Jika ada kerusakan, saluran harus segera diperbaiki.

Sistem penyiapan lahan dan pengolahan tanah untuk pengembangan tanaman hortikultura perlu memperhatikan sifat-sifat tanah

gambut, seperti ketebalan gambut, kematangan, dan lingkungan sekitarnya. Pengolahan tanah pada lahan gambut tidak perlu intensif seperti pada umumnya tanah mineral. Namun, penggunaan traktor lebih efisien dibandingkan sistem tajak, cangkul, atau sistem bajak dengan sapi, baik dari segi biaya, waktu, maupun tenaga.

Awalnya, petani menggunakan cangkul dalam mengolah tanahnya. Sistem cangkul merupakan cara penyiapan lahan sekaligus pengolahan tanah. Sistem atau cara ini umum dilakukan petani transmigrasi yang berasal dari Pulau Jawa dan Nusa Tenggara sebagai petani lahan kering. Kini, sistem cangkul sudah mulai ditinggalkan petani, berganti dengan sistem bajak dan rotari dengan mesin traktor.

Sistem bajak rotari merupakan cara pengolahan tanah menggunakan bajak dan rotari dengan dibantu tenaga sapi untuk menariknya. Sistem ini banyak dikembangkan pada awal-awal pembukaan lahan rawa pada sekitar tahun 1970 sampai 1980-an sebelum masuknya traktor.

Sistem pengolahan tanah dengan menggunakan traktor yang dilengkapi dengan bajak, singkal, dan rotari sudah banyak diterapkan di lahan rawa, termasuk tanah gambut. Selain menghemat tenaga, pengolahan tanah menggunakan traktor dapat lebih cepat dengan hasil lebih baik. Pengolahan tanah dengan traktor lebih hemat biaya dan waktu dibandingkan cangkul atau bajak dengan sapi. Sistem cangkul mempunyai kapasitas kerja 22,2 jam/ha dan efisiensi 37,5, sedangkan sistem bajak/luku dengan sapi mempunyai kapasitas kerja 66,7 jam dan efisiensi 50%. Adapun rotari dengan traktor mempunyai kapasitas kerja hanya 8,7 jam/ha dengan efisiensi 76,7% (Umar & Noor, 1994). Diperkirakan 1 traktor dapat melakukan pengolahan tanah seluas 30–35 hektare. Meskipun demikian, penggunaan alsintan, termasuk traktor di tanah gambut perlu memperhatikan daya dukung. Tekanan berat traktor ke tanah (*ground pressure* [GP]) harus lebih kecil dari kapasitas sangga tanah (*bearing capacity*). Pada tanah-tanah gambut, dapat digunakan traktor roda 2 dengan berat total 100–200 kg. Adapun tanah-tanah gambut yang berpeluang rendah dapat menggunakan traktor dengan berat total <100 kg (Umar & Alihamsyah, 2014).

Dalam era perkembangan teknologi, sejak tahun 2000, penyiapan lahan dan pengolahan tanah sebagian besar dilakukan secara mekanisasi karena adanya ketersediaan traktor roda 2 dan roda 4 yang diperbantukan oleh pemerintah. Beberapa desa dan/atau kelompok tani telah membentuk Usaha Pelayanan Jasa Alsintan (UPJA), meskipun ada juga yang menyediakan penyewaan alsintan dengan sistem bayar panen atau tunai (kontan). Namun, secara umum, keperluan alsintan masih dibutuhkan. Pada tahun 2011, penggunaan traktor, khususnya traktor roda 2, sudah menyebar hampir ke seluruh daerah rawa kabupaten/kota di Kalimantan Selatan (Umar & Alihamsyah, 2014). Traktor yang digunakan di lahan rawa berupa traktor tangan (*hand tractor*) dengan roda 2 dan *mini tractor* dengan roda 4.

### 3. Penanaman

Penanaman komoditas hortikultura di lahan gambut tidak berbeda dengan penanaman di tanah mineral. Sebelum ditanam, bibit tanaman harus disemai dahulu di dalam *polybag* atau tempat lainnya, kemudian ditanam pada saat tanaman telah berukuran cukup tinggi. Meskipun demikian, perlu juga memperhatikan penyiraman yang intensif pada musim kemarau dan perlunya pemberian bahan organik, seperti pupuk kandang, dalam jumlah yang cukup banyak.

### 4. Ameliorasi

Dalam budi daya hortikultura, khususnya sayur-sayuran, pemberian amelioran kapur (dolomit), pupuk kandang, dan pupuk buatan (N, P, K, Cu, dan Zn) menunjukkan respons pertumbuhan dan hasil yang nyata (Noor et al., 2005; Lestari et al., 2007; 2008). Hal ini menunjukkan bahwa suplai hara dari tanah masih belum mencukupi untuk memenuhi kebutuhan tanaman.

#### a. Aplikasi Kapur dan Bahan Organik

Kapur dan bahan organik dapat diberikan satu atau dua minggu sebelum tanam. Pupuk kandang (bersama-sama dengan abu) sudah lama digunakan oleh petani sebagai amelioran di lahan gambut, terutama untuk bertanam sayur-sayuran. Pupuk kandang memiliki efek

kesuburan tanah gambut yang cukup baik karena mengandung unsur hara yang lengkap (makro dan mikro). Selain itu, mikroorganisme yang ada di dalamnya mampu menguraikan gambut menjadi lebih matang sehingga beberapa unsur hara dalam gambut, seperti P, mudah tersedia bagi tanaman. Dengan demikian, pupuk kandang akan memperbaiki kondisi fisik dan kesuburan gambut. Kelemahan pupuk kandang sebagai bahan amelioran adalah kemampuannya dalam menaikkan pH dan kandungan KB-nya terbatas sehingga memerlukan dosis yang cukup banyak, berkisar antara 2,5–30 t/ha (Prastowo et al., 1993).

Pemberian pupuk kandang masing-masing 10,5 dan 21 t/ha meningkatkan bobot segar petsai (*Brassica chinensis* L.) jenis *white phak coy* dari 82,50 g/pot (tanpa pupuk kandang) menjadi 168,33 g/pot dan 293 g/pot. Pemberian lumpur laut yang dijemur dan dikeringkan dengan angin menghasilkan bobot basah petsai sebesar 311,67 g/pot dan 236,67 g/pot. Bobot segar petsai paling tinggi diperoleh pada pemberian lumpur laut yang dijemur dan pupuk kandang 157,50 g/pot (21 t/ha), yaitu 425 g/pot (Suryantini, 2005).

Kompos atau bokasi merupakan hasil peruraian bahan organik yang disengaja dalam waktu yang singkat. Perbedaan antara kompos dan bokasi hanya terletak pada jenis sumber bahan organik yang akan diproses. Kompos diproses dari bahan organik yang masih segar, seperti dedaunan, serasah sisa hasil tanaman (seperti jerami), dan pangkasan gulma. Adapun bokasi menggunakan dedaunan kering, serasah kering, sekam, dan pangkasan gulma yang sudah dikeringkan.

Kelebihan kompos dan bokasi sebagai bahan amelioran adalah dapat dibuat dari bahan-bahan yang ada di sekitar lahan; mampu memperbaiki tekstur dan struktur tanah; mengandung mikroorganisme (jasad-jasad renik) yang menguntungkan, terutama karena dapat mempercepat proses pematangan gambut; mengandung unsur hara yang lengkap, termasuk unsur hara mikro; mampu meningkatkan pH; dan tidak merusak lingkungan. Kekurangannya, kompos dan bokasi memiliki kemampuan yang terbatas dalam menaikkan pH dan kandungan unsur haranya sedikit sehingga membutuhkan tambahan

pupuk. Tambahkan pupuk ini dapat dilakukan selama proses pembuatan kompos/bokasi. Kompos dan bokasi yang digunakan sebaiknya yang sudah betul-betul matang/jadi dengan tanda-tanda: tidak panas dan tidak berbau, gembur, dan berwarna coklat kehitaman, serta volume menyusut menjadi sepertiga bagian dari volume awal.

Lumpur merupakan material yang diendapkan oleh air (sungai dan laut) berupa campuran tanah aluvial dan bahan organik. Lumpur laut biasanya banyak mengandung kation-kation basa, terutama Na, sehingga cukup baik untuk meningkatkan pH tanah gambut. Tabel 8.4 menyajikan hasil analisis tanah lumpur dari Kalimantan Barat.

**Tabel 8.4** Hasil Analisis Tanah Lumpur di Pantai Kijing, Kalimantan Barat

Jenis Analisis Tanah	Hasil
pH (H <sub>2</sub> O)	8,2
pH (KCl)	7,9
P Bray-1	5,6 ppm
N-total	0,2 %
K	5,4 me/100g
Na	45,9 me/100 g
Ca	62,0 me/100 g
Mg	12,4 me/100 g
Aluminium	Td
H	0,4 me/100 g
KTK	175

Keterangan: Td = tidak terdeteksi

Sumber: Anshari (2003)

Beberapa penelitian mengenai pemberian lumpur laut di lahan gambut masih terus dilakukan, di antaranya yang dilakukan oleh Anshari (2003) di Kalimantan Barat. Dalam penelitian tersebut, di-

ketahui penggunaan lumpur sebanyak 15–20 t/ha dapat memperbaiki status kesuburan tanah, terutama sifat fisika dan kimianya. Namun, yang perlu diperhatikan dalam penggunaan lumpur laut adalah kandungan logam-logam berat, seperti timbal (Pb), merkuri (Hg), dan lain-lain. Logam-logam memang tidak membahayakan tanaman secara langsung, tetapi hasil produksi tanaman apabila dikonsumsi dikhawatirkan akan berpengaruh terhadap kesehatan manusia.

Tanah mineral dapat digunakan sebagai amelioran karena mengandung unsur perekat (liat) dan memiliki unsur-unsur hara yang lebih lengkap, seperti Al, Fe, dan Silikat ( $\text{SiO}_2$ ). Penambahan bahan mineral ke dalam tanah gambut akan memperbaiki sifat kimia dan fisik tanah gambut, terutama teksturnya. Gambut yang biasanya terlalu remah akan meningkat daya kohesinya, menurun daya ikatnya terhadap air, dan meningkat daya dukungnya.

Tanah mineral yang pernah diteliti dan dapat digunakan sebagai amelioran pada tanah gambut, di antaranya adalah tanah lateritik atau oxisol (Sabiham et al., 1995; Subiksa et al., 2000) yang banyak mengandung unsur  $\text{SiO}_2$ . Meskipun Si sebagai unsur hara esensial masih diragukan, tetapi dilaporkan bahwa penambahan unsur ini dapat menambah jumlah anakan, berat basah, dan berat kering tanaman padi (Buckman & Brady, 1982), serta menambah ketahanan padi terhadap serangan penyakit blast. Kelemahan amelioran dari tanah mineral, antara lain karena kemampuannya menaikkan pH sangat rendah sehingga untuk mencapai pH optimum diperlukan tanah mineral yang sangat banyak. Selain itu, kualitas tanah mineral bervariasi dan sulit dibakukan sehingga perkiraan kebutuhan optimumnya sulit untuk dihitung. Menurut beberapa hasil penelitian, kondisi/persyaratan tanah mineral yang baik sebagai amelioran di lahan gambut adalah mempunyai pH yang tinggi dan mengandung banyak kation basa sehingga mampu meningkatkan KB dan melepas senyawa-senyawa organik. Contoh tanah mineral, antara lain lumpur laut/payau, lumpur sungai, tanah berkapur, dan tanah yang memiliki tekstur klei.

Abu merupakan sisa hasil pembakaran bahan organik, seperti kayu, sampah, gulma, dan sisa hasil pertanian, seperti sekam dan serasah. Kelebihan abu, antara lain mengandung hampir semua unsur hara secara lengkap, baik mikro maupun makro (kecuali N karena pembakaran yang sempurna menghilangkan unsur N), memiliki pH tinggi (8,5–10), tidak mudah tercuci, dan mengandung kation basa, seperti K, Ca, Mg, dan Na, yang relatif tinggi. Meskipun demikian, dibanding dengan kapur, kemampuan abu menaikkan pH relatif rendah. Abu banyak mengandung silikat dalam bentuk tersedia sehingga berpengaruh positif terhadap produktivitas tanaman di lahan gambut (Buckman & Brady, 1982).

Secara tradisional, abu bersama-sama dengan amelioran lain, seperti pupuk kandang, sudah lama digunakan oleh petani di lahan gambut Kalimantan Barat, Kalimantan Selatan, dan Kalimantan Tengah, terutama untuk komoditas sayur-sayuran. Dosis campuran abu dan pupuk kandang yang sering digunakan pada tahap pertama berkisar antara 20–25 karung/ha. Setiap kali tanam, petani hanya menambahkan sedikit campuran ke lahan. Petani di Kalamangan, Kalimantan Tengah menggunakan abu bakar sekitar 20 kg untuk keperluan penanaman seluas 2500 m<sup>2</sup> dan pupuk kandang sekitar 5 kg atau 100 kg campuran keduanya untuk lahan seluas 1 ha (Dohong, 2003). Dosis tersebut sangat rendah dibandingkan dosis kompos yang umum diberikan pada luasan yang sama karena pemberian abu bakar tersebut hanya disebar pada larikan tanaman di permukaan tanah.

Abu dapat diperoleh dari sisa hasil bakaran di dapur, pembakaran sisa hasil pertanian (serasah, sekam, dan gulma), sampah rumah tangga, dan limbah gergajian kayu. Abu bakaran gambut (diperoleh dengan membakar lapisan gambut) dapat memberikan pengaruh baik bagi tanaman dalam jangka pendek. Walaupun demikian, hal itu sangat tidak dianjurkan karena jika dilakukan terus-menerus, gambut akan menipis sehingga lahan mudah mengalami banjir dan menyebabkan polusi udara. Selain itu, jika pada lapisan di bawah gambut terdapat pirit atau pasir, lahan akan rusak (kemasaman tanah meningkat akibat pirit yang teroksidasi) dan sulit dipulihkan.

Proses pembakaran bahan-bahan untuk memperoleh abu harus dilakukan dengan hati-hati agar tidak membakar gambut secara luas. Caranya, pembakaran dilakukan di tempat khusus yang dikelilingi oleh parit berair dan dibakar di atas lapisan seng atau potongan drum. Selama proses, pembakaran harus selalu dijaga jangan sampai api menjalar atau melompat ke luar dan membakar lahan.

Abu vulkanis merupakan partikel-partikel halus dari gunung berapi yang terembus pada waktu erupsi. Penggunaan abu vulkanis sebagai amelioran pada lahan gambut sangat potensial (Setiadi, 1999) karena ditinjau dari deposit (cadangan) dan kandungan hara yang dikandungnya, antara lain Fe, Al, Ca, Mg, Mn, S, P, K, Na, Cu, Zn, Ti, dan Si. Akan tetapi, penggunaan abu vulkanis memerlukan biaya transportasi yang besar, khususnya untuk daerah yang tidak memiliki gunung berapi karena sumber utamanya terdapat di Pulau Jawa. Menurut Setiadi (1999), dosis abu vulkanis sebagai amelioran di lahan gambut sekitar 7–10 t/ha.

Hasil penelitian terhadap lahan gambut dangkal di Desa Kanamit, Kabupaten Pulang Pisau, Kalimantan Tengah menunjukkan bahwa pemberian dolomit 2 t/ha menghasilkan buah tomat segar paling tinggi, yaitu 5,56 t/ha dibandingkan fosfat alam 2 t/ha (3,64 t/ha), dolomit 1 t/ha + fosfat alam 1 t/ha (3,95 t/ha), dan abu gergaji 0,2 t/ha (4 t/ha) (Lestari, Noor, & Berlian, 2011). Adapun hasil penelitian terhadap lahan gambut dangkal di Desa Purwodadi, Kabupaten Pulang Pisau, Kalimantan Tengah menunjukkan bahwa pemberian input berupa dolomit sebanyak 2 t/ha, pupuk kandang 5 t/ha, pupuk urea, SP-36, dan KCl masing-masing 150, 300, dan 200 kg/ha dapat meningkatkan hasil tomat sebanyak 9,84–25,22 t/ha.

Hasil penelitian di lahan gambut Desa Kanamit juga menunjukkan bahwa hasil cabai merah besar meningkat sebanyak 2,63–4,22 t/ha akibat pemberian input berupa kapur dolomit 2 t/ha, pupuk kandang sapi 5 t/ha, urea, SP-36, dan KCl masing-masing 150, 187, dan 125 (Lestari, Noor, & Simatupang, 2011). Hasil penelitian Lestari et al. (2008) terhadap lahan gambut dangkal di Desa Wono Agung, Kabupaten Pulang Pisau, Kalimantan Tengah menunjukkan bahwa

pemberian pupuk mikro berupa 5 kg/ha  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  dan 5 kg/ha  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  menghasilkan hasil panen cabai merah varietas Hot Chilli lebih tinggi dibandingkan tanpa pupuk mikro. Pemberian Paket I (2 t/ha dolomit, 5 t/ha kompos, dan pupuk NPK: 250 kg/ha urea, 250 kg/ha SP-36, 300 kg/ha KCl) dan pupuk mikro (5 kg/ha  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  dan 5 kg/ha  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) serta Paket II (2 t/ha dolomit, 5 t/ha pupuk kandang, dan pupuk NPK: 250 kg/ha urea, 250 kg/ha SP-36, 300 kg/ha KCl) dan pupuk mikro (5 kg/ha  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  dan 5 kg/ha  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) memberikan hasil rata-rata cabai merah besar yang lebih tinggi dibandingkan Paket Petani (3,85 t/ha dolomit, 16,6 t/ha pupuk kandang, 664 kg/ha urea, 448 kg/ha SP-36, dan 664 kg/ha KCl). Hasil panen cabai merah varietas Hot Chilli rata-rata pada Paket I, Paket II, dan Paket Petani masing-masing 8,47 t/ha; 11,97 t/ha, dan 10,89 t/ha. Selain itu, Paket II juga memberikan hasil lebih tinggi dari Paket I. Hasil penelitian Alwi et al. (2004) menunjukkan bahwa penambahan 1/8 volume lapisan olah lumpur dan 2,5 t/ha kompos purun tikus dapat meningkatkan hasil cabai varietas Hot Chilli sebesar 13,43% dan tomat varietas Permata sebesar 18,14% dibandingkan tanpa lumpur dan kompos purun tikus.

Hal tersebut menunjukkan bahwa pemberian pupuk kandang sapi (Paket II) berpengaruh lebih baik terhadap hasil dibandingkan pemberian kompos purun tikus (Paket I). Hal ini karena pupuk kandang mengandung unsur hara, seperti N, K, Ca, Mg, Fe, Cu, dan Zn yang lebih tinggi. Hasil penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa tomat varietas Berlian dan cabai merah besar varietas Prabu memiliki daya toleransi yang cukup tinggi sehingga dapat dikembangkan pada lahan gambut. Meskipun demikian, varietas-varietas lain, seperti tomat varietas Ratna dan Permata atau cabai merah varietas Hot Chilli juga bisa dikembangkan di lahan gambut apabila menggunakan input, seperti dolomit, pupuk kandang, urea, SP-36, dan KCl.

Menurut Subiksa (2000), kation Fe merupakan kation hara yang mampu membentuk ikatan koordinasi dengan ligan organik. Adanya kompleks tersebut menyebabkan asam organik monomer yang beracun akan terpolimerisasi sehingga menjadi tidak beracun. Menurut

Subroto dan Yusrani (2005), pemberian kapur dapat meningkatkan pH tanah dan meningkatkan efektivitas penyerapan pupuk N, P, dan K.

## **b. Pemupukan Anorganik**

Hasil penelitian Noor et al. (2005) pada lahan gambut Kanamit, Pulang Pisau, Kalimantan Tengah menunjukkan bahwa pemberian pupuk NPK (200 kg/ha urea, 250 kg/ha SP-36, 120 kg/ha KCl) yang dikombinasikan dengan 2 t/ha dolomit serta 5 kg/ha  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  dan 5 kg/ha  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  dapat menghasilkan berat basah sawi lebih tinggi (35,64 g/tanaman) dibandingkan pemberian NPK saja (11,20 g/tanaman). Pemberian dolomit sebesar 2 t/ha meningkatkan pH tanah, Ca-dd, Mg-dd, dan Fe paling tinggi, sedangkan P-tersedia paling tinggi akibat pemberian fosfat alam 2 t/ha. Pemberian abu gulma 0,2 t/ha dan fosfat alam 1 t/ha dapat meningkatkan residu K-dd. Produktivitas lobak jenis Radish Long White Cicle pada pemberian kompos sebanyak 5 t/ha (25,17 t/ha) lebih tinggi secara nyata dibandingkan tanpa pemberian kompos (17,50 t/ha) dan pemberian kompos 2,50 t/ha (18,89 t/ha). Kompos purun tikus dan pakis-pakisan mengandung Fe yang cukup tinggi, yaitu masing-masing sebesar 142,20 ppm dan 56,25 ppm (Lestari et al., 2007).

## **5. Pengendalian Organisme Pengganggu Tanaman**

Jenis gulma yang menghambat pertumbuhan tanaman sayuran adalah jejagoan (*Echinochloa colona*), tabi (*Cyperus rotundus*), dan bebadotan (*Ageratum conyzoides*). Adapun organisme penggangguanya, antara lain kutu aphid (*Aphis gossypii* Glover), ulat grayak (*Spodoptera litura*), ulat plutela (*Plutela xylostella*), lalat buah (*Dacus cucurbitae*), ulat buah (*Diaphania indica*), kumbang daun (*Aulocophora similes*), ulat grayak (*Spodoptera* sp), ulat jengkal (*Chrysodeixis chalcites*), dan thrips (*Thrips parvispinus* Karny). Penyakit utama di lahan gambut adalah layu bakteri dan penyakit busuk pangkal batang. Hama dan penyakit tersebut apabila tidak dikendalikan dengan benar akan menurunkan kualitas dan kuantitas hasil tanaman.

Pengendalian hama dan penyakit perlu dilakukan secara terpadu melalui cara sebagai berikut.

- 1) Menanam varietas yang toleran atau tahan terhadap serangan hama/penyakit.
- 2) Mengendalikan gulma yang menjadi inang hama dan penyakit.
- 3) Melakukan pergiliran tanaman untuk memutus siklus hama.
- 4) Melakukan tanam serentak.
- 5) Memperbaiki drainase.
- 6) Mempertahankan musuh alami.
- 7) Menjaga sanitasi lingkungan.
- 8) Menggunakan pestisida dalam batas ambang ekonomi sebagai alternatif terakhir.

## D. Budi Daya Tanaman Perkebunan

### 1. Pemilihan Komoditas

Tanaman perkebunan adalah tanaman yang umumnya diusahakan oleh perusahaan perkebunan dalam skala luas. Pada kenyataannya, tanaman perkebunan juga banyak diusahakan oleh rakyat, tetapi produksinya dipasarkan ke perusahaan untuk diproses lebih lanjut. Tanaman perkebunan yang banyak diusahakan di lahan gambut, antara lain kelapa sawit, karet, dan kelapa. Hal yang perlu diperhatikan dalam penanaman tanaman tersebut di lahan gambut adalah kemungkinan tanaman mudah tumbang setelah mencapai ketinggian tertentu, terutama pada lahan gambut tebal. Hal ini terjadi karena daya dukung lahan yang rendah dan penurunan permukaan gambut (*subsidence*) sesudah direklamasi.

Pengembangan tanaman perkebunan di lahan gambut berkembang pesat, khususnya karet dan kelapa sawit. Produktivitas tanaman kelapa sawit di lahan gambut tidak kalah baiknya dengan yang di tanah mineral. Produksi kelapa sawit pada lahan gambut dengan kerapatan populasi 185 pokok/ha pada tahun kedelapan panen adalah 24–26 t/ha/th TBS. Namun, akhir-akhir ini disinyalir perkebunan kelapa sawit yang dikembangkan di lahan gambut memicu terjadinya emisi gas

rumah kaca (CO<sub>2</sub>) sehingga menimbulkan polemik dan perdebatan. Terlepas dari pro dan kontra tentang perkebunan di lahan gambut, luas lahan gambut yang dimanfaatkan untuk perkebunan sekarang mencapai 20% (sekitar 2–2,5 juta ha) yang memerlukan pengelolaan yang baik dan ramah lingkungan (Noor, 2010).

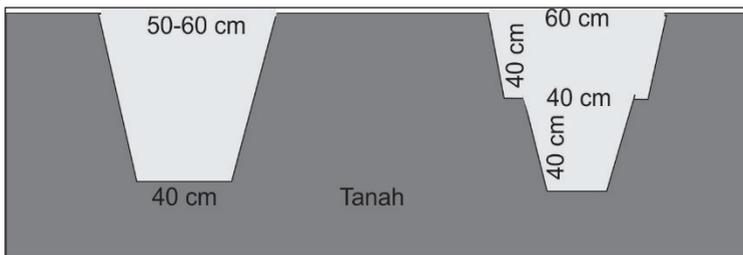
## 2. Penyiapan Lahan

Sejak tahun 1995, pembukaan lahan dengan sistem tebas dan bakar (*slash and burn*) telah dilarang (SK Ditjenbun No. 38 Tahun 1995) dan sebagai alternatif dikenalkan sistem PLTB. Sistem PLTB bertujuan agar kerusakan kesuburan tanah, struktur tanah, dan unsur hara, serta erosi permukaan tanah dapat dihindarkan. Sistem PLTB ini dibedakan menjadi mekanis dan semi mekanis. PLTB mekanis adalah proses penyiapan lahan tanpa membakar, yaitu melalui penumbangan pohon, *perencekan*, dan *perumpukan* yang dilakukan menggunakan bulldoser. Adapun PLTB semi mekanis merupakan gabungan penggunaan tenaga manusia dengan alat ringan, seperti *chainsaw*, parang, dan kapak, kecuali saat *perumpukan* dapat tetap menggunakan bulldoser.

Sistem PLTB terdiri atas kegiatan pertama berupa pemotongan pohon berdiameter <10 cm dan penebasan semak dengan kapak/parang. Kegiatan kedua, yaitu penebangan pohon kayu berdiameter >10 cm dengan *chainsaw*. Kemudian, penumbangan pohon dilakukan secara sejajar agar kayu tidak saling tumpang tindih. Batang pohon yang disisakan berkisar antara 50–75 cm, tergantung dari besarnya pohon. Makin besar, biasanya tunggul yang tersisa makin tinggi, tetapi tidak melebihi 75 cm. Cabang dan ranting dipangkas dari batang utama, kemudian dipotong-potong sepanjang ±6 m dan dikumpulkan di jalur penimbunan yang telah ditentukan. Pengumpulan pada areal yang luas dapat menggunakan bulldoser, tetapi pada beberapa kasus terutama saat musim hujan, proses ini akan mengalami kendala karena daya dukung gambut tidak mampu menahan beban yang berat. Dengan demikian, saat itu terjadi, proses pengumpulan menggunakan tenaga manusia. Kayu, ranting-ranting kecil, dan dedaunan yang dikumpulkan ditumpuk di tempat tertentu (disebut *perumpukan*) dan biasanya digunakan sebagai jalur jalan.

Sebelum tanam, perlu dilakukan penyiapan lubang dan tata letak tegakan tanaman perkebunan perlu diatur sehingga rapi dan tidak menyulitkan operasional, terutama dalam pembersihan, pemupukan, penyemprotan, dan pengamatan. Pemancangan titik tanam digunakan sebagai petunjuk jarak tanam yang akan digunakan. Jarak tanam untuk tanaman perkebunan, seperti kelapa sawit, dapat dilakukan dengan pola segitiga sama sisi atau sering disebut dengan istilah “mata lima” pada arah utara-selatan dengan jarak 9 m × 9 m sehingga jumlah populasi tanaman mencapai sekitar 143 pohon/ha.

Sebelum tanam, dianjurkan untuk melakukan pemadatan tanah agar tanaman dapat menjangkar kuat di dalam tanah sehingga mengurangi kecenderungan pohon tumbuh miring atau rebah (Radjagukguk, 2004). Selain untuk meningkatkan volume tanah sehingga akar lebih kuat mencengkram dan tanaman tidak mudah roboh, tujuan pemadatan tanah juga untuk meningkatkan hasil karena makin banyak hara yang dapat diserap tanaman akibat makin padat tanah, makin banyak bidang tanah yang berinteraksi dengan akar tanaman. Pemadatan dapat dilakukan secara mekanis pada jalur tanam menggunakan alat berat. Penurunan permukaan tanah gambut akibat pemadatan jalur tanaman ini berkisar 10–15 cm. Lubang tanam dibuat pada titik tanam dengan ukuran 50×40×40 cm atau 60×60×60 cm sebulan sebelum tanam (*one hole system*). Pada lahan gambut, lubang tanam dapat dibuat ganda atau lubang dalam lubang (*hole in hole*). Lubang pertama dibuat lebih besar (100×100×40 cm) dan lubang kedua berada dalam lubang pertama dengan ukuran 40×40×40 cm. (Gambar 8.1).



**Gambar 8.1** Model Lubang Tunggal dan Lubang Ganda

### 3. Penyiapan Benih dan Bibit

Pembibitan merupakan awal dari kegiatan teknis produksi pada tanaman perkebunan. Kegiatan pembibitan tanaman akan memberikan pengaruh besar terhadap proses pertumbuhan dan perkembangan tanaman yang akan datang. Kegiatan pembibitan diperlukan untuk menghasilkan bibit bermutu, baik mutu genetis, fisiologis, maupun fisik. Untuk membangun kebun pembibitan yang baik, diperlukan beberapa tahap pekerjaan, yaitu (1) penyiapan lokasi pembibitan, (2) penyiapan sarana dan prasarana, (3) pelaksanaan pembibitan, dan (4) pemeliharaan bibit. Jika kita melakukan kegiatan pembibitan pada lokasi yang tidak sesuai persyaratan, bibit yang dihasilkan tidak bermutu. Bila bibit yang diperoleh tidak bermutu, setelah bibit ditanam di lapangan, akan diperoleh hasil yang tidak bermutu pula. Pada akhirnya, ini dapat berakibat buruk bagi pengusaha. Penyiapan lokasi pembibitan harus sesuai dengan persyaratan/kriteria yang telah ditetapkan sehingga akan diperoleh bibit bermutu tinggi. Berikut adalah contoh perhitungan kebutuhan areal pembibitan tanaman kelapa sawit dengan sistem dua tahap. Misalnya, tersedia lahan seluas 5.000 ha yang akan ditanami bibit kelapa sawit dengan kerapatan 136 pohon/ha. Usaha agribisnis kelapa sawit secara bertahap akan melakukan penanaman pada tahun pertama seluas 1.000 ha, dan 2.000 ha untuk penanaman setiap dua tahun sekali pada periode berikutnya. Perhitungan secara perinci adalah sebagai berikut.

- 1) Kebutuhan bibit untuk penanaman seluas 5.000 ha adalah  $5.000 \times 136 = 680.000$  bibit.
- 2) Kebutuhan bibit cadangan 5% =  $5/100 \times 680.000 = 34.000$  bibit.
- 3) Bibit afkir 15% =  $15/100 \times 680.000 = 102.000$  bibit.
- 4) Jadi, total kebutuhan bibit untuk areal penanaman seluas 5.000 ha =  $680.000 + 34.000 + 102.000 = 816.000$  bibit.

Oleh karena itu, harus disediakan bibit dengan tahapan sebagai berikut.

- 1) Kebutuhan bibit pada tahun pertama untuk ditanam seluas 1.000 ha, yaitu  $816.000 : 5 = 163.000$  bibit, ini menjadi kebutuhan areal pembibitan pada tahun pertama.

- 2) Areal pembibitan (utama) dengan jarak tanam bibit  $90 \times 90$  cm/ha = 14.260 bibit.
- 3) Jadi, untuk kebutuhan penanaman seluas 1.000 ha diperlukan luas pembibitan 163.000 bibit : 14.260 bibit/ha = 11,4 ha.
- 4) Tambahan areal untuk pembibitan awal, jalan, naungan, dan lain-lain sekitar 1,9 ha. (Direktorat Pembinaan SMK, 2008).

#### 4. Penanaman

Bahan tanam untuk kelapa sawit dapat berupa bagian vegetatif atau generatif. Bagian vegetatif dapat berupa setek batang atau setek daun. Adapun bagian generatif dapat berupa biji/kecambah. Penanaman kecambah pertama dilakukan pada *polybag*  $15 \times 23$  cm. Kemudian, *polybag* disusun berjejer dan berdekatan pada bedeng awal (*pre nursery*) selama 10–14 minggu. Setelah berumur 10–14 minggu, bibit dipindahkan ke bedeng pembibitan besar atau utama (*main nursery*). Bibit tersebut dipelihara hingga berumur 10–12 bulan.

Untuk tanaman karet, kecambah ditanam dengan jarak tanam  $50 \times 50$  cm atau  $40 \times 40 \times 60$  cm jika bibit kelak akan diokulasi dengan cara coklat (*brown budding*), sedangkan jarak tanam  $20 \times 20 \times 60$  cm digunakan jika bibit akan diokulasi dengan cara hijau (*green budding*). Setelah beberapa bulan, bibit tumbuh dan berkembang sebagai batang bawah dan siap untuk diokulasi. Ada dua cara okulasi, yaitu okulasi coklat dan okulasi hijau. Okulasi secara coklat dilakukan jika bibit batang bawah telah berumur 9–18 bulan (kulit batangnya telah berwarna coklat). Okulasi secara hijau dilakukan jika bibit batang bawah telah berumur sekitar 3–8 bulan. Pada usia ini, biasanya ukuran batang sebesar penal dan berwarna hijau. *Entres* yang digunakan juga masih muda dan berwarna hijau. Keuntungan dari okulasi ini adalah tanaman karet dapat disadap 8 bulan lebih cepat. Setelah memiliki batang bawah, maka diperlukan *entres*. Kebun *entres* disediakan secara khusus dari klon terpilih yang sesuai untuk okulasi batang coklat atau hijau. Untuk okulasi batang coklat, diperlukan *entres* batang coklat yang ditanam dengan jarak  $100 \times 100$  cm. Adapun untuk okulasi hijau, *entres* yang ditanam diberi jarak  $100 \times 50$  cm (Direktorat Pembinaan SMK, 2008).

## 5. Ameliorasi

### a. Aplikasi Kapur dan Bahan Organik

Beberapa bahan amelioran yang sering digunakan untuk pertanaman perkebunan di lahan gambut, antara lain kapur (dolomit, batu fosfat, dan kaptan), tanah mineral, lumpur, pupuk kompos/bokasi, pupuk kandang (kotoran ayam, sapi, dan kerbau), serta abu. Menurut Widjaja-Adhi (1976), pemberian kapur merupakan syarat pertama dalam memperbaiki kesuburan tanah gambut. Lumpur merupakan material yang diendapkan oleh air (sungai dan laut) berupa campuran tanah aluvial dan bahan organik, biasanya banyak mengandung kation-kation basa, terutama Na, sehingga cukup baik untuk meningkatkan pH tanah gambut. Dosis penggunaan lumpur sebanyak 15–20 t/ha dapat memperbaiki status kesuburan tanah, terutama sifat fisika dan kimianya (Noor, 2010). Penambahan bahan mineral ke tanah gambut akan memperbaiki sifat kimia dan fisik tanah gambut, terutama struktur tanahnya. Dengan demikian, gambut yang biasanya terlalu remah akan meningkat daya kohesinya, menurun daya ikatnya terhadap air, dan meningkat daya dukungnya. Tanah mineral yang pernah diteliti sebagai bahan amelioran pada tanah gambut, antara lain tanah lateritik atau oxisol yang banyak mengandung unsur  $\text{SiO}_2$  (Sabiham et al., 1995; Subiksa, 2000).

### b. Pemupukan Anorganik

Pemupukan susulan dilakukan dua kali setahun dengan cara dibenamkan dalam piringan selebar tajuk tanaman atau dalam parit kecil mengelilingi piringan tanaman. Setelah pupuk dimasukkan, parit/piringan ditutup tanah dan dipadatkan. Dosis pemupukan bervariasi, tergantung jenis tanaman, umur, dan status hara (Tabel 8.5). Di lahan gambut, tanaman sering menunjukkan gejala kekurangan unsur mikro Cu, Bo, dan Zn.

**Tabel 8.5** Dosis Pupuk untuk Beberapa Jenis Tanaman Perkebunan

Umur Tanaman (Tahun)	Pupuk	Dosis Pupuk Sesuai Jenis-Jenis Tanaman (g/Pohon)			
		Kelapa Sawit *)	Karet	Kelapa	Kopi
1	Urea/ZA	200	75	50	50
	SP-36	300	100	25	40
	KCl	75	50	25	40
	Dolomit	100	50	50	50
	Campuran amelioran	-	-	200	200
2	Urea/ZA	350	150	100	100
	SP-36	500	150	50	80
	KCl	350	60	50	80
	Dolomit	150	100	100	100
	Campuran amelioran	-	-	500	500
3	Urea/ZA	380	230	200	150
	SP-36	500	250	100	120
	KCl	1000	100	100	120
	Dolomit	500	200	150	100
	Campuran amelioran	-	-	1000	1000
4	Urea/ZA	750	400	300	200
	SP-36	1.000	450	200	160
	KCl	2.000	150	200	160
	Dolomit	1.000	250	200	200
	Campuran amelioran	-	-	1500	1500
5	Urea/ZA	750	500	300	300
	SP-36	1000	600	250	240
	KCl	2000	200	300	240
	Dolomit	1000	200	200	200
	Campuran amelioran	-	-	2000	2000

Keterangan : Campuran amelioran adalah campuran antara pupuk kandang, kompos, bokasi, abu, lumpur, dan lain-lain. (sesuai dengan ketersediaan bahan).

\*) Ditambah pupuk Bo 25–50 g/pohon/tahun sejak umur 3 tahun

Sumber: Departemen Pertanian (1998)

## 6. Pengendalian Organisme Pengganggu Tanaman

Untuk memperoleh produksi yang baik, tanaman perkebunan memerlukan pengendalian organisme pengganggu yang intensif, di antaranya gulma, hama, dan penyakit. Langkah-langkah yang perlu dilakukan adalah sebagai berikut.

- 1) Menjaga kebersihan lingkungan. Penyiangan bertujuan untuk menghilangkan gulma agar tanaman mendapatkan cukup cahaya matahari dan berkurangnya kompetisi penyerapan hara oleh gulma. Kegiatan ini dilakukan dua atau tiga kali dalam satu tahun. Penyiangan dilakukan dengan cara menebas gulma atau semak lainnya. Buah-buah yang rontok karena serangan hama dan penyakit juga harus segera dibersihkan dan dibakar.
- 2) Menggunakan varietas yang tahan atau toleran terhadap serangan hama dan penyakit penting. Gunakan jenis tanaman dan varietas yang telah teruji dan dapat beradaptasi dengan lingkungan sekitar.
- 3) Menyegerakan pemberian pupuk apabila tampak gejala kekurangan unsur hara.
- 4) Pemangkasan tanaman (khususnya pada tanaman kopi) secara teratur sehingga udara di pertanaman tidak terlalu lembap pada musim hujan.
- 5) Pencabutan segera terhadap tanaman yang sudah terserang penyakit menular yang sulit dikendalikan dengan dibongkar dan dibakar hingga ke akar-akarnya. Pencegahan penularan penyakit terhadap tanaman lain yang masih sehat dapat dilakukan dengan segera menyemprotkan fungisida. Contoh penyakit seperti ini, antara lain penyakit akar hitam dan akar cokelat pada tanaman kopi, penyakit busuk pangkal batang dan penyakit busuk kering pangkal batang pada kelapa sawit, serta penyakit akar putih dan penyakit akar merah pada karet.
- 6) Penyemprotan segera pada bagian tanaman yang terserang penyakit tidak berbahaya dengan fungisida.

- 7) Pemungutan/pencabutan bila memungkinkan pada hama yang menyerang dalam jumlah sedikit. Bila serangannya banyak dan merugikan, baru disemprot dengan insektisida.
- 8) Penggunaan musuh alami, seperti kumbang *Curinus coeruleus* dan *Ollaabdominalis* untuk mengendalikan kutu loncat pada kopi serta penggunaan pestisida alami, seperti akar tuba, sangat dianjurkan sebelum menggunakan pestisida kimia.
- 9) Penggunaan pestisida harus dihentikan minimal 1 minggu sebelum panen bagi komoditas yang dikonsumsi manusia atau hewan.

## 7. Panen dan Pascapanen

Kegiatan panen merupakan pekerjaan akhir dari budi daya tanaman (bercocok tanam), tetapi merupakan awal dari pekerjaan pascapanen, yaitu melakukan persiapan untuk penyimpanan dan pemasaran. Komoditas yang dipanen tersebut selanjutnya akan melalui jalur-jalur tata niaga, sampai berada di tangan konsumen. Panjang-pendeknya jalur tata niaga tersebut menentukan tindakan panen dan pascapanen yang sebaiknya dilakukan.

Pada dasarnya, perlakuan panen adalah mengumpulkan komoditas dari lahan penanaman pada taraf kematangan yang tepat, dengan kerusakan yang minimal, dilakukan secepat mungkin, dan dengan biaya yang “rendah”. Untuk mendapatkan hasil yang baik, ada dua hal utama yang perlu diperhatikan saat panen.

- 1) Menentukan waktu panen yang tepat, yaitu menentukan “kematangan” yang tepat dan saat panen yang sesuai. Ini dapat dilakukan dengan berbagai cara, antara lain:
  - a) cara visual/penampakan, misalnya dengan melihat warna kulit, bentuk buah, ukuran, dan perubahan bagian tanaman, seperti daun yang mengering, dan lain-lain;
  - b) cara fisik, misalnya dengan perabaan untuk merasakan kelunakan buah, kekerasan umbi, kemudahan buah untuk dipetik, dan lain-lain;
  - c) cara komputasi, yaitu menghitung umur tanaman sejak tanam atau umur buah dari mulai bunga mekar;

- d) cara kimia, yaitu dengan melakukan pengukuran/analisis kandungan zat atau senyawa yang ada dalam komoditas, seperti kadar gula, kadar tepung, kadar asam, aroma, dan lain-lain.
- 2) Melakukan penanganan panen yang baik, yaitu menekan kerusakan yang dapat terjadi. Dalam suatu usaha/bisnis pertanian, cara-cara panen yang dipilih perlu diperhitungkan dan disesuaikan dengan kecepatan atau waktu yang diperlukan (sesingkat mungkin) dan dengan biaya yang rendah. Untuk menentukan waktu panen atau kombinasi cara mana yang sesuai untuk menentukan kematangan suatu komoditas, kita harus mengetahui proses pertumbuhan dan kematangan dari bagian tanaman yang akan dipanen. Beberapa hal yang perlu diperhatikan pada penanganan panen adalah sebagai berikut.
- a) Lakukan persiapan panen dengan baik. Siapkan alat-alat yang dibutuhkan, tempat penampungan hasil dan wadah-wadah panen, serta pemanen yang terampil dan tidak ceroboh.
  - b) Pada saat panen, hindari kerusakan mekanis dengan melakukan panen secara hati-hati. Panen sebaiknya dilakukan dengan tangan atau menggunakan alat bantu yang sesuai. Misalnya, tomat dan cabai dipetik dengan tangan, bawang merah dicabut, dan untuk kentang, tanah di sekitar tanaman dibongkar dengan menggunakan cangkul atau kored dan umbi dikeluarkan dari dalam tanah. Sebaiknya hindari kerusakan/luka pada umbi saat pembongkaran tanah.
  - c) Memperhatikan bagian tanaman yang dipanen.
  - d) Gunakan tempat/wadah panen yang sesuai dan bersih, tidak meletakkan hasil panen di atas tanah atau di lantai, dan usahakan tidak menumpuk hasil panen terlalu tinggi.
  - e) Hindari tindakan kasar pada wadah dan usahakan tidak terlalu banyak melakukan pemindahan wadah.

Penanganan pascapanen yang baik akan menekan kehilangan (*losses*), baik dalam kualitas maupun kuantitas, yaitu mulai dari penurunan kualitas sampai komoditas tersebut tidak layak pasar (*not marketable*) atau tidak layak dikonsumsi. Untuk menekan kehilangan tersebut, hal yang perlu diketahui adalah sebagai berikut.

- 1) Sifat biologi hasil tanaman yang ditangani, yaitu struktur dan komposisi hasil tanaman.
- 2) Dasar-dasar fisiologi pascapanen, yaitu respirasi, transpirasi, dan produksi etilen.
- 3) Teknologi penanganan pascapanen yang sesuai.

Dibanding dengan melakukan usaha peningkatan produksi, melakukan penanganan pascapanen yang baik mempunyai beberapa keuntungan, yaitu sebagai berikut.

- 1) Jumlah pangan yang dapat dikonsumsi lebih banyak.
- 2) Lebih murah melakukan penanganan pascapanen (misalnya, dengan penanganan yang hati-hati dan pengemasan) dibandingkan peningkatan produksi yang membutuhkan input tambahan (misalnya, pestisida, pupuk, dan lain-lain).
- 3) Risiko kegagalan lebih kecil. Input yang diberikan pada peningkatan produksi, apabila gagal, bisa berarti gagal panen. Pada penanganan pascapanen, apabila gagal, umumnya tidak menambah “kehilangan”.
- 4) Menghemat energi. Energi yang digunakan untuk memproduksi hasil yang kemudian “hilang” dapat dihemat.
- 5) Waktu yang diperlukan lebih singkat (pengaruh perlakuan untuk peningkatan produksi baru terlihat 1–3 bulan kemudian, yaitu saat panen; pengaruh penanganan pascapanen dapat terlihat 1–7 hari setelah perlakuan).
- 6) Meningkatkan nutrisi. Melakukan penanganan pascapanen yang baik dapat mencegah kehilangan nutrisi, berarti perbaikan nutrisi bagi masyarakat.
- 7) Mengurangi sampah, terutama di kota-kota dan ikut mengatasi masalah pencemaran lingkungan.

Kegiatan penanganan pascapanen tanaman perkebunan didefinisikan sebagai suatu kegiatan penanganan produk hasil perkebunan, sejak panen hingga siap menjadi bahan baku atau produk akhir siap dikonsumsi, di mana di dalamnya juga termasuk distribusi dan pemasarannya. Cakupan teknologi pascapanen dibedakan menjadi dua kelompok kegiatan besar, yaitu (1) penanganan primer, yang meliputi penanganan komoditas hingga menjadi produk setengah jadi atau produk siap olah, di mana perubahan/transformasi produk hanya terjadi secara fisik, sedangkan perubahan kimiawi biasanya tidak terjadi pada tahap ini, dan (2) penanganan sekunder, yakni kegiatan lanjutan dari penanganan primer, di mana terjadi perubahan bentuk fisik maupun komposisi kimiawi dari produk akhir melalui suatu proses pengolahan. Contoh penanganan primer tanaman perkebunan, misalnya pada kakao atau coklat adalah proses pengeringan, di mana tujuan utamanya adalah menguapkan air sehingga diperoleh produk dengan kadar air kakao 6%–7% basis basah. Adapun dari sisi teknologinya, cara pengeringan kakao dapat dilakukan dengan penggabungan penjemuran (*sun drying*) dan pengeringan dengan mesin (*artificial drying*) untuk mendapatkan kadar air yang optimal dengan penampakan yang baik. Hasil akhir penanganan primer kakao adalah kakao kering dengan kadar air optimal dan warna coklat seragam yang mengilat. Penanganan sekunder kakao adalah pengolahan lebih lanjut kakao kering menjadi produk yang lebih hilir. Pada proses ini, biji kakao hasil pengolahan primer digunakan sebagai bahan baku untuk produksi massal kakao yang akhirnya menjadi produk olahan berupa permen coklat, susu coklat, minuman, magnum, coklat isi dengan berbagai varian rasa, coklat pralin, roti coklat, es krim, dan sebagainya (Rahim et al., 2020).



## BAB 9

# Perspektif Pengelolaan Lahan Rawa Masa Depan

Lahan rawa merupakan salah satu bentuk bentang alam di permukaan bumi yang memiliki peran yang sangat penting dalam siklus biogeokimia global. Lahan rawa mempunyai nilai dan fungsi yang sangat vital bagi kelestarian dan keberlanjutan ekosistem global. Berdasarkan luasnya, lahan rawa sangat potensial untuk dimanfaatkan bagi segala kebutuhan atas lahan, tetapi juga bisa menjadi salah satu sumber bencana kerusakan alam jika tidak tepat dalam pengelolaan dan pemanfaatannya.

Lahan rawa dapat diklasifikasikan menjadi dua tipe, yaitu pasang surut dan lebak. Lahan rawa pasang surut memiliki arti sebagai daerah rawa yang mendapatkan pengaruh langsung ataupun tidak langsung dari gerakan/luapan pasang-surutnya air laut/sungai di sekitarnya. Lahan pasang surut dapat dibagi menjadi tipe luapan A, B, C, dan D (Noorsyamsi et al., 1984; Widjaja-Adhi et al., 1992). Lahan lebak diartikan sebagai lahan yang tergenang air selama periode tertentu ( $\geq 1$  bulan) dan rezim airnya dipengaruhi oleh hujan (Widjaja-Adhi et al., 2000). Lahan lebak dapat dibagi menjadi tiga tipe, yaitu lahan

lebak dangkal, tengahan, dan dalam. Kedua jenis lahan tersebut dapat kembali dibagi menurut jenis asal bahan induknya, yaitu gambut dan mineral. Selanjutnya, lahan gambut dapat terbagi menjadi gambut tipis, sedang, tebal, dan sangat tebal, sedangkan lahan yang terbentuk dari bahan induk mineral dapat terbagi menjadi lahan sulfat masam, potensial, serta salin.

Lahan rawa adalah salah satu sumber daya alam yang sangat berharga bagi bangsa Indonesia dan seluruh umat manusia. Luas lahan rawa di Indonesia mencapai 34,12 juta ha. Lahan rawa tersebar dari provinsi paling barat, yaitu Aceh, sampai ujung provinsi paling timur, yaitu Papua. Lahan rawa terdapat pada sekitar 22 provinsi dan hampir 300 kota/kabupaten yang berada di Pulau Kalimantan, Sumatra, Sulawesi, Jawa, dan Papua (BBSDL, 2015). Walaupun demikian, dari luasan lahan rawa yang sudah dibuka, baru sekitar 3,0–3,50 juta ha yang sudah dimanfaatkan, terdiri dari 0,5–1,0 juta ha digunakan untuk sawah atau tanaman pangan dan 2,0–2,5 juta ha dijadikan perkebunan. Adapun sekitar 3,0 juta ha yang dibuka masyarakat secara swadaya digunakan untuk sawah dan sebagian perkebunan rakyat. Dengan demikian, masih cukup luas lahan rawa yang tersedia untuk digunakan dan dikembangkan bagi pertanian ke depan. Dilaporkan bahwa daerah rawa yang berpotensi untuk padi sawah ada sekitar 11,38 juta ha, untuk tanaman hortikultura 1,46 juta ha, dan untuk perkebunan 0,93 juta ha (BBSDL, 2020).

Berdasarkan perspektif di bidang pertanian, tanah sulfat masam memiliki tingkat kemasaman yang sangat tinggi, mengandung logam potensial meracun dalam konsentrasi yang tinggi, dan mengandung kadar hara dalam kelarutan yang rendah. Tanah gambut juga memiliki tingkat kemasaman yang sangat tinggi dan kadar hara yang rendah. Oleh karena itu, pemanfaatan kedua jenis tanah ini harus dengan menerapkan sistem pengelolaan air yang benar karena pengelolaan air merupakan kunci keberhasilan usaha pertanian dan pelestariannya.

Lahan rawa adalah lahan yang marginal sehingga cenderung tidak tersentuh karena sifatnya yang rapuh menyebabkan dibutuhkan tindakan yang tepat dalam pengelolaan, pemanfaatan, serta pelestari-

annya. Kesalahan pengelolaan dan pemanfaatan telah terbukti membawa kerusakan dan malapetaka pada ekosistem atau lingkungan yang dampaknya dapat dirasakan pada skala lokal sampai global. Pengelolaan tanah sulfat masam harus dilakukan dengan sangat hati-hati dan memperhatikan keberadaan lapisan tanah yang mengandung mineral pirit. Penurunan muka air tanah akibat drainase lahan atau kesalahan dalam penerapan sistem pengelolaan air menyebabkan meningkatnya kemasaman tanah sampai pada level sangat masam ( $\text{pH} < 3,5$ ) atau menyebabkan tingginya kelarutan Fe dan Al yang mencemari tanah dan air. Demikian pula pada lahan gambut, terbentuknya gambut yang hidrofobik, terjadinya kebakaran lahan, dan terjadinya emisi GRK dalam jumlah yang sangat besar berawal dari kesalahan dalam pengelolaan dan pemanfaatan gambut. Salah satu bentuk kesalahan dalam pengelolaan lahan gambut adalah dengan pembuatan saluran-saluran drainase yang besar dan dalam, pembukaan lahan dengan cara membakar, serta penebangan pohon yang tidak diikuti dengan upaya penanaman kembali.

Jumlah penduduk Indonesia pada tahun 2018 mencapai 265,2 juta jiwa dan tahun 2021 meningkat menjadi 273,8 juta jiwa dengan laju pertumbuhan sekitar 3 juta jiwa/tahun. Di sisi lain, luas lahan sawah di Indonesia ada sekitar 7,72 juta ha dengan tingkat laju konversi antara 50–100 ribu ha/tahun, sedangkan perluasan atau penambahan areal melalui pencetakan sawah hanya 0,1% (Noor & Maftuah, 2020). Indonesia dalam 10 atau 15 tahun ke depan masih mengandalkan potensi lahan yang tersedia untuk produksi pangannya, termasuk penghasil energi untuk bahan bakar (*biofuel* atau *biodiesel*). Indonesia diprediksi akan mengalami defisit 9 juta ton beras pada dua tahun ke depan apabila tidak memperluas areal dan meningkatkan produktivitas lahan pertaniannya, khususnya persawahan. Kondisi ini mengharuskan kita untuk mencari alternatif lahan yang potensial dikembangkan untuk mendukung program keamanan dan swasembada komoditas pangan dan komoditas lainnya. Alternatif lahan tersebut, antara lain tanah sulfat masam dan tanah gambut.

Indonesia, bukan satu-satunya negara yang memanfaatkan dan mengembangkan tanah sulfat masam dan gambut yang disebut tanah bermasalah (*problematic lands*) untuk pertanian. Simposium dan seminar internasional tentang kedua jenis tanah tersebut dilakukan secara bergantian di negara-negara, antara lain seperti Irlandia (1954), Rusia (1963), Kanada (1969), Belanda (1972), Senegal (1986), Thailand (1981), Vietnam (1992), Finlandia (2004), Tiongkok (2008), Malaysia (2008), Indonesia (2021), Estonia (2021), dan Australia (2023). Beberapa ilmuwan yang mempelajari dan meneliti kedua jenis tanah tersebut cukup tersebar di dunia. Misalnya, B. Polak, R.E. Lucas, J.P. Andriessse, W.H. Diemont, P.M. Driessen, E. Maltby, J.O. Riley, dan S.E. Page pada bidang tanah gambut. Pada bidang tanah sulfat masam, ada F.N. Ponnampurumma, F.R. Moormann, N.V. Breemen, D. Dent, J.J.B. Bronswijk, J. Gronenberg, C. Ritsema, D.S. Fanning, M.C. Rabenhorst, dan R.W. Fitzpatrick. Di dalam negeri, juga terdapat beberapa dosen dan peneliti yang menggeluti kedua jenis tanah rawa ini, antara lain T. Notohadiprawiro, S. Sabiham, B. Radjagukguk, dan I.P.G. Widjaja-Adhi. Pertemuan dan seminar nasional (di Indonesia) tentang tanah sulfat masam dan gambut telah dilaksanakan sejak tahun 1980 sampai 2020 seiring dengan proyek reklamasi atau pembukaan daerah rawa pada tahun 1969 yang dikenal dengan Pembukaan Persawahan Pasang Surut (P3S) hingga sampai tahun 2021 dengan munculnya inisiatif pembangunan *food estate* di lahan rawa Kalimantan Tengah.

Sorotan yang besar terhadap tanah sulfat masam dan gambut, terutama tanah gambut, hampir dipastikan selalu terjadi, khususnya pada saat El Nino, seperti pada tahun 2015. Pada saat itu, pemerintah bahkan sampai menyatakan keadaan “darurat bencana” karena terjadinya kabut asap akibat kebakaran lahan gambut yang menimbulkan terhentinya beberapa kegiatan masyarakat dan pemerintah, seperti sekolah, kepegawaian, penerbangan, dan pelayaran. Bahkan, pemerintah sampai harus menyediakan pengungsian untuk warga yang terkena bencana tersebut. Oleh karena itu, pemahaman dan pengembangan inovasi teknologi budi daya dan pengelolaan kedua jenis tanah

tersebut menjadi penting dan mutlak. Berikut dikemukakan beberapa catatan penting sebagai bahan perenungan dan pemikiran.

## A. Sumber Pertumbuhan Produksi Pangan ke Depan

Peringatan pemerintah untuk memastikan keamanan dan ketahanan pangan disampaikan oleh Presiden Joko Widodo di tengah pembahasan ketersediaan pangan menjelang Ramadan 1444 H/2023 M. Untuk keamanan dan ketahanan pangan, diperlukan stok beras sekitar 2,0–2,5 juta t untuk keperluan paling tidak selama tiga bulan ke depan. Di tengah kondisi lahan-lahan subur di Pulau Jawa yang terus mengalami pemerosotan dan penyempitan, mau tidak mau, suka tidak suka, lahan-lahan cadangan berupa tanah sulfat masam dan gambut menjadi alternatif pilihan. Di beberapa negara, seperti Vietnam dan Thailand, telah berhasil mengandalkan hasil pangannya, yaitu masing-masing dari daerah rawa Delta Mekong dan Delta Chao Phraya yang kondisinya tidak jauh berbeda dari daerah rawa Delta Petak di Kalimantan Selatan, Delta Musi di Sumatra Selatan, dan delta-delta lainnya di wilayah Indonesia. Bahkan, dilaporkan bahwa beras dari Delta Mekong inilah yang diekspor Vietnam ke Indonesia untuk menutupi kebutuhan pangan nasional.

## B. Kesenjangan Hasil Antara Penelitian dan Petani

Berbagai hasil penelitian yang telah dikemukakan pada bab-bab sebelumnya menyatakan bahwa produktivitas padi di tanah sulfat masam dan gambut dapat ditingkatkan. Demikian juga *demplot-demplot* dari dinas pertanian saat panen raya oleh presiden atau gubernur menunjukkan hasil (*ubinan*) yang cukup baik. Dilaporkan bahwa panen padi varietas Inpara dan Margasari dari lahan sulfat masam di Desa Karang Buah, Terantang, Kabupaten Barito Kuala, Kalimantan Selatan pada tahun 2015 masing-masing 4,5 t/ha GKG dan 6,7 t/ha GKG. Adapun padi varietas hibrida Sembada di lahan sulfat masam Desa Terusan Mulia, Kabupaten Kapuas, Kalimantan Tengah mencapai 7,5 t/ha GKG (Subagio et al., 2015). Dilaporkan juga bahwa panen raya di lokasi *food estate* lahan rawa Desa Dadahup A-5,

Kabupaten Kapuas serta di Desa Belanti II, Kabupaten Pulang Pisau, Kalimantan Tengah mencapai 5–7 t/ha GKG (Noor, 2021) dan pada lokasi lahan gambut yang telah direhabilitasi, dicapai hasil tertinggi padi varietas Inpara 2, Inpara 3, dan Inpara 8, yaitu masing-masing 6,31; 5,46; dan 6,28 t/ha GKG (Alwi et al., 2022) .

Akan tetapi, hasil padi petani di lahan gambut untuk padi varietas lokal hanya berkisar 0,3–2,0 t/ha GKG dan padi varietas unggul 0,2–2,4 t/ha GKG sehingga terdapat kesenjangan hasil yang cukup besar (Alwi et al., 2022). Menurut Hairani dan Noor (2021), hasil padi petani yang menerapkan sistem tata air dua arah di lahan rawa pasang surut sulfat masam Unit Tatas, Kabupaten Kapuas, Kalimantan Tengah hanya berkisar 1,3–1,4 t/ha GKG. Di lahan serupa di Unit Karang Agung Tengah, Kabupaten Musi Banyuasin, Sumatra Selatan mencapai 2,39 t/ha GKG. Apabila dilakukan perbaikan pengelolaan air dengan menerapkan sistem satu arah, diperoleh hasil masing-masing di Unit Tatas 2,8–3,14 t/ha GKG dan di Karang Agung Tengah mencapai 5,59 t/ha GKG. Dari data-data tersebut, tampak bahwa kesenjangan hasil antara petani dan hasil penelitian masih cukup besar, yaitu mencapai berkisar 115%–130%. Kesenjangan hasil tersebut dapat disebabkan oleh beberapa hal berikut.

- 1) Teknik budi daya dan input yang digunakan petani lebih rendah atau tidak sesuai dosis anjuran. Kebanyakan petani tidak menerapkan rekomendasi teknologi yang dianjurkan secara utuh. Misalnya, bahan amelioran, seperti kapur, hanya diberikan separuh dari dosis semestinya atau pupuk yang diberikan tidak sesuai dosis dan tidak lengkap. Selain itu, ada juga petani yang memilih bibit dari pertanaman sebelumnya, tidak dari bibit bermutu yang telah dijamin kualitasnya.
- 2) Dukungan infrastruktur, seperti sistem pengelolaan air, yang belum memadai.
- 3) Pengendalian hama dan penyakit yang belum optimal.

- 4) Kondisi iklim, seperti curah hujan, yang sering tidak menentu sangat berpengaruh pada hasil yang dicapai petani. Tidak jarang petani terlambat tanam karena kondisi genangan yang masih tinggi pada saat jadwal tanam dan panen saat menjelang masuk musim hujan sehingga kondisi tergenang.

Kesenjangan hasil juga dapat disebabkan karena cara panen dan pemrosesan hasil dilakukan seadanya sehingga banyak terjadi kehilangan hasil. Misalnya, waktu panen terlambat sehingga banyak gabah yang rontok, cara panen dengan menggunakan arit/sabit, panen dengan *combine harvester* yang sering amblas, sistem pengangkutan yang belum optimal sehingga banyak hasil yang tercecer, pemrosesan yang masih tradisional, seperti sistem gebuk/injak sehingga banyak gabah yang tertinggal/tidak terangkut.

Oleh karena itu, agar tercipta sinergi antara hasil penelitian dan petani, di samping petani yang diharapkan dapat menerapkan rekomendasi dari hasil penelitian, para peneliti juga diharapkan mampu mendesain penelitiannya semaksimal mungkin yang mendekati kondisi *real* di lapangan sehingga mempermudah petani dalam adopsi teknologi.

### C. Saran Pengelolaan Lahan Rawa Masa Depan

Dalam rangka memastikan keamanan dan ketahanan pangan, pemerintah selalu diingatkan oleh para pakar, baik melalui media massa maupun media sosial. Untuk mencapai keamanan dan ketahanan pangan, disyaratkan perlunya tersedia stok beras sekitar 2,0–2,5 juta t beras untuk keperluan paling tidak selama tiga bulan ke depan. Oleh karena itu, di tengah kondisi lahan-lahan subur di Pulau Jawa yang terus mengalami pemerosotan dan penyempitan, lahan-lahan cadangan berupa tanah sulfat masam dan gambut menjadi alternatif pilihan. Pemerintah Vietnam dan Thailand telah sejak lama mengandalkan hasil pangannya dari lahan yang terdapat di Delta Mekong dan Delta Chao Phraya. Bahkan, dilaporkan beras dari Delta Mekong inilah yang diekspor Vietnam ke negara kita untuk menutupi kebutuhan pangan

nasional. Padahal, kondisi Delta Mekong dan Delta Chao Phraya tidak jauh berbeda dari delta-delta yang ada di Indonesia. Hal ini berarti sesungguhnya Indonesia memiliki potensi untuk mencukupi kebutuhan pangan nasional sendiri (swasembada pangan).

Akan tetapi, menurut Sulaiman et al. (2018), selain dukungan terkait hal-hal teknis, pengembangan usaha tani di lahan rawa juga memerlukan dukungan kelembagaan yang modern dan maju, seperti kelompok petani. Akan tetapi, kebanyakan kelompok tani di daerah rawa masih berstatus pemula sehingga diperlukan pembinaan yang lebih intensif. Konsep pengembangan kelembagaan *food estate* berbasis korporasi petani belum merata diintroduksi dan diterima petani sepenuhnya sehingga menjadi masalah pembinaan kelembagaan.

Berdasarkan tingkat perkembangannya, terdapat tiga kategori kelompok, yaitu (1) kelompok pemula, dicirikan dengan sistem usaha tani tidak layak (*unfeasible*) dan tidak mampu memanfaatkan sumber dana bank (*unbankable*); (2) kelompok madya, yaitu usaha tani layak, tetapi belum dapat memanfaatkan sumber dana bank; dan (3) kelompok maju, yaitu usaha tani layak (*feasible*) dan mampu mengakses bank (*bankable*). Kondisi kelompok tani pemula harus dapat berkembang menjadi madya dan maju karena tuntutan perkembangan masyarakat dan perekonomian yang makin rumit. Penguatan kelembagaan petani merupakan salah satu strategi pengembangan dan pemanfaatan tanah sulfat masam dan gambut ke depan. Lebih lanjut, harapan pemerintah untuk mulai dilakukan korporasi petani sehingga keuntungan yang selama ini banyak dinikmati pedagang dapat diperoleh petani. Petani dapat menikmati hasil usaha taninya dan kesejahteraannya meningkat sehingga pertanian yang berkelanjutan benar-benar dapat menjadi kenyataan.

Dalam pengelolaan lahan rawa masa depan, diperlukan arah dan langkah strategis antisipatif, mitigatif, dan adaptif terhadap perubahan iklim dan penurunan kualitas lahan. Beberapa langkah yang dapat diterapkan, antara lain sebagai berikut.

- 1) Memetakan masalah dan menyusun strategi penanganannya. Luas dan beragamnya kondisi, kendala, dan permasalahan pada

masing unit-unit pengembangan meliputi biofisik lahan, sosial ekonomi, dan lingkungan sehingga diperlukan pemetaan masalah dan pemecahan secara terperinci.

- 2) Meningkatkan dan membuat infrastruktur tata air. Kondisi lahan rawa yang umumnya sudah berumur karena reklamasi dan pemanfaatannya sejak 40–50 tahun silam (1970–1980) membutuhkan pembaruan agar tetap produktif. Peningkatan dan pembuatan infrastruktur tata air dapat dilakukan secara bertahap, berasaskan prioritas, dan berkesinambungan.
- 3) Membina petani secara berkesinambungan. Kondisi petani sebagai pengelola dan pemegang kebijakan dalam intervensi terhadap rawa, baik dalam pemanfaatan, pengembangan, pengelolaan, maupun pelestarian sehingga upaya dalam pemahaman dan pengetahuan pengelolaan rawa, termasuk sifat tanah, air, dan tanaman yang baik perlu dilakukan secara terus-menerus.
- 4) Menguatkan penelitian dan pengkajian. Teknologi digital, kecerdasan buatan, dan *internet of things* (IoT) yang berkembang pesat dapat memperkaya teknologi pengelolaan dan budi daya pertanian lahan rawa melalui cara-cara yang lebih efisien dan efektif dalam pencapaian target produksi yang diharapkan.
- 5) Menguatkan koordinasi dan sinkronisasi antara sektor-sektor terkait dalam melaksanakan kegiatan dalam pengembangan dan perlindungan rawa yang cenderung masih terkesan bersifat ego sektoral.
- 6) Menerapkan pengelolaan lahan berbasis ilmu pengetahuan. Setiap langkah strategis dalam pengelolaan lahan rawa masa depan haruslah berbasis ilmu pengetahuan. Kebijakan yang dibuat tidak boleh hanya didasarkan keinginan ataupun kepentingan yang sifatnya sesaat. Setiap langkah strategis dalam pengelolaan lahan rawa harus didasarkan atas prinsip keberlanjutan.



# Glosarium

- aerob : suatu kondisi lingkungan di mana oksigen masih tersedia
- amelioran : bahan yang dapat meningkatkan kesuburan tanah melalui perbaikan kondisi fisik dan kimia
- ameliorasi : suatu tindakan memberikan bahan yang dapat meningkatkan kesuburan tanah melalui perbaikan kondisi fisik dan kimia
- amorf : bentuk padatan atau mineral yang susunan atom atau partikelnya tersusun secara acak dan tidak teratur
- anaerob : kondisi lingkungan tanpa oksigen
- ani-ani : alat semacam pisau yang bagian tajamnya dipasang pada sebidang papan kecil yang kemudian diberi tangkai melintang (vertikal) di tengah papan tersebut

- asam organik : senyawa asam karbon yang dihasilkan tumbuhan dan hewan ataupun hasil dekomposisi makhluk hidup, umumnya bersifat sebagai asam lemah
- boreal : kawasan beriklim sejuk atau sedang di belahan bumi bagian utara
- cekaman : segala kondisi perubahan lingkungan (abiotik dan biotik) yang mungkin akan menurunkan atau merugikan pertumbuhan dan perkembangan tanaman
- combine harvester* : alat panen dengan tiga fungsi, yaitu sebagai alat panen, alat perontok padi, dan alat pembajak sawah
- daya sangga tanah : kapasitas fase padat untuk mengisi kembali hara atau mempertahankan kemasaman dalam larutan tanah akibat adanya serapan atau sebab lainnya yang menyebabkan berubahnya keseimbangan hara atau kemasaman tanah
- dekomposisi : proses perubahan bentuk sisa makhluk hidup oleh mikrobial menjadi senyawa sederhana
- diampak : pindah tanam pertama bibit padi di lahan rawa selama kurang lebih 30 hari kemudian dipindah tanam lagi
- diirik : proses merontokkan padi dengan cara menginjak malai-malai sampai dihasilkan gabah
- dilacak : proses menanam bibit padi di lahan rawa dengan menggunakan bibit dari ampakan dengan umur bibit sekitar 2–2,5 bulan
- drainase : pembuangan massa air secara alami atau buatan dari permukaan atau bawah permukaan dari suatu tempat

drainase dangkal	: pengeluaran air dari lahan dengan tujuan agar lahan tetap basah, tetapi tetap mampu memberikan oksigen untuk aerasi di daerah perakaran tanaman
elektron	: partikel penyusun bagian luar atom yang bermuatan negatif
endapan marine	: endapan yang terjadi akibat adanya proses sedimentasi oleh air laut
fiksasi	: proses pengikatan unsur dari larutan tanah oleh fraksi padatan tanah
gabah	: kering giling adalah gabah yang mengandung kadar air maksimum sebesar 14% dan kadar hampa/kotoran maksimum 3%.
gas rumah kaca	: gas-gas di atmosfer yang dapat menangkap panas matahari
<i>gelebeg</i>	: suatu cara pengolahan tanah menggunakan traktor tanpa melakukan pembajakan, hanya menggunakan <i>gelebeg</i> dan garu untuk meratakan tanah
gugus fungsional	: substituen atau bagian spesifik dalam molekul yang bertanggung jawab terhadap karakteristik reaksi kimia dari molekul-molekul tersebut
hara tersedia	: unsur hara yang mudah diserap tanaman, biasanya berada dalam larutan tanah
hidrolisis	: proses penguraian zat dalam reaksi kimia yang disebabkan oleh air
horizon tanah	: hasil dari proses pembentukan tanah yang membentuk lapisan dengan ciri-ciri tertentu, yaitu horizon O, A, B, C, dan D/R
intensitas	: persentase luas tanam setiap jenis tanaman yang dapat diketahui berdasarkan pola tata tanam yang diterapkan di setiap musim tanam

- keracunan : keadaan yang dapat merusak sel dan sebagian fungsi fisiologis tanaman akibat masuknya suatu zat yang mengandung racun
- landform* : suatu unit geomorfologis yang dikategorikan berdasarkan karakteristik, seperti elevasi, kelandaian, orientasi, stratifikasi, paparan batuan, dan jenis tanah
- kation : ion bermuatan positif
- klei/lempung/liat : partikel tanah/mineral yang berukuran lebih kecil dari 0,002 mm
- kondisi hidrologis : kondisi yang didasarkan pada air/perairan/keadaan air di wilayah tersebut
- kristal atau hablur : suatu padatan, yaitu atom, molekul, atau ion yang penyusunnya terkemas secara teratur dan polanya berulang melebar secara tiga dimensi
- khelat : kombinasi logam dengan molekul organik yang membentuk struktur seperti cincin
- macak-macak : suatu keadaan tanah yang jenuh air dengan tinggi genangan air yang hampir sama atau sedikit lebih tinggi (<5 cm) dari permukaan tanah dalam waktu yang singkat/tidak permanen
- mineral : padatan senyawa kimia homogen, nonorganik, dan memiliki bentuk teratur (sistem kristal) yang terbentuk secara alami
- mineralisasi : proses perubahan penyusunan organik menjadi materi anorganik
- pedogenesis : proses pembentukan tanah
- pelarutan : sebuah proses perubahan bentuk dari gas, cairan, atau padatan dari bentuk asalnya menjadi komponen terlarut

- pencucian/ pelindian : proses di mana suatu bahan/unsur anorganik atau organik dibebaskan dari fase padat ke dalam fase air di bawah pengaruh proses pelarutan, desorpsi, kompleksasi mineral yang dipengaruhi oleh pH, redoks, bahan organik terlarut, dan aktivitas (mikro) biologi
- pengendapan : proses membentuk endapan, yaitu padatan yang dinyatakan tidak larut dalam air
- profil : penampang melintang (vertikal) lapisan-lapisan tanah
- rawa belakang : bagian dari dataran banjir di mana simpanan tanah klei menetap setelah banjir atau sebagai tempat lumpur halus dan tanah klei mengendap setelah banjir, biasanya terletak di belakang sebuah tanggul sungai alam
- rawa monoton : istilah lain untuk lahan rawa lebak dangkal
- redoks : istilah yang menjelaskan berubahnya bilangan oksidasi (keadaan oksidasi) atom-atom dalam sebuah reaksi kimia
- saluran tersier : saluran drainase yang menerima air dari saluran penangkap dan menyalurkannya ke saluran sekunder
- saluran sekunder : saluran drainase yang menerima air dari saluran tersier dan menyalurkannya ke saluran primer
- sawit dupa : pola tanam di lahan pasang surut IP 180, seperti di Kalimantan Selatan, singkatan dari sekali *mewiwit* dua kali panen, tanam pertama (Okmar) varietas unggul, tanam kedua (Asep) varietas lokal
- sedimen : material yang diendapkan di dasar suatu cairan (air dan udara), atau secara sempit sebagai material yang diendapkan oleh air, angin, atau gletser/es

- struktur tanah : sifat fisika tanah yang menggambarkan susunan ruangan partikel-partikel tanah yang bergabung satu dengan yang lain membentuk gumpalan kecil yang mempunyai bentuk, ukuran, dan kemantapan (ketahanan) yang berbeda-beda
- tabat konservasi : sistem aliran air satu arah pada saluran tersier dengan menggunakan pintu air di lahan rawa lebak untuk mempertahankan muka air tanah di lahan tersebut
- tanam pindah : teknik memindahkan bibit tanaman (padi) dari satu tempat ke tempat lain
- teradak : sistem persemaian kering pada tempat yang tidak terkena genangan air (teradak) menyemainya, dikenal sebagai “meneradak” dan persemaiannya adalah “teradakan”
- teknologi budi daya *indigenous* : budi daya padi yang dilakukan petani di lahan rawa pasang surut dan lebak dengan pengetahuan lokal petani setempat berdasarkan kearifan dan tanda-tanda secara alamiah
- tugal : alat bantu tanam yang digunakan petani untuk membuat lubang tanam padi, jenis yang digunakan petani adalah tugal tradisional terbuat dari kayu berbentuk silinder dengan ujung yang runcing
- penggaruan lahan : proses menghancurkan bagian-bagian tanah yang cukup keras atau menggumpal agar dapat lebih mudah ditanami, umumnya petani menggunakan garu, cangkul, atau traktor dalam prosesnya
- tropika : suatu bagian di permukaan bumi yang secara geografis berada di sekitar ekuator, yaitu yang terletak di antara garis lintang 23.5° lintang selatan dan 23.5° lintang utara

- tergenang : suatu keadaan tanah yang terjenuhi air dalam kisaran waktu tertentu
- transformasi : perubahan bentuk mineral menjadi mineral baru yang susunan dan komposisi kimianya berbeda dari mineral sebelumnya
- unsur hara : nutrisi/zat tertentu yang dibutuhkan tanaman untuk tumbuh dan berkembang, tanpa unsur hara, tanaman tidak akan tumbuh normal
- unsur meracun : zat/unsur tertentu (umumnya jenis logam) yang jika konsentrasinya besar, berpotensi mengganggu pertumbuhan atau bahkan sampai mematikan tanaman



## Daftar Pustaka

- AARD (Agency for Agricultural Research and Development) and LAWO (The Land Water Research Group). (1992). Acid sulfate soils in the humid tropics: Simulation model and chemical processes to evaluate water management strategies.
- Acero, P., Ayora, C., Torrento, C., & Nieto, J. M. (2006). The behavior of trace elements during schwertmannite precipitation and subsequent transformation into goethite and jarosite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70, 4130–4139.
- Adimihardja, A., Subagyono, K., & Al-Jabri, M. (2006). Konservasi dan rehabilitasi lahan rawa. Dalam D. S. Ardi, U. Kurnia, H. S. Mamat, W. Hartatik, & D. Setyorini (Ed.), *Karakteristik dan pengelolaan lahan rawa* (229–274). Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumber daya Lahan Pertanian.
- Adji, F. F., Kertonegoro, B. D., & Maas, A. (2005). Relationship between the depth of ground water table dynamics and peats degradation in Kalampangan Central Kalimantan. Dalam H. Wosten & B. Radjagukguk (Ed.), *Proceeding of the session on the role of tropical peatlands in global change processes* (21–30). ALTERRA-EU INCO-STRAPPEAT dan RESTROPEAT.

- Aggenbach, C. J. S., Back, H., Emsens, W. J., Grootjans, A. P., Lamers, L. P. M., Smolders, A. J. P., Stuyfzand, P. J., Wolejko, L., & Van Diggelen, R. (2013). Do high iron concentrations in rewetted rich fens hamper restoration? *Preslia*, 85, 405–420.
- Agus, F., & Subiksa, I. G. M. (2008). *Lahan gambut: Potensi untuk pertanian dan aspek lingkungan*. Balai Penelitian Tanah dan World Agroforestry Centre (ICRAF). 36 p.
- Agus, F., Hairiah, K., & Mulyani, A. (2011). *Measuring carbon stock in peat soils: Practical guidelines*. World Agroforestry Centre (ICRAF) Southeast Asia Regional Program, Indonesian Centre for Agricultural Land Resources Research and Development. 60 p.
- Ahern, C. R., McElnea, A. E., & Sullivan, L. A. (2004). *Acid sulfate soils laboratory methods guidelines*. Queensland Department of Natural Resources, Mine and Energy, Indooroopilly.
- Alihamsyah, T., Prayudi, B., Sulaiman, S., Ar–Riza, I., Noor M., & Sarwani, M. (2004). *40 tahun BALITTRA: Perkembangan dan program penelitian ke depan*. Edisi Kedua. Badan Litbang Departemen Pertanian.
- Allison, F. E. (1973). Formation and characteristics of peats and mucks. Dalam *Developments in Soil Science* (585–602). Vol. 3. Elsevier.
- Alwi, M. Saragih, S., & Lestari, Y., (2004). *Komponen teknologi pengelolaan lahan terpadu untuk peningkatan produktivitas dan konservasi lahan gambut* [Laporan Akhir]. Balittra, Balitbangtan.
- Alwi, M. Hairani, A., Noor, M., & Surataman. (2022). Perspectives on the changing properties of peat soils used for agriculture: the case of Talio Hulu Village. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. doi:10.1088/1755-1315/1025/1/012036. 9 p
- Amaleviciute, K., Liaudanskiene, I., Slepetiene, A., Slepety, J., Jokubauskaite, I., & Volungevicius, J. (2015). Carbon and important macroelements of *terric histosol* after 12 years renaturalization. *Eurasian Journal of Soil Science*, 4(4), 272–278.
- Amukelar, & Kardin, M.K. (1991). *Pengendalian penyakit jamur*. Balai Penelitian Tanaman Pangan.

- Ananto, E. E., Supriyo, A., Soentoro, Hermanto, Soelaeman, Y., Suastika, I. W., & Nuryanto, B. (2000). *Pengembangan usaha pertanian lahan pasang surut Sumatra Selatan: Mendukung ketahanan pangan dan pengembangan agribisnis*. P2SLPS2. Badan Litbang Pertanian.
- Anda, M., Siswanto, A. B., & Subandiono, R. E. (2009). Properties of organic and acid sulfate soils and water of a 'reclaimed' tidal backswamp in Central Kalimantan, Indonesia. *Geoderma*, 149, 54–65.
- Anda, M., & Subardja, D. (2013). Assessing soil properties and tidal behaviors as a strategy to avoid environmental degradation in developing new paddy fields in tidal areas. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 181, 90–100.
- Anda, M., Ritung, S., Suryani, E., Sukarman, Hikmat, M., Yatno, E., Mulyani, A., Subandiono, R. E., Suratman, & Husnain. (2021). Revisiting tropical peatlands in Indonesia: Semi-detailed mapping, extent and depth distribution assessment. *Geoderma*, 402, 115235
- Andersen, R., Wells, C., Macrae, M., & Price, J. (2013). Nutrient mineralisation and microbial functional diversity in a restored bog approach natural conditions 10 years post restoration. *Soil Biology and Biochemistry*, 64, 37–47.
- Anderson, J. A. R. (1983). The tropical peat swamp of western Malaysia. Dalam A. J. P. Gore (Ed.), *Ecosystems of the World 4 B, Mire: Swamp, Bog, Fen and Moor* (181–199). Elsevier.
- Andriessse, J. P. (1988). *Nature and management of tropical peat soils*. FAO Soil Bulletin 59.
- Andriessse, W., & Van Meensvoort, M. E. F. (2006). Acid sulfate soils: distribution and extent, Dalam R. Lal (Ed.), *Encyclopedia of Soil Science* (14–19). Vol. 1, 2<sup>nd</sup> edition. Taylor & Francis,.
- Anshari, G., Rianto, F., Mirjaya, A., & Nelly, F. (2004). Promoting best agriculture practices peatlands conservation and income generation activities. *Proceeding workshop on wise use and sustainable peatlands management practices*. Wetlands International – Indonesia Programme dan Wildlife Habitat Canada.
- Anshari, G. Z. (2010). A preliminary assessment of peat degradation in West Kalimantan. *Biogeosciences Discussion*, 7, 3503–3520.

- Antarlina, S. S., Hidayat, D., Izzuddin, & Raihan, S. (2005). *Teknologi peningkatan produktivitas lahan dan kualitas tanaman jeruk di lahan rawa* [Laporan Hasil Penelitian]. Balai Penelitian Pertanian Lahan Rawa.
- Anthony, J. W., Bideaux, R. A., Bladh, K. W., & Nichols, M. C. (1990). *Handbook of Mineralogy*, Vol. I. Elements, sulfides, sulfosalts: Tucson, Arizona, Mineral Data Publishing.
- Anwar, K., Sarwani, M., & Itjin, R. (1994). Pengembangan pengelolaan air di lahan pasang surut: Pengalaman dari Kalimantan Selatan. Dalam M. Sarwani, M. Noor, & M. Y. Maamun (Ed.), *Pengelolaan air dan peningkatan produktivitas lahan rawa pasang surut: Pengalaman di Kalamantan Selatan dan Tengah*. Balittan.
- Anwar, K., Susilawati, A., & Noor, M. (2012). *Laporan hasil penelitian*. Balai Penelitian Pertanian Lahan Rawa. Balai Besar Sumber daya Lahan Pertanian. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian.
- Anwar, K., & Alwi, M. (2000). Pengelolan hara untuk meningkatkan hasil jagung di lahan gambut dangkal. *Prosiding Seminar Nasional Penelitian dan Pengembangan Pertanian di Lahan Rawa*. Puslitbangtan, Balitbangtan.
- Anwar, S. (2012). *Pola tanam tumpang sari*. Agroekoteknologi Litbang Deptan.
- Ar\_Riza, I., Saragih, S., & Nazemi, D. (2007). Pengelolaan lahan dalam sistem budidaya padi di lahan rawa pasang surut. Dalam *Prosiding simposium dan seminar PERAGI* (92–96).
- Arth, I., & Frenzel, P. (2000). Nitrification and denitrification in the rhizosphere of rice: the detection of processes by a new multi-channel electrode. *Biology and Fertility of Soils*, 31, 427–435.
- Asmono, D., Purba, A. R., Yenni, M., Kohar, Y., Zaelanie, H., Liwang, T., & Beng, A.B. (2005). Peta dan prospek pemuliaan dan industri perbenihan kelapa sawit Indonesia. Dalam K. Diwyanto, T. Agung, D. H. Muladno, S. Sujiprihati, & P. H. Siagian. (Ed.), *Simposium Nasional dan Kongres V PERIPI. Pemuliaan Sebagai Pendukung Kemandirian dan Ketahanan Pangan* (189–192).

- Astrom, M., Osterholm, P., Barlund, I., & Tattari, S. (2007). Hydrochemical effects of surface liming, controlled drainage and lime-filter drainage on boreal acid sulfate soils. *Water, Air and Soil Pollution*, 179, 107–116.
- Attanandana, T., & Vacharotayan, S. (1986). Acid sulfate soils: their characteristics, genesis, amelioration and utilization. *Southeast Asian Studies*, 24(2), 154–180.
- Baken, S., Verbeeck, M., Verheyen, D., Diels, J., & Smolders, E. (2015). Phosphorus losses from agricultural land to natural waters are reduced by immobilization in iron-rich sediments of drainage ditches. *Water Research*, 71, 160–170.
- Baldwin, D. S., & Fraser, M. (2009). Rehabilitation options for inland waterways impacted by sulfidic sediments - a synthesis. *Journal Environmental Management*, 91(2), 311–319.
- Baldwin, D. (2011). *National guidance for the management of acid sulfate soils in inland aquatic ecosystems*. Environment Protection and Heritage Council and the Natural Resource Management Ministerial Council.
- Balitkabi. (2011). *Laporan tahunan penelitian aneka kacang dan umbi*. Balai Penelitian Tanaman Kacang-Kacangan dan Umbi-Umbian.
- Balittanah. (2012). PUGAM. Pupuk rendah emisi untuk lahan gambut. *Warta Penelitian dan Pengembangan Pertanian*, 34(2), 73–88.
- Balitra. (2011). *Setengah abad balitra: Rawa lumbung pangan menghadapi perubahan iklim*. Balai Penelitian Pertanian Lahan Rawa.
- Balitra. (2013). *Kajian penerapan paket alat mesin budidaya padi di lahan rawa*. Balitra dan Balai Besar Mektan.
- Balitra. (2016). *Pedoman umum pengelolaan lahan sulfat masam berkelanjutan*. Balai Penelitian Pertanian Lahan Rawa.
- Banach, A. M., Banach, K., Peters, R. C. J. H., Jansen, R. H. M., Visser, E. J. W., Stepniewska, Z., Roelofs, J. G. M., & Lamers, L. P. M. (2009). Effects of long-term flooding on biogeochemistry and vegetation development in floodplains: a mesocosm experiment to study interacting effects of land use and water quality. *Biogeosciences*, 6, 1325–1339.
- Barani, A. M. (2012). *Karet alam sebagai ATM petani dan sumber devisa negara*. Media Perkebunan.

- Barber, S. A. & Adams, F. (1984). Liming materials and practices. Dalam F. Adams (Ed.), *Soil acidity and liming* (171–209). Vol. 12, 2<sup>nd</sup> edition. The American Society of Agronomy, Inc. Crop Science Society of America, Inc. Monograph series no. 12.
- BBSDLP (Balai Besar Litbang Sumber daya Lahan Pertanian). (2011). *Peta lahan gambut indonesia skala 1:250.000*. Balai Besar Litbang Sumber daya Lahan Pertanian/ICALRRD.
- BBSDLP. (2014). *Sumber daya lahan pertanian Indonesia: Luas, penyebaran dan potensi ketersediaan*. Laporan Teknis 1/BBSDLP/10/2014.
- BBSDLP. (2015). *Sumber daya lahan pertanian indonesia: luas, penyebaran dan potensi ketersediaan*. IAARD Press.
- BBSDLP. (2020). *Sosialisasi peta lahan rawa dan gambut Indonesia*. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Kementerian Pertanian.
- Bechteler, A., & Siegert, F. 2004. Recurrent fires in tropical peatlands Central Kalimantan. Dalam J. Paivanen. (Ed.), *Wise Use of Peatlands. Proceedings of the 12 International Peat Congress* (607–613). Tampere.
- Beek, K. J., Blokhois, W. A., Driessen, P. M., Breemen, N. V., & Pons, L. J. (1980). *Problem soils: reclamation and management*. ILRI. Publ. 27.
- Beek, C. L. V., Droogers, P., Van Hardeveld, H. A., Van den Eertwegh, G. A. P. H., Velthof, G. L., & Oenema, O. (2007). Leaching of solutes from an intensively managed peat soil to surface water. *Water, Air and Soil Pollution*, 182, 291–301.
- Beers, W. F. J. V. (1962). Acid sulphate soils. *ILRI Bulletin* No. 3.
- Berner, R. A. (1964). An idealized model of dissolved sulfate distribution in recent sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 28, 1497–1503.
- Berner, R. A. (1970). Sedimentary pyrite formation: an update. *American Journal of Science*, 268, 1–23.
- Bigham, J. M., Schwertmann, U., Carlson, L., Murad, E. (1990). A poorly crystallized oxyhydroxysulfate of iron formed by bacterial oxidation of Fe(II) in acid mine waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54, 2743–2758.
- Bigham, J. M., Schwertmann, U., Traina, S. J., Winland, R. L., & Wolf, M. (1996). Schwertmannite and the chemical modelling of iron in acid sulfate waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60, 2111–2121.

- Bigham, J. M., & Nordstrom, D. K. (2000). Iron and aluminium hydroxysulfates from acid sulfate waters. Dalam C. N. Alpers, J. L. Jambor, & D. K. Nordstrom (Ed.), *Sulfate minerals: crystallography, geochemistry, and environmental significance* (351–393). Mineralogical Society of America.
- Bijak, S. (2017). Selected properties of organic soils under boreal mire spruce forest in the Romincka Forest, NE Polan. *Soil Science Annual*, 68(4), 182–188.
- Blodau, C. (2006). A review of acidity generation and consumption in acidic coal mine lakes and their watersheds. *Science and Total Environment*, 369, 307–332.
- Bloomfield, C. (1973). Acidification and ochre formation in pyritic soils. Dalam H. Dost (Ed.), *Proceedings of the international symposium on acid sulphate soils* (131–139), Publication 18–II. International Institute for Land Reclamation and Improvement.
- Bloomfield, C., & Coulter, J. K. (1973). Genesis and management of acid sulfate soils. *Advance in Agronomy*, 25, 239–265.
- Bloomfield, C., & Powlson, D. S. (1977). The improvement of acid sulfate soils for crops other than padi. *Malaysia Agricultural Journal*, 51(1), 62–76.
- Blunden, G. F. (2000). *Management of acid sulfate soils by groundwater manipulation* [Disertasi tidak diterbitkan]. Wollongong University.
- BNPB (Badan Nasional Penanggulangan Bencana). (2019). 99% Penyebab kebakaran hutan dan lahan adalah ulah manusia. Diakses pada 14 Maret, 2024, dari <https://bnpb.go.id/berita/99-penyebab-kebakaran-hutan-dan-lahan-adalah-ulah-manusia>.
- Bodegom, P. M. V., Scholten, J. C. M., & Stams, A. J. M. (2004). Direct inhibition of methanogenesis by ferric iron. *FEMS Microbiology Ecology*, 49(2), 261–268. <https://doi.org/10.1016/j.femsec.2004.03.017>
- Boehm, H. D. V., & Siegert, F. (2002). Land use and (il)–legal logging in Central Kalimantan, Indonesia. Dalam J. O. Rieley & S. E. Page (Ed.), *Peatlands for people, natural resources function, and sustainable management*. BPPT dan Indonesian Peat Association.

- Boelter, D. H. (1969). Physical properties of peat as related to degree of decomposition. *Soil Science Society of America Proceeding*, 33, 606–609.
- Bohn, H. L., McNeal, B. L., & O'Connor, G. A. (2001). *Soil chemistry*. 3<sup>rd</sup> edition. John Wiley and Sons.
- Bolan, N. S., Adriano, D. C., & Curtin, D. (2003). Soil acidification and liming interactions with nutrient and heavy metal transformation and bioavailability. *Advances in Agronomy*, 78, 215–272.
- Boman, A., Aström, M. E., & Fröjdö, S. (2008). Sulfur dynamics in boreal acid sulfate soils rich in metastable iron sulfide—The role of artificial drainage. *Chemical Geology*, 255, 68–77.
- Boman, A., Fröjdö, S., Backlund, K., & Aström, M. E. (2010). Impact of isostatic land uplift and artificial drainage on oxidation of brackish-water sediments rich in metastable iron sulfide. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(4), 1268–1281.
- Bonneville, S., Behrends, T., & Van Cappellen, P. (2009). Solubility and dissimilatory reduction kinetics of iron (III) oxyhydroxides: A linear free energy relationship. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 73, 5273–5282.
- Bonnissel-Gissing, P., Alnot, M., Jean-Jacque, S., & Behra, P. (1998). Surface oxidation of pyrite as a function of pH. *Environmental Science Technology*, 32, 2839–2845.
- Borch, T., Masue, Y., Kukudapu, R. K., & Fendorf, S. (2007). Phosphate imposed limitations on biological reduction and alteration of ferrihydrite. *Environmental Science Technology*, 41, 166–172
- Borda, M. J. (2006). Pyrite. Dalam R. Lal (Ed.), *Encyclopedia of soil science* (1385–1387). Vol. 1, 2<sup>nd</sup> edition. Taylor & Francis.
- Bouman, S. A. M., & Driessen, P. M. (1985). Physical properties of peat soils affecting rice-based cropping system. Dalam *Soil Physics and Rice* (71–84). IRRI.
- Brady, N. C. (1974). *Nature and Properties of Soils*. 8<sup>th</sup> edition. The Macmillan Company.
- Breemen, N. V. (1973). Soil forming processes in acid sulphate soils. Dalam H. Dost (Ed.), *Proceedings of the international symposium on acid sulphate soils* (66–130), Publication 18–II. International Institute for Land Reclamation and Improvement.

- Breemen, N. V. (1975). Acidification and deacidification of coastal plain soils as a result of periodic flooding. *Soil Science Society of America Journal*, 39, 1153–1157.
- Breemen, N. V. (1976). *Genesis and Solution Chemistry of Acid Sulphate Soils in Thailand*. Centre for Agricultural Publishing and Documentation.
- Breemen, N. V., & Pons, L. J. (1978). Acid sulphate and rice. Dalam *Soils and rice* (739–761). IRRI.
- Breemen, N. V. (1993). Environmental aspects of acid sulfate soils. Dalam D. L. Dent & M. E. F. Van Mensvoort (Ed.), *Selected papers of the Ho Chi Minh City symposium on acid sulfate soils* (391–402). Publication No. 53. ILRI.
- Breemen, N. V., & Buurman, P. (2002). *Soil Formation*, 2<sup>nd</sup> edition. Kluwer Academic Publisher.
- Bridgham, S., & Richardson, C. J. (2003). Endogenous versus exogenous nutrient control over decomposition and mineralization in North Carolina peatlands. *Biogeochemistry*, 65, 151–178.
- Bronswijk, J. J. B., Nugroho, K., & Aribawa, I. B. (1993). Modeling of oxygen–transport and pyrite oxidation in acid sulfate soils. *Journal of Environmental Quality*, 22(3), 544–554.
- Bronswijk, J. J. B., Gronenberg, J., Ritsema, C., van Wijk, A., & Nugroho, K. (1995). Evaluation of water management strategies using a simulation model: A case study in Indonesia. *Agricultural Water Management*, 27, 125–142.
- Brown, A. D., & Jurinak, J. J. (1989). Mechanism of pyrite oxidation in aqueous mixtures. *Journal of Environmental Quality*, 18, 545–550.
- Buckman, H. O., & Brady, N. C. (1982). *Ilmu Tanah*. Bhratara Karya Aksara.
- Burton, E. D., Bush, R. T., Sullivan, L. A., & Mitchell, D. R. G. (2007). Reductive transformation of iron and sulfur in schwertmannite–rich accumulations associated with acidified coastal lowlands. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71, 4456–4473.
- Burton, E. D., Bush, R. T., Sullivan, L. A., & Mitchell, D. R. G. (2008). Schwertmannite transformation to goethite via the Fe(II) pathway: Reaction rates and implications for iron–sulfide formation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72, 4551–4564.

- Burton, E. D., Bush, R. T., Johnston, S. G., Sullivan, L. A., & Keene, A. F. (2011). Sulfur biogeochemical cycling and novel Fe–S mineralization pathways in a tidally re-flooded wetland. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75, 3434–3451.
- Bush R. T. (2000). *Iron sulfide micromorphology and mineralogy in acid sulfate soils: their formation and behaviour* [Disertasi tidak diterbitkan]. University of NSW.
- Bush, R. T., & Sullivan, L. A. (1997). Morphology and behaviour of greigite from a Holocene sediment in eastern Australia. *Australian Journal of Soil Research*, 35, 853–861.
- Bush, R. T., Sullivan, L. A., & Lin, C. (2000). Iron monosulfide distribution in three coastal floodplain acid sulfate soils, eastern Australia. *Pedosphere*, 10, 237–245.
- Bush, R. T., McGrath, R., & Sullivan, L. A. (2004). Occurrence of marcasite in an organic-rich Holocene estuarine mud. *Australian Journal of Soil Research*, 42(6), 617–621.
- Butler, I. B., & Rickard, D. (2000). Framboidal pyrite formation via the oxidation of iron (II) monosulfide by hydrogen sulphide. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(15), 2665–2672.
- Butterly, C. R., Baldock, J., & Tang, C. (2010). Chemical mechanisms of soil pH change by agricultural residues Clayton. Dalam R. J. Gilkes & N. Prakongkep (Ed.), *Soil solutions for a changing world. Soil minerals and contaminants* (43–46), 19<sup>th</sup> World Congress of Soil Science.
- Cabezas, A., Gelbrecht, J., Zwirnmann, E., Barth, M., & Zak, D. (2012). Effects of degree of peat decomposition, loading rate and temperature on dissolved nitrogen turnover in rewetted fens. *Soil Biology and Biochemistry*, 48, 182–191.
- Carson, C. D., Fanning, D. S., & Dixon, J. B. (1982). Alfisols and ultisols with acid sulfate weathering features in Texas. Dalam J. A. Kittrick, D. S. Fanning, & L. R. Hossner (Ed.), *Acid sulfate weathering* (127–146). Soil Science Society of America. Special Publication No. 10.
- Catrouillet, C., Davranche, M., Dia, A., Bouhnik–Le Coz, R., Marsac, Pourret, O., & Gruau, G. (2014). Geochemical modeling of Fe(II) binding to humic and fulvic acids. *Chemical Geology*, 372, 109–118.

- Cayuela, M. L., Sinicco, T., & Mondini, C. (2009). Mineralization dynamics and biochemical properties during initial decomposition of plant and animal residues in soil. *Applied Soil Ecology*, 41, 118–127.
- Cheesman, A. W., Turner, B. L., & Reddy, K. R. (2012). Soil phosphorus forms along a strong nutrient gradient in a tropical ombrotrophic wetland. *Soil Science Society of America Journal*, 76, 1496–1506.
- Cheesman, A. W., Turner, B. L., & Reddy, K. R. (2014). Forms of organic phosphorus in wetland soils. *Biogeosciences*, 11, 6697–6710.
- Chimner, R. A. & Ewel, K. C. (2005). A tropical freshwater wetland: II. Production, decomposition, and peat formation. *Wetlands Ecology and Management*, 13, 671–684. DOI: 10.1007/s11273-005-0965.
- Chimner, R. A., Pypker, T. G., Hribljan, J. A., Moore, P. A., & Waddingto, J. M. (2016). Multi-decadal changes in water table levels alter peatland carbon cycling. *Ecosystems*, 20, 1042-1057. DOI: 10.1007/s10021-016-0092-x
- Chen, C., Dynes, J. J., Wang, J., & Sparks, D. L. (2014). Properties of Fe-organic matter associations via coprecipitation versus adsorption. *Environmental Science and Technology*, 8(23), 13751–13759.
- Chu, C., Lin, C., Wu, Y., Wenzhou, L., & Long, L. (2006). Organic matter increase jarosite dissolution in acid sulfate soils under inundation conditions. *Australian Journal of Soil Research*, 44, 11–16.
- Clarkson, B. & Peters, M. (2010). Wetland types. Dalam B. Clarkson, & M. Peters (Ed.), *Wetland restoration: A handbook for New Zealand freshwater system* (26–37). Manaaki Whenua Press.
- Cle'ment, J. C., Shrestha, J., Ehrenfeld, J. G., & Jaffe, P. R. (2005). Ammonium oxidation coupled to dissimilatory reduction of iron under anaerobic conditions in wetland soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 37, 2323–2328.
- Clymo, R. S. (1983). Peat. Dalam A. J. P. Gore (Ed.), *Ecosystems of the world 4A. Mires: swamps, bog, fen and moor* (159–224). Elsevier.
- Cook, F. J., Dobos, S. K., Carlin, G. D., & Millar, G. E. (2004). Oxidation rate of pyrite in acid sulfate soils: *In situ* measurements and modelling. *Australian Journal of Soil Research*, 42, 499–507.

- Cook, F. J., Hicks, W. S., Gardner, E. A., Carlinà G. D., & Froggatt, D. W. (2000). Export of acidity in drainage water from acid sulphate soils. *Marine Pollution Bulletin*, 41(7–12), 319–326.
- Costello, L. K. (2012). *Effects of water level fluctuations on phosphorus, iron, sulfur, and nitrogen cycling in shallow freshwater ecosystems* [Disertasi tidak diterbitkan]. Michigan State University.
- Creep, N. L., Hicks, W. S., Shand, P., & Fitzpatrick, R. W. (2015). Geochemical processes following freshwater reflooding of acidified inland acid sulfate soils: An in situ mesocosm experiment. *Chemical Geology*, 411, 200–214.
- Cruells, M., & Roca, A. (2022). Jarosites: formation, structure, reactivity and environmental. *Metals*, 12(5), 802.
- Cusell, C., Kooijman, A., Van Wirdum, G., Geurts, J. J. M., Van Loon, E. E., Kalbitz, K., & Lamers, L. P. M. (2014). Filtering fens: Mechanisms explaining phosphorus limited hotspots of biodiversity in wetlands adjacent to heavily fertilized areas. *Science of the Total Environment*, 481, 129–141.
- Dang, T., Mosley, L. M., Fitzpatrick, R. W., & Marschner, P. (2015). Organic materials differ in ability to remove protons, iron and aluminium acid sulfate soil drainage water. *Water, Air and Soil Pollution*, 226, 357.
- Dang, T., Mosley, L. M., Fitzpatrick, R. W., & Marschner, P. (2016). Organic materials retain high proportion of protons, iron and aluminium from acid sulphate soil drainage water with little subsequent release. *Environmental Science Pollution Research*, 23, 23582–23592. DOI 10.1007/s11356-016-7597-x.
- Daoud, J., & Karamanev, D., (2006). Formation of jarosite during Fe<sup>2+</sup> oxidation by *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *Minerals Engineering*, 19(9), 960–967.
- Dargie, G. C., Lewis, S. L., Lawson, I. T., Mitchard, E. T. A., Page, S. E., Bocko, Y. E., & Ifo, S. A. (2017). Age, extent and carbon storage of the Central Congo Basin peatland complex. *Nature*, 542, 86–90.
- Dariah, A, Marwanto, S., & Agus, F. (2013). Root and peat based CO<sub>2</sub> emission from oil palm plantations. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 19, 831–843.

- Das, A., Layek, J., Ramkrushna, G. I., Patel, D. P., Choudhury, B. U., Chowdhury, S., & Ngachan, S. V. (2014). Raised and sunken bed land configuration for crop diversification and crop and water productivity enhancement in rice paddies of the north eastern region of India. *Paddy Water Environ.* DOI 10.1007/s10333-014-0472-9
- Das, S. K., & Das, S. K. (2015). Acid sulphate soil: management strategy for soil health and productivity. *Pop. Kheti*, 3(2), 2–7.
- Davison, W., Lishman, J. P., & Hilton, J. (1985). Formation of pyrite in freshwater sediments; implication for C/S ratios. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49, 1615–1620.
- Davranche, M., Dia, V., Fakhri, M., Nowack, B., Gruau, G., Ona-nguema, G., Petitjean, P., Martin, S., & Hochreutener, R. (2013). Organic matter control on the reactivity of Fe(III)-oxyhydroxides and associated As in wetland soils: A kinetic modeling study. *Chemical Geology*, 335, 24–35.
- Dear, S. E., Ahern, C. R., O'Brien, L. E., Dobos, S. K., McElnea, A. E., Moore, N. G., & Watling, K. M. (2014). Queensland acid sulfate soil technical manual: Soil management guidelines. Brisbane: Department of Science, Information Technology, Innovation and the Arts, Queensland Government.
- De-Campos, A. B., Mamedov, A. I., & Huang, C. H. (2009). Short-term reducing conditions decrease soil aggregation. *Soil Science Society of America Journal*, 73, 550–559.
- De Datta, S. K. (1981). *Principles and practices of rice production*. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Dent, D. L. (1986). *Acid sulphate soils. A baseline for research and development*. ILRI. Wageningen. Publ. No. 39.
- Dent, D. L. (1992). Reclamation of acid sulphate soils. Dalam R. Lal, & B.A. Stewart. (Ed.) *Soil Restoration. Advances in Soil Science*, vol 17. Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-4612-2820-2\\_4](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-2820-2_4)
- Dent, D. L. & Pons, L. J. (1995). A world perspective on acid sulphate soils. *Geoderma*, 67, 263–276.
- Department of Environment Regulation, Australia. (2015a). *Identification and investigation of acid sulfate soils and acidic landscapes*. Department of Environment Regulation 168 St Georges Terrace, Perth, Western Australia.

- Department of Environment Regulation, Australia. (2015b). *Treatment and management of soil and water in acid sulfate soil landscapes*. Department of Environment Regulation 168 St Georges Terrace, Perth, Western Australia.
- Departemen Permukiman dan Pengembangan Wilayah-Dirjen. (2000). *Pengembangan perdesaan proyek irigasi Jawa Tengah*, Sistem irigasi – seri modul IR 1, Semarang.
- Departemen Pertanian. (1998). *Pengembangan daerah rawa*. Direktorat Jenderal Perkebunan, Departemen Pertanian.
- De-Yin, H., Zhuang, L., Wei-Dong, C., Xu, Z., Shun-Gui, W., & Fang-Bai, L. (2010). Comparison of dissolved organic matter from sewage sludge and sludge compost as electron shuttles for enhancing Fe(III) bioreduction. *Journal of Soils and Sediments*, 1, 722–729.
- Dhanya, K. R., & Gladis, R. (2017). Acid sulfate soils–Its characteristics and nutrient dynamics. *An Asian Journal of Soil Science*, 12(1), 221–227.
- Diemont, W. H., & Soepardi. (1987). Genesis of Indonesian lowland peats and possibilities for development. Dalam *Symposium Lowland development in Indonesia* (463–468). ILRI.
- Diemont, W. H., & Pons, L. J. (1992). A preliminary note on peat formation and gleying in the Mahakam inland floodplain, East Kalimantan, Indonesia. Dalam B. Y. Aminuddin, S. L. Tan, B. Aziz, J. Samy, Z. Salmah, H. S. Petimah, & S. T. Choo (Ed.), *Tropical Peat. Proceedings of the International Symposium on Tropical Peatland* (74–81). MARDI.
- Diemont, W. H., Rijksen, H. D., & Silvius, M. J. (1992). Development and conservation of lowland peat areas in Indonesia: How and where? Dalam B. Y. Aminuddin, S. L. Tan, B. Aziz, J. Samy, Z. Salmah, H. Siti Petimah, & S. T. Choo (Ed.), *Tropical Peat. Proceedings of the International Symposium on Tropical Peatland* (169–176). MARDI.
- Dijk, J. V., Didden, W. A. M., Kuenen, F., Bodegom, P .M. V., Verhoef, H. A., & Aerts, R. (2009). Can differences in soil community composition after peat meadow restoration lead to different decomposition and mineralization rates? *Soil Biology and Biochemistry*, 41, 1717–1725.
- Dimitriu, P. A., Lee, D., & Grayston, S. J. (2010). An evaluation of the functional significance of peat microorganisms using a reciprocal transplant approach. *Soil Biology and Biochemistry*, 42, 65–71.

- Dinas Pertanian Tanaman Pangan dan Hortikultura Provinsi KalSel. (2013). *Laporan tahunan dinas pertanian TPH tahun 2013*. Pemprov Kalimantan Selatan. Dinas Pertanian Tanaman Pangan dan Hortikultura.
- Direktorat Jenderal Bina Produksi Hortikultura. (2001). *Buku deskripsi varietas tanaman hortikultura*. Ditjen Bina Produksi Hortikultura.
- Direktorat Pembinaan SMK. (2008). *Pembibitan tanaman perkebunan seri, agribisnis tanaman perkebunan*. Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia.
- Direktorat Rawa & Pantai. (2009). *Buku Pengelolaan Rawa di Indonesia*. Dirjen Sumber Daya Air, Dir Rawa dan Pantai. Kementerian Pekerjaan Umum.
- Dobermann, A., & Fairhurst, T. (2000). *Rice; nutrient disorders and nutrient management*. IRRI.
- Dohong, S. (1999). *Peningkatan produktivitas tanah gambut yang disawahkan dengan pemberian bahan amelioran tanah mineral berkadar besi tinggi* [Disertasi tidak diterbitkan]. Institut Pertanian Bogor.
- Dohong, A. (2003). Pemanfaatan lahan gambut untuk kegiatan pertanian hortikultura: belajar dari pengalaman petani Desa Kalampangan, Kalimantan Tengah. *Warta Konservasi Lahan basah*.
- Dommain, R., Couwenberg, J., & Joosten, H. (2010). Hydrological self-regulation of domed peatlands in south-east Asia and consequences for conservation and restoration. *Mires and Peat*, 6(5), 1–17.
- Dong, N. M., Brandt, K. K., Sørensen, J., Hung, N. N., Hach, C. V., Tan, P. S., & Dalsgaard, T. (2012). Effects of alternating wetting and drying versus continuous flooding on fertilizer nitrogen fate in rice fields in the Mekong Delta, Vietnam. *Soil Biology and Biochemistry*, 47, 166–174.
- Doye, I., & Duchesne, J. (2003). Neutralisation of acid mine drainage with alkaline industrial residues: laboratory investigation using batch-leaching tests. *Applied Geochemistry*, 18(8), 1197–1213.
- Driessen, P. M., & Rochimah, L. (1976). The physical of lowland peats from Kalimantan. Dalam *Peat and Podsolik Soils and Their Potential for Agriculture in Indonesia* (56–73). Proceeding ATA 106 Midterm Seminar, Soil Research Institute, Bogor.

- Driessen, P. M. (1978). Peat soils. Dalam *Soil and Rice* (763–779). IRRI.
- Dugan, P. J. (1990). *Wetland Conservation*. The World Conservation Union.
- Dwiyono, A., & Rachman, S. (1996). Management and conservation of the tropical peat forest of Indonesia. Dalam E. Maltby, C. P. Immerzi, & R. J. Safford (Ed.), *Proceedings of a Workshop on integrated planning and management of tropical lowland peatlands; Tropical lowland peatlands of Southeast Asia* (103–118). IUCN.
- Eftekhari, N., Kargar, M., Zamin, F. R., Rastakhiz, N., & Manafi, Z. (2020). A review on various aspects of jarosite and its utilization potentials. *Annales de Chimie Science des Materiaux*, 44(1), 43–52. <https://doi.org/10.18280/acsm.440106>
- Eltantawy, M., & Baverez, M. (1978). Structural study of humic acids by X-ray, electron spin resonance, and infrared spektroskopy. *Soil Science Society of America Journal*, 42, 903–905.
- Emsens, W. J., Aggenbach, C. J. S., Smolders, A. J. P., Zak, D., & van Diggelen, R. (2017). Restoration of endangered fen communities: the ambiguity of iron phosphorus binding and phosphorus limitation. *Journal of Applied Ecology*, 54(6), 1755–1764. DOI: 10.1111/1365-2664.12915.
- Euroconsult. (1984). *Preliminary assessment of peat development potential final report Kingdom of Netherlands*. Affairs-Development Co-operation (Asia) Departement, The Netherlands.
- Euroconsult (1986). *Nation-wide study of coastal and near-coastal swamps land in Sumatra, Kalimantan and Irian Jaya*. Executive Report Dir. Gen. Of Water Res. Dev. Min of Public Work, Jakarta and Euroconsult. Arnhem/BIEC.
- EPA (Environmental Protection Agency). (2012). *A citizen's guide to permeable reactive barriers*. <https://www.epa.gov/remedytech/citizens-guide-permeable-reactive-barriers>. United States Environmental Protection Agency. EPA 542-F-12-015.
- Essington, M. E. (2015). *Soil and Water Chemistry: An Integrative Approach*. 2<sup>nd</sup> edition. CRC Press.

- Fageria, N. K., Carvalho, G. D., Santos, A. B., Ferreira, E. P. B., & Knupp, A. M. (2011). Chemistry of lowland rice soils and nutrient availability. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 42, 1913–1933.
- Fahmi, A., Nurzakiah, S., & Purnomo, E. (2005). Evaluasi teknik persiapan contoh tanah dan metode analisis tanah untuk pengukuran fosfat di lahan pasang surut. *Jurnal Tanah Tropika*, 10(1), 85–90.
- Fahmi, A. (2008). *Pengaruh pemberian bahan organik jerami padi terhadap kehilangan fosfat dan ferro di tanah sulfat masam* [Tesis tidak diterbitkan]. Universitas Gadjah Mada.
- Fahmi, A., Radjaguguk, B., & Purwanto, B. H. (2009). Kelarutan fosfat dan ferro pada tanah sulfat masam yang diberi bahan organik jerami padi. *Jurnal Tanah Tropika*, 14(2), 119–125.
- Fahmi, A., Radjaguguk, B., Purwanto, B. H., & Hanudin, E. (2010). The role of peat layers on iron dynamics in peatlands. *Jurnal Tanah Tropika*, 15(3), 195–201.
- Fahmi, A. (2011). Dinamika jerapan permukaan kompleks Fe oksida-senyawa humat. *Jurnal Sumber daya Lahan*, 5(2), 75–82.
- Fahmi, A. (2012). *Saling tindak tanah gambut dan substratum bahan sulfidik serta pengaruhnya terhadap sifat kimia tanah* [Disertasi tidak diterbitkan]. Universitas Gadjah Mada.
- Fahmi, A., Radjaguguk, B., & Purwanto, B. H. (2012). The Leaching of iron and loss of phosphate in acid sulphate soil due to rice straw and phosphate fertilizer application. *Jurnal Tanah Tropika*, 17(1), 19–24.
- Fahmi, A. & Sarwani, M. (2013). Does rice straw application reduce iron concentration and increase rice yield in acid sulphate soil. Dalam E. Husen, D. Nursyamsi, M. Noor, A. Fahmi, Irawan, & I. G. P. Wigena (Eds.), *Proceeding of international workshop on sustainable management of lowland for rice production* (107–114). Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian.
- Fahmi, A., Radjaguguk, B., Purwanto, B. H., & Hanudin, E. (2013). Peran gambut bagi kandungan nitrogeN-total tanah di lahan rawa. *Jurnal Berita Biologi*, 12(2), 223–229.

- Fahmi, A., Alwi, M. Hairani, A. Ramadhani, F., & Nurita. (2013). *Validasi decision support system pemupukan padi lahan rawa pasang surut*. Laporan Akhir Penelitian. Balai Penelitian Pertanian Lahan Rawa.
- Fahmi, A., Radjagukguk, B., & Purwanto, B. H. (2014). Interaction of peat soil and sulphidic material substratum: role of peat layer and groundwater level fluctuations on phosphorus concentration, *Jurnal Tanah Tropika*, 19(3), 161–169.
- Fahmi, A., Susilawati, A., & Rachman, A. (2014). Influence of height waterlogging on soil physical properties of potential and actual acid sulphate soils. *Jurnal Tanah Tropika*, 19(2), 56–61.
- Fahmi, A., Ramadhani, F., & Alwi, M. (2015). Decision support system (DSS) pemupukan padi lahan rawa pasang surut. Dalam P. Rejekiningrum, C. Tapakresnanto, E. Suryani, I. Khairullah, A. Wihardjaka, L. R. Widowati, & I. W. Suastika (Ed.), *Prosiding seminar nasional sistem informasi dan pemetaan sumber daya lahan mendukung swasembada pangan* (21–30). Buku III–Teknologi Pengelolaan Lahan. Balai Besar Litbang Sumber daya Lahan Pertanian, Bogor.
- Fahmi, A. (2017). *Penelitian perbaikan teknologi peningkatan produktivitas lahan gambut untuk meningkatkan produksi tanaman cabai dan bawang merah* [Laporan Tahunan]. Balai Penelitian Pertanian Lahan Rawa.
- Fahmi, A., & Radjagukguk, B. (2018). Peranan lapisan gambut pada dinamika fraksi besi di lahan pasang surut. Dalam S. Sabiham, Y. Sulistyanto, S. Dohong, I. P. Kulu, Y. A. Nion, K. Kusin, E. Murni, & N. Wulandari (Ed.), *Prosiding seminar nasional HGI 2017 “Harmonisasi pemanfaatan dan konservasi gambut indonesia melalui pengelolaan lahan secara bertanggung jawab”* (127–131).
- Fahmi, A., & Khairullah, I. (2018). Ameliorasi tanah sulfat masam untuk budidaya padi. Dalam Masganti, R. S. Simatupang, M. Alwi, E. Maftuah, M. Noor, Mukhlis, H. Sosiawan, & M. A. Susanti (Ed.), *Inovasi teknologi lahan rawa: mendukung kedaulatan pangan* (36–59). Rajawali Press.
- Fahmi, A., Alwi, M., & Nursyamsi, D. (2018). The role of land inundation type of tidal swamp land on the chemical properties of potential acid sulphate soils under fertilizer and lime application. *Jurnal Tanah Tropika*, 23(2), 55–64.

- Fahmi, A., Nurzakiah, S., & Susilawati, A. (2019). The interaction of peat and sulphidic material as substratum in wetland: ash content and electrical conductivity dynamic. *International Seminar and Congress of Indonesian Soil Science Society 2019*, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 393 (2019) 012045. IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/393/1/012045
- Fanning, D. S. (2006). Acid sulfate soils. Dalam R. Lal (Ed.), *Encyclopedia of soil science* (11–13). Vol. 1, 2<sup>nd</sup> edition. Taylor & Francis.
- Fanning, D. S., & Burch, S. N. (1997). Acid sulphate soils and some associated environmental problems. *Advances Geoecology*, 30, 145–158.
- Fanning, D. S., Rabenhorst, M. C., Burch, S. N., Islam, K. R., & Tangren, S. A. (2002). Sulfides and sulfates. Dalam J. B. Dixon, & D. G. Schulze (Ed.), *Soil mineralogy with environmental implications* (229–260). Soil Science Society of America Book series 7.
- Fanning, D. S., & Burch, S. N. (2006). Sulfate and sulfide minerals. Dalam R. Lal (Ed.), *Encyclopedia of Soil Science* (1714–1716). Vol. 1, 2<sup>nd</sup> edition. Taylor & Francis.
- Fanning, D. S., Rabenhorst, M. C., Balduff, D. M., Wagner, D. P., Orr, R. S., & Zurheide, P. K. (2010). An acid sulfate perspective on landscape/seascape soil mineralogy in the U.S. Mid-Atlantic region. *Geoderma*, 154, 457–464.
- Fanning, D. S., Rabenhorst, M. C., & Fitzpatrick, R. W. (2017). Historical developments in the understanding of acid sulfate soils. *Geoderma*, 308, 191–206.
- FAO. (2014). Towards climate-responsible peatlands management. Dalam R. Biancalani & A. Avagyan (Ed.), *Mitigation of climate change in agriculture series 9*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Fauzi, Y., Widyastuti, Y. E., Satyawibawa, I., & Hartono, R. (2006). *Kelapa sawit: Budidaya, pemanfaatan hasil dan limbah, analisis usaha dan pemasaran*. Penebar Swadaya.
- Fiedler, S., Vepraskas, M. J., & Richardson, J. L. (2007). Soil redox potential: Importance, field measurements, and observations. Dalam D. L. Sparks (Ed.), *Advances in agronomy* (1–54). Vol. 94. Elsevier.

- Firmansyah, M. A., Yuliani, N., Nugroho, W. A., & Bhermana, A. (2012). Kesesuaian lahan pasang surut untuk tanaman karet di tiga desa eks. PLG. Kabupaten Pulang Pisau, Kalimantan Tengah. *Jurnal Lahan Suboptimal*, 1(2), 159–167.
- Fitzpatrick, R. W., Fritsch, E., & Self, P. G. (1996). Interpretation of soil features produced by ancient and modern processes in degraded landscapes: V. Development of saline sulfidic features in non-tidal seepage areas. *Geoderma*, 69, 1–29.
- Fitzpatrick, R. W., Merry, R. H., Williams, J., White, I., Bowman G., & Taylor. G. (1998). *Acid sulfate soil assessment: Coastal, inland and minespoil conditions*. National Land and Water Resources Audit. Methods Paper, 18 p.
- Fitzpatrick, R. W., Thomas, B. P., Merry, R. H., & S. Marvanek. (2008). *Acid sulfate soils in barker inlet and gulf st. vincent priority region*. CSIRO Land and Water Science Report 35/08. 22 p.
- Fitzpatrick, R. W. & Shand, P. (2008). Inland acid sulfate soils: Overview and conceptual models. Dalam R. W. Fitzpatrick, & P. Shand (Ed.), *Inland acid sulfate soil systems across Australia* (6–74). CRCLEME (Corporate Research Centre for Landscape Environments and Mineral Exploration).
- Fitzpatrick, R. W., Shand, P., & Merry, R. H. (2009). Acid sulfate soils. Dalam J. T. Jennings (Ed.), *Natural history of the Riverland and Murraylands* (65–111). Royal Society of South Australia (Inc.).
- Fitzpatrick, R. W., Grealish, G. P., Shand, B., Thomas, P., R., Merry, H., & Creeper, N. L. (2009). *Preliminary risk assessment of acid sulfate soil materials in the currency creek, Finniss River, Tookayerta Creek and Black Swamp region, South Australia*. CSIRO Land and Water. Science Report 01/09. 45 p.
- Fitzpatrick, R. W., Shand, P., & Mosley, L. M. (2017). Acid sulfate soil evolution models and pedogenic pathways during drought and reflooding cycles in irrigated areas and adjacent natural wetlands. *Geoderma*, 308, 270–290.
- Fraser, C. J. D., Roulet, M. T., & Lafteur, M. (2001). Ground water flow patterns in a large peatland. *Hydrology Journal*, 242, 142–154.

- Freese, D., Van der Zee, S. E. A. T. M., & Van Riemsdijk, W. H. (1992). Comparison of different models for phosphate sorption as a function of the iron and aluminium oxides of soils. *Journal Soil Science*, *43*, 729–738.
- Gao, S., Tanji, K. K., Scardaci, S. C., & Chow, A. T. (2002). Comparison of redox indicators in a paddy soil during rice-growing season. *Soil Science Society of America Journal*, *66*, 805–817.
- Gasparatos, D., Massas, I., & Godelitsasm, A. (2019). Fe-Mn concretions and nodules formation in redoximorphic soils and their role on soil phosphorus dynamics: Current knowledge and gaps. *Catena*, *182*, 104106.
- Golab, A. N., Peterson, M. A., & Indraratna, B. (2009). Selection of permeable reactive barrier materials for treating acidic groundwater in acid sulphate soil terrains based on laboratory column tests. *Environmental Earth Sciences*, *59*, 241–254. DOI 10.1007/s12665-009-0022-8
- Gotoh, S., & Patrick, Jr. W. H. (1976). Transformation of iron in a waterlogged soil as influenced by redox potential and pH. *Soil Science Society of America Proceedings*, *38*, 66–71.
- Graham, S. A., Craft, C. B., McCormick, P. V., & Aldous, A. (2005). Forms and accumulation of soil P in natural and recently restored peatlands-Upper Klamath Lake, Oregon, USA. *Wetlands*, *25*(3), 594–606.
- Grave, M., Eick, M. J., & Grossl, P. R. (2001). Adsorption of arsenate (V) and arsenite (III) on goetite in the presence and absence of dissolved organic carbon. *Soil Science Society of America Journal*, *65*, 1680–1687.
- Gruba, P., & Mulder, J. (2015). Tree species affect cation exchange capacity (CEC) and cation binding properties of organic matter in acid forest soils. *Science of the Total Environment*, *511*, 655–662.
- Gu, S., Gruau, G., Dupas, R., Petitjean, P., Lic, Q., & Pinay, G. (2019). Respective roles of Fe-oxyhydroxide dissolution, pH changes and sediment inputs in dissolved phosphorus release from wetland soils under anoxic conditions. *Geoderma*, *338*, 365–374.
- Guzman, G., Alcantara, E., & Barro´n, V. (1994). Phytoavailability of phosphate adsorbed on ferrihydrite, hematite, and goethite. *Plant and Soil*, *159*, 219–225.

- Hairani, A., & Susilawati, A. (2013). Changes of soil chemical properties during rice straw decomposition in different type of acid sulphate soil. *Jurnal Tanah Tropika*, 18(2), 99–103.
- Hairani, A., & Noor, M. (2021). Water management for increase rice production in the tidal swampland of Kalimantan, Indonesia: constraints, limitedness and opportunities. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 724 (2021) 012021 IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/724/1/012021. 8 pp
- Halim, A. (1987). *Pengaruh pencampuran tanah mineral dan basa dengan tanah gambut pedalaman Kalimantan Tengah dalam budidaya tanaman kedelai* [Disertasi tidak diterbitkan]. Institut Pertanian Bogor.
- Hall, S. J., & Silver, W. L. (2013). Iron oxidation stimulates organic matter decomposition in humid tropical forest soils. *Global Change Biology*, 19(9), 2804–2813.
- Hanhart, K., & Ni, D. V. (1993). Water management of the rice field at Hoa An, Mekong Delta, Vietnam. Dalam D. L. Dent & M. E. F. Van Mesvoort (Ed.), *Selected papers of the Ho Chi Minh City symposium on acid sulphate soils* (161–176). ILRI, Publication No. 53.
- Haraguchi, A., Kojima, H., Hasegawa, C., Takahashi, Y., & Iyobe, T. (2002). Decomposition of organic matter in peat soil in a minerotrophic mire. *European Journal of Soil Biology*, 38, 89–95.
- Haraguchi, A. (2007). Effect of sulphuric acid discharge on the river water chemistry in peat swamp forests in Central Kalimantan, Indonesia. *Limnology*, 8, 175–182.
- Haraguchi, A., Yulintine, L., Wulandari, L., Liana, T., & Welsiana, S. (2008). Acid discharge from the tropical peat swamp forest and its impact on local people—A review. Dalam C. Farrel & J. Feehan (Ed.), *Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Peat Congress, After wise use—the future of peatlands* (199–201). Vol. I. Tullamore, Ireland.
- Hardjowigeno, S. (1986). *Sumber daya fisik wilayah dan tata guna lahan: Histosol*. Fakultas Pertanian Institut Pertanian Bogor.
- Harmsen, K., & van Breemen, N. (1975). Translocation of iron in acid sulfate soils: II. production and diffusion of dissolved ferrous iron. *Soil Science Society of America Journal*, 39, 1148–1153.

- Harsono, E. (2010). *Optimalisasi pemanfaatan lahan arwa pasang surut dengan implementasi pola aliran satu arah*. Kuliah Umum Program Magister Teknik. Fakultas Teknik Sipil. Univ. Lambung Mangkurat. Banjarmasin, 12 Juni 2010.
- Hartatik, W., Suriadikarta, D. A., & Widjaja-Adhi, I. P. G. (1995). Pengaruh ameliorasi dan pemupukan terhadap tanaman kedelai pada lahan gambut Kalimantan Barat. *Risalah Seminar Hasil Penelitian Tanah dan Agroklimat* No.2. Puslittanak. Litbang Pertanian, Deptan.
- Hartsock, J. A., House, M., & Vit, D. H. (2016). Net nitrogen mineralization in boreal fens: a potential performance indicator for Peatland. *Botany*, 1–45.
- Hartatik, W., Idris, K., Sabiham, S., Djuniwati, S., & Adiningsih, J. S. (2004). Pengaruh pemberian fosfat alam dan SP-36 pada tanah gambut yang diberi bahan amelioran tanah mineral terhadap serapan P dan efisiensi pemupukan P. Dalam Prosiding Kongres Nasional VIII HITI. Universitas Andalas.
- Hartatik, W., & Suriadikarta, D. A. (2006). Teknologi pengelolaan hara lahan gambut. Dalam D. S. Ardi, U. Kurnia, H. S. Mamat, W. Hartatik, & D. Setyorini (Ed.), *Karakteristik dan pengelolaan lahan rawa* (151–180). Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumber daya Lahan Pertanian.
- Hartatik, W., Subiksa, I. G. M., & Dariah, A. (2011). Sifat kimia dan fisik tanah gambut. Sifat kimia dan fisika lahan gambut. Dalam N. L. Nurida, A. Mulyani, & F. Agus (Ed.), *Pengelolaan lahan gambut berkelanjutan* (45–56). Balai Penelitian Tanah.
- Harter, R. D., & Naidu, R. (1995). Role of metal–organic complexation in metal sorption by soils. *Advance in Agronomy*, 55, 210–263.
- Hashidoko, Y., Hayashi, H., Hasegawa, T., Purnomo, E., Osaki, M., & Tahara, S. (2006). Frequent isolation of sphingomonads from local rice varieties and other weeds grown on acid sulfate soil in South Kalimantan, Indonesia. *Tropics*, 15(4), 391–395.
- Henneberry, Y. K., Kraus, P. T. E. C., Nico, S., & Horwath, W. R. (2012). Structural stability of coprecipitated natural organic matter and ferric iron under reducing conditions. *Organic Geochemistry*, 48, 81–89.

- Herndon, E. M., Kinsman–Costello L., Duroe, K. A., Mills, J., Kane, E. S., Sebestyen, S. D., Thompson, A. A., & Wullschleger, S. D. (2019). Iron (oxyhydr)oxides serve as phosphate traps in tundra and boreal peat soils. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 227–245. 10.1029/2018JG004776
- Heuscher, S. A., Brandt, C. C., & Jardine, P. M. (2005). Using soil physical and chemical properties to estimate bulk density. *Soil Science Society of America Journal*, 69, 51–56.
- Hicks, W. S., Bowman, G. M., & Fitzpatrick, R. W. (1999). *East Trinity Acid Sulfate Soils Part I: Environmental Hazards*, CSIRO Land and Water.
- Hicks, W. S., Bowman, G. M., & Fitzpatrick, R. W. (2009). Effect of season and landscape position on the aluminium geochemistry of tropical acid sulfate soil leachate. *Australian Journal of Soil Research*, 47, 137–153.
- Hooijer, A., Page, S., Cadadell, J. G., Silavius, M., Kwadijk, J., Wosten, H., & Jauhiainen, J. (2010). Current and future CO<sub>2</sub> emission from drained peatland in Southeast Asia. *Biogeosciences*, 7, 1505–1514.
- Holden, J., Chapman, P. J., & Labadz, J. C. (2004). Artificial drainage of peatlands: hydrological and hydrochemical process and wetland restoration. *Progress in Physical Geography*, 28(1), 95–123.
- Högfors-Rönholm, E., Christel, S., Dalhem, K., Lillhonga, T., Engblom, S., Österholm, P., & Dopson, M. (2018). Chemical and microbiological evaluation of novel chemical treatment methods for acid sulfate soils. *Science of the Total Environment*, 625, 39–49.
- Husson, O., Hanhart, K., Phung, M. T., & Bouma, J. (2000). Water management for rice cultivation on acid sulphate soils in the Plain of Reeds, Vietnam. *Agricultural Water Management*, 46, 91–109.
- Idak, H. (1982). *Perkembangan dan Sejarah Persawahan di Kalimantan Selatan*. Pemerintah Daerah Tingkat I, Kalimantan Selatan.
- Imelda, H., & Soejachmoen, M. H. (2023). Mengenal nationally determined contribution (NDC). Indonesia Research Institute for Carbonization.
- Indraratna, B., Blunden, B., & Nethery, A. (1999). Nature and properties of acid sulphate soils in drained coastal lowland in NSW. *Australian Geomechanics Journal*, 34(1), 61–78.

- Indraratna, B., Golab, A., Glamore, W., & Blunden, B. (2005). Acid sulphate soil remediation techniques on the Shoalhaven River floodplain, Australia. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 38, 129–142.
- Indraratna, B., Regmi, G., Nghiem, L. D., Golab, A., & Banasiak, L. J. (2011). Geo-environmental approaches for the remediation of acid sulphate soil in low-lying floodplains. Dalam J. Han, & D. E. Alzamora (Ed.), *Geo-Frontiers: Advances in Geotechnical Engineering* (856–865).
- Ingvorsen, K., Zehnder, A. J. B., & Jorgensen, B. B. (1984). Kinetic of sulfate and acetate uptake by *delulphobacter postgatei*. *Applied Environmental Microbiology*, 47, 403–408.
- International Union of Soil Sciences (IUSS) Working Group WRB. (2006). *World reference base for soil resources*. World Soil Resources Reports No. 103. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) and International Soil Reference and Information Centre (ISRIC).
- International Union of Soil Sciences (IUSS) Working Group WRB. (2014). *World reference base for soil resources*. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) and International Soil Reference and Information Centre (ISRIC).
- Instruksi Presiden (Inpres) Nomor 5 Tahun 2019 tentang Penghentian Pemberian Izin Baru dan Penyempurnaan Tata Kelola Hutan Alam Primer dan Lahan Gambut. (2019). <https://peraturan.bpk.go.id/Details/116964/inpres-no-5-tahun-2019>
- Irianto, G. (2006). Kebijakan dan pengelolaan air dalam pengembangan lahan rawa lebak. *Prosiding Seminar Nasional Pengelolaan Lahan Rawa Lebak Terpadu*, (9–20). 28–29 Juli 2006. Balittra.
- Ismail, G. I., Alihamsyah, T., Widjaja-Adhi, I. P. G., Suwarno, Herawati, T., Tahir, R., & Sianturi, D. E. (1993). *Sewindu Penelitian Pertanian di lahan rawa*. 1985–1993. Proyek SWAMPS II. Badan Litbang Pertanian. Deptan.

- Ismawi, S. M., Gandaseca, S., & Ahmed, O. H. (2012). Effects of deforestation on soil major macro-nutrient and other selected chemical properties of secondary tropical peat swamp forest. *International Journal of Physical Sciences*, 7(14), 2225–2228.
- Iyobe, T., & Haraguchi, A. (2008). Soil chemical properties of peat sediments polluted by sulphuric acid in tropical peatland, Central Kalimantan, Indonesia. Dalam C. Farrel & J. Feehan (Ed.), *Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Peat Congress, After wise use—the future of peatlands* (100–103). Vol. I.
- James, J., Littke, K., Bonassi, T., & Harrison, R. (2016). Exchangeable cations in deep forest soils: Separating climate and chemical controls on spatial and vertical distribution and cycling. *Geoderma*, 279, 109–121.
- Janjirawuttikul, N., Umitsu, M., & Vijarnsorn, P. (2010). Paleoenvironment of acid sulphate soil formation in the Lower Central Plain of Thailand. *Research Journal of Environmental Science*, 4(4), 336–358.
- Jaenicke, J. (2010). 3D modelling and monitoring of Indonesian peatlands aiming at global climate change mitigation. Dissertasi. Fakultät für Biologie, Ludwig-Maximilians-Universität München. 91 p.
- Janssen, J. A. M., Andriesse, W., Prasetyo, H., & Bregt, A. K. (1992). Guidelines for soil survey in acid sulphate soils in the Humid Tropics. Dalam The main problems considered. AARD and LAWOO, ILRI.
- Jayakumar, S. V. S. (2012). Impact of forest fire on physical, chemical and biological properties of soil: A review. *Proceedings of the international academy of ecology and environmental sciences*, 2(3), 168–176.
- Jayalath, N., Mosley, L., Fitzpatrick, R. W., & Marschner, P. (2016). Type of organic carbon amendment influences pH changes in acid sulfate soils in flooded and dry conditions. *Journal of Soils and Sediments*, 16(2), 518–526.
- Jayalath, N., Fitzpatrick, R. W., Mosley, L. M., & Marschner, P. (2016). Addition of organic matter influences pH changes in reduced and oxidised acid sulfate soils. *Geoderma*, 262, 125–132.
- Johnson, D. B. (2000). Biological removal of sulfurous compounds from inorganic wastewaters. Dalam P. Lens & P. L. Hulshoff (Ed.), *Environmental technologies to treat sulfur pollution: principles and engineering* (175–206). International Association on Water Quality.

- Johnson, D. B. (2003). Chemical and microbiological characteristics of mineral spoils and drainage waters at abandoned coal and metal mines. *Water, Air and Soil Pollution: Focus*, 3, 47– 66.
- Johnston, S. G., Keene, A. F., Bush, R. T., Burton, E. D., Sullivan, L. A., Smith, D., McElnea, A. E., Martens, M. A., & Wilbraham, S. (2009). Contemporary pedogenesis of severely degraded tropical acid sulfate soils after introduction of regular tidal inundation. *Geoderma*, 149, 335–346.
- Johnston, S. G., Bush, R. T., Sullivan, L. A., Burton, E. D., Smith, D., Martens, M. A., McElnea, A. E., Ahern, C. R., Powel, B., Stephens, L. P., Wilbraham, S. T., & Van Heel, S. (2009). Changes in water quality following tidal inundation of coastal lowland acid sulfate soil landscapes. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 81, 257–266.
- Johnston, S. G., Burton, E. D., Bush, R. T., Keene, A. F., Sullivan, L. A., Smith, D., McElnea, A. E., Ahern, C. R., & Powel, B. (2010). Abundance and fractionation of Al, Fe and trace metals following tidal inundation of a tropical acid sulfate soil. *Applied Geochemistry*, 25, 323–335.
- Johnston, S. G., Keene, A. F., Bush, R. T., Burton, E. D., Sullivan, L. A., Isaacson, L. S., McElnea, A. E., Ahern, C. R., Smith, D., & Powell, B. (2011). Iron geochemical zonation in a tidally inundated acid sulfate soil wetland. *Chemical Geology*, 280, 257–270.
- Johnston, S. G., Burton, E. D., Aaso, T., & Tuckerman, G. (2014). Sulfur, iron and carbon cycling following hydrological restoration of acidic freshwater wetlands. *Chemical Geology*, 371, 9–26.
- Jordan, S., Velty, S., & Zeitz, J. (2007). The influence of degree of peat decomposition on phosphorus binding forms in fens. *Mires and Peat*, 2, 1–10.
- Joosten, H., & Clarke, D. (2002). *Wise Use of Mires and Peatlands; Background and principles including framework for decision-making*. International Mires Conservations Group– International Peat Society.
- Joosten, H. (2007). Peatland and carbon. Dalam F. Paris (Ed.), *Assesman on peatlands, biodiversity, and climate change*. Global Environ. Centr. Kuala Lumpur and Wetland Intern.

- Jumberi, A., Sarwani, M., & Koesrini. (2003). *Komponen teknologi pengelolaan lahan dan tanaman untuk meningkatkan produksi dan efisiensi produksi di lahan sulfat masam*. Laporan Akhir. Proyek Pengkajian Teknologi Pertanian Partisipatif. Balai Penelitian Pertanian Lahan Rawa.
- Jumberi, A., Fahmi, A., & Susilawati, A. (2007). Potensi pengelolaan jerami dan penggunaan varietas unggul adaptif sebagai komponen teknologi peningkatan produktivitas tanah sulfat masam. *Prosiding Seminar Nasional Sumber Daya Lahan Pertanian* (305 – 314). Balai Besar Sumber daya Lahan Pertanian. Badan Litbang Pertanian.
- Kaczorek, D., Brümmer, G. W., & Sommer, M. (2009). Content and binding forms of heavy metals, aluminium and phosphorus in bog iron ores from Poland. *Journal Environmental Quality*, 38, 1109–1119.
- Kaila, A., Asam, Z., Koskinen, M., Uusitalo, R., Smolander, A., Kiikkilä, O., Sarkkola, S., O'Driscoll, C., Kitunen, V., Fritze, H., Nousiainen, H., Tervahauta, A., Xiao, L., & Nieminen, M. (2016). Impact of re-wetting of forestry-drained peatlands on water quality—a laboratory approach assessing the release of P, N, Fe, and dissolved organic carbon. *Water, Air and Soil Pollution*. 227–292. DOI 10.1007/s11270-016-2994-9
- Kappler, A., Benz, M., Schink, B., & Brune, A. (2004). Electron shuttling via humic acid in microbial iron (III) reduction in a freshwater sediment. *Microbiology Ecology Journal*, 47, 85–92.
- Karimian, N., Johnston, S. G., & Burton, E. D. (2017). Acidity generation accompanying iron and sulfur transformations during drought simulation of freshwater re-flooded acid sulfate soils. *Geoderma*, 285, 117–131.
- Karimian, N., Johnston, S. G., & Burton, E. D. (2018). Iron and sulfur cycling in acid sulfate soil wetlands under dynamic redox conditions: A review. *Chemosphere*, 197, 803–816.
- Karlsson, T. & Persson, P. (2012). Complexes with aquatic organic matter suppress hydrolysis and precipitation of Fe(III). *Chemical Geology*, 322–323, 19–27.

- Keene, A., Johnston, S. G., Bush, R. T., Sullivan, L. A., & Burton, E. D. (2010). Reductive dissolution of natural jarosite in a tidally inundated acid sulfate soil: geochemical implications. Dalam R. J. Gilkes & N. Prakongkep (Ed.), *Soil solutions for a changing world. Soil minerals and contaminants* (100–103), 19<sup>th</sup> World Congress of Soil Science.
- Keene, A. F., Johnston, S. G., Bush, R. T., Sullivan, L. A., Burton, E. D., McElnea, A. E., Ahern, C. R., & Powell, B. (2011). Effects of hyper-enriched reactive Fe on sulfidisation in a tidally inundated acid sulfate soil wetland. *Biogeochemistry*, 103, 263–279.
- Kendall, M. R., Madden, A. S., Madden, M. E. E., & Hu, Q. (2013). Effects of arsenic incorporation on jarosite dissolution rates and reaction products. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 112, 192–207.
- KEPAS. (1985). *Tidal swamp agro-ecosistem of Southern Kalimantan: Worskshop report on the sustainable intensification of tidal swamplands in Indonesia, The Ford Foundation in Callaoraion with the AARD*. Ministry of Agriculture.
- Khairullah, I., Koesrini, William, E., Fatimah, A., Sutami, Suhaimi, S., Roesmini, H., & Murijani, I. 2003. *Daya toleransi genotipe tanaman di lahan sulfat masam. Laporan Hasil Penelitian*. Balittra.
- Khairullah, I. (2007). Keunggulan dan kekurangan varietas lokal padi pasang surut ditinjau dari aspek budidaya dan genetik. Dalam Mukhlis, M. Noor, A. Supriyo, I. Noor, & R. S. Simatupang (Ed.), *Proseding seminar nasional pertanian lahan rawa: revitalisasi kawasan plg dan lahan rawa lainnya untuk membangun lumbung pangan nasional*. Kuala Kapuas.
- Khairullah, I. (2016). Urgensi pemilihan varietas untuk meningkatkan produktivitas padi di lahan rawa [Presentasi Makalah] Seminar Nasional BBP2TP, BPTP Kalimantan Selatan, Banjarbaru.
- Khairullah, I. (2017). Urgensi pemilihan varietas untuk meningkatkan produktivitas padi di lahan rawa. *Prosiding semnas inovasi teknologi spesifik lokasi; inovasi pertanian spesifik lokasi mendukung kedaulatan pangan berkelanjutan* (234–240). Balai Besar Pengkajian dan Pengembangan Teknologi Pertanian, Balitbangtan.
- Khairullah, I. (2018). Varietas lokal padi pasang surut: adaptabilitas dan akseptabilitas. Dalam Yusriadi (Ed.), *Prosiding Semnas Pemanfaatan Potensi Lokal Spesifik untuk Pertanian Berkelanjutan* (95–106). Lambung Mangkurat University Press.

- Khairullah, I., & Fahmi, A. (2018). Efektivitas pola tanam untuk meningkatkan produktivitas padi di lahan rawa pasang surut. Dalam Masganti, R. S. Simatupang, M. Alwi, E. Maftuah, M. Noor, Mukhlis, H. Sosiawan, & M. A. Susanti (Ed.), *Inovasi teknologi lahan rawa: mendukung kedaulatan pangan* (84–111). Rajawali Press.
- Khan, H. R., Rahman, S., Hussain, M. S., & Adachi, T. (1993). Morphology and characterization of an acid sulfate soil from mangrove floodplain area of Bangladesh. *Soil Physical Condition and Plant Growth*, 68, 25–36.
- Khan, M. H. R., Kabir, S. M., & Bhuiyan, M. M. A. (2016). Effects of selected treatments and techniques for the reclamation and improvement of cheringa acid sulfate soil under rice production in the coastal plain of Cox's Bazar. *Journal of the Asiatic Society of Bangladesh, Science*, 42(1), 29–40.
- Khan, M. H. R. (2017). Nutrition of rice as influenced by reclamation techniques for acid sulfate soil in Cox's Bazar. *Bangladesh Journal of Scientific and Industrial Research*, 52(2), 97–106.
- Kieckbusch, J. J., & Schrautzer, J. (2007). Nitrogen and phosphorus dynamics of a re-wetted shallow-flooded peatland. *Science of the Total Environment*, 380, 3–12.
- Kinsman–Costello, L. (2012). *Effects of water level fluctuations on phosphorus, iron, sulfur, and nitrogen cycling in shallow freshwater ecosystems* [Disertasi tidak diterbitkan]. Michigan State University.
- Kirk, G. (2004). *The biogeochemistry of submerged soils*. John Willey and Sons.
- Kolka, R. K., Grigal, D. F., Nater, E. A., & Verry, E. S. (2001). Hydrologic cycling of mercury and organic carbon in a forested upland–bog watershed. *Soil Science Society of America Journal*, 65, 897–905.
- Kölbl, A., Marschner, P. Fitzpatrick, R. W., Mosley, L. M., & Kögel–Knabner, I. (2017). Linking organic matter composition in acid sulfate soils to pH recovery after re–submerging. *Geoderma*, 208, 350–362.
- Kolling, M., Ebbert, M., & Schultz, H. D. (1999). A novel approach to the presentation of pe/pH diagram. Dalam J. Schuring, H. D. Schultz, W. R. Fischer, J. Botcher, & W. H. M. Duijnisvelt (Ed.), *Redox; Fundamentals, processes and applications* (55–63). Springer.

- Könönen, M., Jauhiainen, J., Laiho, R., Kusin, K., & Vasander, H. (2015). Physical and chemical properties of tropical peat under stabilised land uses. *Mires and Peat*, 16(8), 1–13.
- Konsten, C. J. M., Suping, S., Aribawa, I. B., & Widjaja-Adhi, I. P. G. (1990). Chemical processes in acid sulphate soils in Pulau Petak, South and Central Kalimantan, Indonesia. Dalam *Papers workshop on acid sulphate soils in the humid tropics* (109–135). AARD and LAWOO.
- Konsten, C. J. M., van Breemen, N., Suping, S., Aribawa, I. B., & Groenberg, J. E. (1994). Effects of Flooding on pH of Rice-Producing, Acid Sulfate Soils in Indonesia. *Soil Science Society of America Journal*, 58, 871–883.
- Kooijman A. M., Cusell, C., Hedenäs, L., Lamers, L. P. M., Mettrop, I. S., & Neijmeijer, T. (2020). Re-assessment of phosphorus availability in fens with varying contents of iron and calcium. *Plant and Soil*, 447, 219–239.
- Kraal, P., Burton, E. D., & Bush, R. T. (2013). Iron monosulfide accumulation and pyrite formation in eutrophic estuarine sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 122, 75–88.
- Krachler, R., Jirsa, F., & Ayromlou, S. (2005). Factors influencing the dissolved iron input by river water to the open ocean. *Biogeoscience*, 2, 311–315.
- Krisnawati, H., Adinugroho, W. C., Imanuddin, R., Suyoko, W. C. J., & Volkova, L. (2021). Carbon balance of tropical peat forests at different fire history and implications for carbon emissions. *Science Total Environment*, 779, 146365. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146365>.
- Kukkadapu, R. K., Zachara, J. M., Fredrickson, J. K., & Kennedy, D. W. (2004). Biotransformation of two-line silica-ferrihydrite by a dissimilatory Fe (III)-reducing bacterium: formation of carbonate green rust in the presence of phosphate. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68, 2799–2814.
- Kull, A., Kull, A., Jaagus, J., Kuusemets, V., & Mender, U. (2008). The effects of fluctuating climatic condition and weather event on nutrient dynamics in narrow mosaic riparian peatland. *Boreal Environment Research*, 13, 243–263.

- Kurnain, A., Notohadikusumo, T., Radjagukguk, B., & Hastuti, S. (2001). Peat soil properties related to degree of decomposition under different land use systems. *International Peat Journal*, 11, 67–77.
- Kurnain, A. (2005). *Dampak kegiatan pertanian dan kebakaran atas watak gambut ombrogen* [Disertasi tidak diterbitkan]. Universitas Gadjah Mada.
- Kusel, K., Blothe, M., Schulze D., Reiche, M., & Drake, H. L. (2008). Microbial reduction of iron and porewater biogeochemistry in acidic peatlands. *Biogeosciences*, 5, 1537–1549.
- Kustantini, D. (2012). Peningkatan produktifitas dan pendapatan petani melalui penggunaan pola tanam tumpang sari pada produksi benih kapas. Balai Besar Perbanihan dan Proteksi Tanaman Perkebunan (BBP2TP).
- Kyuma, K. (2004). *Paddy soil science*. Kyoto University Press; Trans Pacific Press.
- Lambert, K. (1995). *Physico-chemical characterisation of lowland tropical peat soil* [Disertasi tidak diterbitkan]. RUG.
- Lamontagne, S., Hicks, W. S., Fitzpatrick, R. W., & Rogers, S. (2004). Survey and description of sulfidic materials in wetlands of the Lower River Murray floodplains: Implications for floodplain salinity management. CSIRO Land and Water Technical Report 28/0. CRC LEME Open File Report 165.
- Lappalainen, E. (1996). General Riview on World Peatland and Peat Resources. Dalam E. Lappalainen (ed.), *Global Peat Resources* (53–56). IPS-GSE.
- Lehmann, J., & Rondon, M. (2006). Biochar soil management on highly weathered soils in the humid tropics. Dalam N. Uphoff, A. S. Ball, E. Fernandes, H. Herren, O. Husson, M. Laing, C. Pretty, P. Sanchez, & N. Sanginga (Ed.), *Biological approaches to Sustainable Soil Systems* 517–530. Taylor & Francis.
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2009). *Biochar for environmental management. Science and Technology*. Earthscan.

- Lestari, Y., Noor, M., & Berlian, E. (2011). Pemberian paket amelioran alternatif pada cabai merah (*Capsicum Annum*) di lahan gambut dalam, Kalimantan Tengah. Dalam B. Kartiwa (Ed.), *Proseding Seminar Nasional Sumber daya Lahan* (39–52). Balai Besar Litbang SDLP.
- Lestari, Y., Noor, M., & Simatupang, R. S. (2011). Produktivitas lahan gambut pasang surut tipe C yang diberi bahan amelioran dan pupuk mikro pada budidaya tomat. Dalam B. Kartiwa (Ed.), *Proseding Seminar Nasional Sumber daya Lahan* (301–314). Balai Besar Litbang SDLP.
- Lestari, Y., Noor, M., & Rosmini, H. (2008). Pengaruh ameliorasi terhadap sifat kimia tanah dan hasil tomat pada lahan gambut. Dalam M. Noor (Ed.), *Proseding Seminar Nasional Pengembangan Lahan Rawa* (242–252). Balai Besar Litbang SDLP – BAPPEDA Prov. Kalsel.
- Lestari, Y., Humaire, R., & Simatupang, R. S. (2007). Pengaruh ameliorasi terhadap tanaman lobak pada tanah gambut pasang surut Kalimantan tengah. Dalam Mukhlis, M. Noor, A. Supriyo, I. Noor, & R. S. Simatupang (Ed.), *Proseding seminar nasional pertanian lahan rawa: revitalisasi kawasan PLG dan lahan rawa lainnya untuk membangun lumbung pangan nasional*. Kuala Kapuas.
- Lestari, Y., Noor, M., & Berlian, E. (2011). Pemberian paket amelioran alternatif pada cabai merah (*Capsicum Annum*) di lahan gambut dalam, Kalimantan Tengah. Dalam B. Kartiwa (Ed.), *Proseding Seminar Nasional Sumber daya Lahan* (39–52). Balai Besar Litbang SDLP.
- Lestari, Y., Noor, M., & Simatupang, R. S. (2011). Produktivitas lahan gambut pasang surut tipe C yang diberi bahan amelioran dan pupuk mikro pada budidaya tomat. Dalam B. Kartiwa (Ed.), *Proseding Seminar Nasional Sumber daya Lahan* (301–314). Balai Besar Litbang SDLP.
- Li, Y., Yu, S., Strong, J., & Wang, H. (2012). Are the biogeochemical cycles of carbon, nitrogen, sulfur, and phosphorus driven by the “FeIII–FeII redox wheel” in dynamic redox environments? *Journal of Soils and Sediments*, 12, 683–693.
- Li, Q., Wang, X., Kan, D., Bartlett, R., Pinay, G., Ding, Y., & Ma, W. (2012). Enrichment of phosphate on ferrous iron phases during bio-reduction of ferrihydrite. *International Journal of Geosciences*, 3, 314–320.

- Limin, S. H., Rieley, J. O., Page, S. E., & Yunsiska, E. (2007). Peat thickness, type of minerals in the bottom peat layer and hydrology status should be taken into account when utilizing tropical peatland for agricultural purposes. Dalam H. Wosten & B. Radjagukguk (Ed.), *The role of tropical peatlands in global changes process. open science meeting 2005. science and society: new challenges and oppurtunities*. ALTEERRA–Wageningen University and Research Centre and the EU INCO–STRAPEAT and RESTORPEAT.
- Lindbo, D. L., & Kozłowski, D. A. (2006). *Histosols*. Dalam R. Lal (ed.), *Encyclopedia of Soil Science* (830–834). Vol. 2. Taylor & Francis.
- Lindsay, W. L. (1979). *Chemical equilibria in soils*. John Willey & Sons.
- Ling, Y. C., Bush, R. T., Grice, K., Tulipani, S., Berwick, L., & Moreau, J. W. (2015). Distribution of iron-and sulfate-reducing bacteria across a coastal acid sulfate soil (CASS) environment: implications for passive bioremediation by tidal inundation. *Frontiers in Microbiology*, 6, 624. doi: 10.3389/fmicb.2015.00624
- Liu, C. (1999). *Surface chemistry of iron oxide mineral formed in different ionic environment* [Disertasi tidak diterbitkan]. University of Saskatchewan.
- Loeb, R., Lamers, L. P. M., & Roelofs, J. G. M. (2008). Prediction of phosphorus mobilization in inundated floodplain soils. *Environmental Pollutants*, 156, 325–331.
- Lovley, D. R. (1987). Organic matter mineralization with reduction of ferric iron: a review. *Geomicrobiology Journal*, 5, 375–399.
- Lovley, D. R. (1991). Dissimilatory Fe (III) and Mn (IV) Reduction. *Microbiological Reviews*, 259–287.
- Luo, M., Liu, Y., Huang, J., Xiao, L., Zhu, W., Duan, X., & Tong, C. (2018). Rhizosphere processes induce changes in dissimilatory iron reduction in a tidal marsh soil: a rhizobox study. *Plant and Soil*, 433, 83–100.
- Luther III, G. W., Giglin, A., Howarth, R. W., & Ryans, R. A. (1982). Pyrite and oxidized iron mineral phases formed from pyrite oxidation in salt marsh and estuarine sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46, 2665–2669.

- Lutzow, M. V., Kogel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Mazner, E., Guggenberger, G., Marschner, B., & Flessa, H. (2006). Stabilization of organic matter in temperate soil; Mechanism and relevance under different soil condition—a review. *European Journal of Soil Science*, 57, 426–445.
- Maas, A. (1996). A note on the formation of peat deposits in Indonesia. Dalam E. Maltby, C. P. Immirzi & R. J. Safford. (Ed.), *Tropical Lowland Peatlands of Southeast Asia. Proceedings of a Workshop on Integrated Planning and Management of Tropical Lowland Peatlands*. IUCN.
- Maas, A., Sutanto, R., Supriyo, A., & Hairunsyah. (1997). Perbaikan kualitas gambut tebal, dampaknya pada pertumbuhan and produksi padi sawah [Laporan Hasil Penelitian]. Lembaga Penelitian UGM Bekerjasama dengan Agricultural Research Management Project.
- Macrae, M. L., Devito, K. J., Strack, M., & Waddington, J. M. (2013). Effect of water table drawdown on peatland nutrient dynamics: implications for climate change. *Biogeochemistry*, 112(1), 661–676. DOI 10.1007/s10533-012-9730-3.
- Macdonald, B., White, I., & Denmead, T. (2010). Gas emissions from the interaction of iron, sulfur and nitrogen cycles in acid sulfate soils. Dalam R. J. Gilkes & N. Prakongkep (Ed.), *Soil solutions for a changing world. Soil minerals and contaminants* (80–83), 19<sup>th</sup> World Congress of Soil Science.
- Madden, M. E. E., Madden, A. S., Rimstidt, J. D., Zahrai, S., Kendall, M. R., & Miller, M. A. (2012). Jarosite dissolution rates and nanoscale mineralogy. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 91, 306–321.
- Maftu'ah, E. (2012). *Ameliorasi lahan gambut terdegradasi dan pengaruhnya terhadap produksi tanaman jagung manis* [Disertasi tidak diterbitkan]. Universitas Gadjah Mada.
- Maftu'ah, E., Noor, M., Hartatik, W., & Nursyamsi, D. (2014). Pengelolaan dan roduktivitas lahan gambut untuk berbagai komoditas tanaman. Dalam F. Agus (Ed.), *Lahan gambut Indonesia: pembentukan, karakteristik, dan potensi mendukung ketahanan pangan* (131–162). IAARD Press.
- Magdoff, F. R., Bartlett, R. J., & Ross, D. S. (1987). Acidification and pH buffering of forest soils. *Soil Science Society of America Journal*, 51(5), 1384–1386.

- Maher, C. A. (2013). *Examining geochemical processes in acid sulphate soils using stable sulphur isotopes* [Disertasi tidak diterbitkan]. Southern Cross University.
- Makarim, A. M., & Suhartatik, E. (2009). Morfologi dan fisiologi tanaman padi. Balai Besar Penelitian Tanaman Padi.
- Malik, M. A., Marschner, P., & Khan, K. S. (2012). Addition of organic and inorganic P sources to soil effects on P pools and microorganisms. *Soil Biology and Biochemistry*, 49, 106–113.
- Mamat, H. S., & Noor, M. (2014). Kebijakan pemanfaatan lahan rawa pasang surut untuk mendukung kedaulatan pangan. *Jurnal Sumber daya Lahan*, 31–40.
- Mario, M. D. (2002). *Peningkatan produktivita dan stabilitas tanah gambut dengan pemberian tanah mineral yang diperkaya oleh bahan yang berkadar besi tinggi* [Disertasi tidak diterbitkan]. Institut Pertanian Bogor.
- Marnette, E. C. L., Van Breemen, N., Hordijk, K. A., & Cappenberg, T. E. (1993). Pyrite formation in two freshwater systems in the Netherlands. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57, 4165–4177.
- Masganti, Notohadikusumo, T., Maas, A., & Radjagukguk, B. (2002). Hydrophobicity and its impact on chemical properties of peat. Dalam J. O. Rieley & S. E. Page (Ed.), *Peatlands for people, natural resources function, and sustainable management* (109–113). BPPT dan Indonesian Peat Association.
- Masganti. (2003). *Kajian upaya meningkatkan daya penyediaan fosfat dalam gambut oligotrofik*. [Disertasi tidak diterbitkan]. Program Pascasarjana UGM.
- Masganti, Alwi, M., & Nurhayati. (2015). Pengelolaan air untuk budidaya pertanian di lahan gambut: kasus Riau. Dalam M. Noor (Ed.), *Pengelolaan air di lahan rawa pasang surut: optimasi lahan mendukung swasembada pangan* (62–87). IAARD Press.
- Mayakaduwage, S., Alamgir, Md., Mosley, L., & Marschner, P. (2020). Phosphorus pools in sulfuric acid sulfate soils: influence of water content, pH increase and P addition. *Journal of Soils Sediments* 20, 1446–1453.

- Mayakaduwage, S., Mosley, L. M., & Marschner, P. (2021). Phosphorus pools in acid sulfate soil are influenced by soil water content and form in which P is added. *Geoderma*, 381, 114692.
- McIntyre, R. E. S., Adams, M. A., Ford, D. J., & Grierson, P.F. (2009). Rewetting and litter addition influence mineralization and microbial communities in soils from a semiarid intermittent stream. *Soil Biology and Biochemistry*, 41, 92–101.
- McLay, C. D. A., Allbrook, R. F., & Thompson, K. (1992). Effect of development and cultivation on physical properties of peat soils in New Zealand. *Geoderma*, 54, 23–37.
- Mejaya, I. M. J., Satoto, Sasmita, P., Baliadi, Y., Guswara, A., & Suharma. (2014). *Deskripsi varietas unggul baru padi* (Inpari, Inpago, Inpara, Hipa). Badan Litbang Pertanian.
- Melling, L., Goh, K. J., Hatano, R., Uyo, L. J., Sayok, A., & Nik, A. R. (2008). Characteristics of natural tropical peatland and their influence on C flux in Loagan Bunut National Park, Sarawak, Malaysia. Dalam C. Farrel & J. Feehan (Ed.), *Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Peat Congress, After wise use—the future of peatlands* (226–229). Vol. I. Tullamore, Ireland.
- Mensvoort, M. E. F. V., & Dent, D. L. (1998). Acid sulfate soils. Dalam R. Lal, W. H. Blum, C. Valentine, & B. A. Stewart (Ed.), *Methods of assessment of soil degradation* (301–335). CRC Press.
- Michael, P. S., Fitzpatrick, R. W., & Reid, R. J. (2015). The role of organic matter in ameliorating acid sulfate soils with sulfuric horizons. *Geoderma*, 255–256, 42–49.
- Michael, P. S., Fitzpatrick, R. W., & Reid, R. J. (2017). Effects of live wetland plant macrophytes on acidification, redox potential and sulphate content in acid sulphate soils. *Soil Use and Management*, 33, 471–481. doi: 10.1111/sum.12362.
- Michael, P. S. (2018). Comparative assessment of the effects of soil carbon and nitrogen amendment on subsurface soil pH, Eh and sulfate content of acid sulfate soils. *Eurasian Soil Science*, 51(10), 1181–1190.
- Michael, P. S., & Reid, R. J. (2018). Impact of common reed and complex organic matter on the chemistry of acid sulfate soils. *Soil Science and Plant Nutrition*, 18 (2), 542–555.

- Michael, P. S. (2020). Organic carbon and nitrogen amendment prevents oxidation of subsurface of sulfidic soil under aerobic conditions. *Eurasian Soil Science*, 53(12), 1743–1751.
- Michael, P. S. (2021). Positive and negative effects of addition of organic carbon and nitrogen for management of sulfuric soil material acidity under general soil use conditions. *Polish Journal of Soil Science*, 54(1), 71–87.
- Miwa, E. (1989). Utilization of phosphorus transported from upland to lowlands and estuaries. Dalam *Phosphorus Requirement for Sustainable Agriculture in Asia and Oceania*. IRRI.
- Miyake, M. (1982). Improvement and management of peat soils in Japan. Dalam *International Symposium on distribution, characteristics, and utilization of problem soils* (243–250). Agricultural Research Center Japan.
- Moormann, F. R., & Van Breemen, N. (1978). *Rice: Soil, water, and land*. IRRI.
- Morris, A. J., & Hesterberg, D. L. (2010). Mechanisms of phosphate dissolution from soil organic matter. Dalam R. J. Gilkes & N. Prakongkep (Ed.), *Soil solutions for a changing world. Soil minerals and contaminants* (37–39), 19<sup>th</sup> World Congress of Soil Science.
- Moses, C. O., Nordstrom, D. K., Herman, J. S., & Mills, A. L. (1987). Aqueous pyrite oxidation by dissolved oxygen and by ferric iron. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51(6), 1561–1571.
- Moses, C. O., & Herman, B. J., (1991). Pyrite oxidation at circumneutral pH. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(2), 471–482.
- Mosley, L. M., Palmer, D., Leyden, E., Cook, F., Zammit, B., Shand, P., Baker, A., & Fitzpatrick, R. W. (2014). Acidification of floodplains due to river level decline during drought. *Journal of Contaminant Hydrology*, 161, 10–23.
- Mosley, L. M., Fitzpatrick, R. W., Palmer, R. D., Leyden, E., & Shand, P. (2014). Changes in acidity and metal geochemistry in soils, groundwater, drain and river water in the lower murray river after a severe drought. *Science of the Total Environment*, 485–486, 281–291.

- Mosley, L. M., Shand, P., Self, P., & Fitzpatrick, R. W. (2014). The geochemistry during management of lake acidification caused by the rewetting of sulfuric (pH<4) acid sulfate soils. *Applied Geochemistry*, 41, 49–61.
- Mosley, L. M., Biswas, T. K., Cook, F. J., Marschner, P., Palmer, D., Shand, P., Yuan, C., & Fitzpatrick, R. W. (2017). Prolonged recovery of acid sulfate soils with sulfuric materials following severe drought; causes and implications. *Geoderma*, 308, 312–320.
- Muktamar, Z., & Adipraseto, T. (1993). Studi potensi lahan gambut di Provinsi Bengkulu untuk tanaman semusim di Indonesia. Dalam *Prosiding seminar nasional gambut II* (78–85).
- Mukhlis, Saleh, M., Azzahra, F., Budiman, A., & Noor, R. (2010). Pengembangan teknologi pupuk mikroba pereduksi sulfat untuk peningkatan produktivitas lahan sulfat Masam lebih dari 20%. Laporan Hasil Penelitian. Balai Penelitian Pertanian Lahan Rawa.
- Nazemi, D., Hairani, A., & Nurita. (2012). Prospek pengembangan penataan lahan system surjan di lahan rawa pasang surut. Agovigor. *Jurnal Agroteknologi*. 5(2).
- Nedeco/Euroconsult-Biec. (1984). *Final Report. Nationwide Study of Coastal and Near Coastal Swamp land in Sumatra, Kalimantan, and Irian Jaya*. Vol. 3. Maps. Ministry of Public Works. Direct. Gen. of Water Resources Development.
- Nelson, K., Thompson, D., Hopkinson, C., Petrone, R., & Chasmer, L. (2021). Peatland-fire interactions: a review of wildland fire feedbacks and interactions in Canadian boreal peatlands. *Science Total Environ*, 769, 145212. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145212>.
- Neue, H. U., & Lin, Z. Z. (1989). Chemistry of adverse flooded soils. Dalam; Phosphorus Requirement for Sustainable Agriculture in Asia and Oceania (225–242). IRRI.
- Neue, H. U. (1994). Variability in rice to chemical stresses of problem soils and their method of identification. Dalam D. Senadhira (Ed.), *Rice and problem soils in South and Southeast Asia* (115–144). International Rice Research Institute: Manila, Philippines; IRRI Discussion Paper Series No. 4.

- Nevin, P. K., & Lovely, D. K. (2002). Mechanisms for Fe (III) oxide reduction in sedimentary environments. *Geomicrobiology Journal*, 19, 141–159.
- Niedermeier, A., & Robinson, J. S. (2007). Hydrological controls on soil redox dynamics in a peat-based restored wetland. *Geoderma*, 137, 318–326.
- Noble, A. D., & Randal, P. J. (1999). Alkalinity effects of different tree litters incubated in an acid soil of NSW, Australia. *Agroforestry Systems*, 46, 147–160.
- Noor, M. (1996). *Padi lahan marjinal*. Penebar Swadaya.
- Noor, M. (2001). *Pertanian lahan gambut: Potensi dan kendala*. Penerbit Kanisius.
- Noor, M. (2004). *Lahan rawa; Sifat dan pengelolaan tanah bermasalah sulfat masam*. PT. Raja Grafindo Persada.
- Noor, M., Lestari, Y., & Alwi, M. (2005). *Laporan hasil penelitian teknologi peningkatan produktivitas lahan gambut*. Balittra.
- Noor, M. (2010). *Lahan gambut: Pengembangan, konservasi, dan perubahan iklim*. Gajah Mada University Press.
- Noor, M. (2012). Sejarah pembukaan lahan gambut untuk pertanian di Indonesia. Dalam E. Husen, D. Nursyamsi, M. Noor, A. Fahmi, Irawan & I. G. P. Wigena (Ed.), *Proceeding of international workshop on sustainable management of lowland for rice production* (399–412). Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian.
- Noor, M. (2013). Conservation Agriculture and Micro Water Management in the Peatland: *Training and Practical Work of Micro Water Management in Peatlands Through the Building of Farmer-Based Water Gates*. Final report. Cooperation Food Agriculture Organization (FAO)-Central Kalimantan Agricultural Technology Assessment.
- Noor, M., Masganti, & Agus, F. (2014). Pembentukan dan karakteristik gambut tropika Indonesia. Dalam F. Agus, M. Anda, A. Jamil, & Masganti (Ed.), *Lahan gambut Indonesia: Pembentukan, karakteristik, dan potensi mendukung ketahanan pangan*. IAARD Press.
- Noor, M. (2016). *Debat Gambut: Ekonomi, Ekologi, Politik, dan Kebijakan*. Gajah Mada University Press.

- Noor, M., & Maftuah, E. (2020). Program SERASI sebagai jalan menuju lumbung pangan dunia tahun 2045. Dalam Masganti (Ed.), *Optimasi lahan rawa: akselerasi menuju lumbung pangan dunia 2045* (3–19). IAARD Press.
- Noor, M., & Saragih, S. (1997). Peningkatan produktivitas lahan pasang surut dengan perbaikan system pengelolaan air dan tanah. Dalam. *Proseding simposium tanaman pangan III, Kinerja penelitian tanaman pangan buku 6* (23–25).
- Noor, M., Mayasari, V., & Hidayat, A. R. (2017). Pengelolaan agroekosistem gambut berbasis lingkungan dan masyarakat. Dalam Masganti, R. S. Simatupang, M. Alwi, E. Maftuah, M. Noor, Mukhlis, H. Subagio, A. Fahmi, M. Thamrin, H. Sosiawan, & M. A. Susanti (Ed.), *Agroekologi Rawa* (30–49). IAARD Press.
- Noor, M. (2021). Catatan pinggir dari kawasan food estate lahan rawa di Kalimantan Tengah. *Majalah Sains Indonesia*. Vol. 09 Januari 2021
- Noorginayuwati. (1991). *Pengaruh perbaikan tata air terhadap produktivitas lahan tenaga kerja dan terhadap produktivitas lahan tenaga kerja dan pendapatan rata-rata di lahan pasang surut Kalimantan Selatan* [Laporan Hasil Penelitian]. Balai Penelitian Tanaman Pangan Banjarbaru.
- Noorginayuwati, & Noor, M. (1999). Karakteristik agro-fisik lahan dan sosial ekonomi penyebab dan dampak kebakaran lahan gambut. *Jurnal Kalimantan Agrikultura*, 6(3), 97–107.
- Noorsyamsi, Anwarhan, H., Soelaiman, S., & Bechell, H. M. (1984). Rice cultivation in tidal swamps of Kalimantan. Dalam. *Workshop on Research Priorities in Tidal Swamps Rice*. (17-28). IRRI. Philippines.
- Nordstrom, D. K. (1982). Aqueous pyrite oxidation and the consequent formation of secondary iron minerals. Dalam J. A. Kittrick, D. S. Fanning, & L. R. Hosner (Ed.), *Acid Sulfate Weathering* (37–56). SSSA Special Publication Number 10. Soil Science Society of America.
- Nordstrom, D. K., & Southam, G. (1997). Geomicrobiology of sulfide mineral oxidation. Dalam J. F. Benfield, & K. H. Nelson (Ed.), *Geomicrobiology; Interactions Between Microbes and Mineral. Review in Minealogy* (361–390). Mineralogical Society of America.

- Notohadiprawiro, T. (1979). *Tanah estuarin: Watak, sifat, kelakuan, dan kesuburannya*. Dep. Ilmu Tanah Fakultas Pertanian, Universitas Gadjah Mada.
- Notohadiprawiro, T. (1985). *Selidik cepat ciri tanah di lapangan*. Ghalia.
- Notohadiprawiro, T. (1996). Constraints to achieving the agricultural potential of tropical peatlands—An Indonesian perspective. Dalam E. Maltby, C. P. Immirzi, & R. J. Safford (Ed.), *Proceedings of a Workshop on integrated planning and management of tropical lowland peatlands; Tropical lowland peatlands of Southeast Asia* (139–154). IUCN.
- Notohadiprawiro, T. (1997). Twenty–five years experience in peatland development for agriculture in Indonesia. Dalam J. O. Rieley, & S. E. Page (Ed.), *Proceedings of the international symposium on biodiversity, environmental importance of tropical peat and peatlands; Biodiversity and sustainability of tropical peatlands* (301–310). Samara Publisher.
- Notohadikusumo, T. (2000). Benang merah tulisan-tulisan yang pernah disusun. Dalam *Buku Panduan Seminar Nasional Pengembangan Ilmu Tanah Bervisi Lingkungan*, Jurusan Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian UGM, Yogyakarta.
- Notohadiprawiro, T. (2001). Pengantar. Dalam M. Noor, *Pertanian Lahan Gambut: Potensi dan Kendala*. Penerbit Kanisius.
- Nugroho, K., Alkasuma, Paidi, Wahdini, W., Abdurachman, A., Suhardjo, H., & Widjaja-Adhi, I. P. G. (1991). *Penentuan areal potensial lahan pasang surut, rawa, dan pantai. Skala 1:500.000* [Laporan Akhir]. Laporan Teknik No. 1/PSRP/1991. Proyek Penelitian Sumber daya Lahan, Puslittanah dan Agroklimat.
- Nugroho, K., Alkasuma, Paidi, Wahdini, W., Abdurachman, A., Suhardjo, H., & Widjaja-Adhi, I. P. G. (1992). *Peta areal potensial untuk pengembangan pertanian lahan pasang surut, rawa dan pantai* [Laporan Proyek Penelitian Sumber Daya Lahan]. Puslitanak.
- Nugroho, K., Gianinazzi, G., & Widjaja-Adhi, I. P. G. (1997). Soil hydraulic properties of Indonesian peat. Dalam J. O. Rieley, & S. E. Page (Ed.), *Proceedings of the international symposium on biodiversity, environmental importance of tropical peat and peatlands; Biodiversity and sustainability of tropical peatlands* (147–156). Samara Publisher.

- Nursyamsi, D., Noor, M., & Haryono. (2014). *Sistem surjan: model pertanian lahan rawa adaptif perubahan iklim*. IAARD Press. Balitbangtan. Kementan.
- Nuruddin, A. A., Leng, H. M., & Basaruddin, F. (2006). Peat moisture and water relationship in a tropical peat swamp forest. *Journal of Applied Science*, 6(11), 2517–2519.
- Nurzakiah, S., Nurwahid, N., Nursyamsi, D., & Syahbuddin, H. (2013). Carbon stock stratification of swampy peatland. Dalam Suwardi, M. Nurcholis, F. Agus, S. Anwar, B. I. Setiawan & D. Ardi (Ed.), *Proceedings of the 11<sup>th</sup> international conference the East and Southeast Asia federation of soil science societies*. Bogor, Indonesia.
- Nwaishi, F., Petrone, R. M., Macrae, M. L., Price, J. S., Strack, M., Slawson, R., & Andersen, R. (2016). Above and below ground nutrient cycling: a criteria for assessing the biogeochemical functioning of a constructed fen. *Applied Soil Ecology*, 98, 177–194.
- Ohfuji, H., Rickard, D., Light, M. E., & Hursthouse. (2006). Structure of framboidal pyrite: a single crystal X–ray diffraction study. *European Journal of Mineralogy*, 18, 93–98.
- Oploo, P., White, V., Ford, I., Melville, M. D., & Macdonald, B. C. T. (2008). Pore water chemistry of acid sulfate soils: Chemical flux and oxidation rates. *Geoderma*, 146, 32–39.
- Oleszczuk, R., & Truba, M. (2013). The analysis of some physical properties of drained peat-moorsh soil layers. *Land Reclamation*, 45(1), 41–48.
- Ottow, J. C. G., & von Klopotek, A. (1969). Enzymatic reduction of iron oxide by fungi. *Appl. Environmental Microbiology*, 18, 41–43.
- Oxmann, J. F., Pham, Q. H., & Lara, R. J. (2008). Quantification of individual phosphorus species in sediment: a sequential conversion and extraction method. *European Journal of Soil Science*, 59, 1177–1190.
- Page, S. E., Rieley, J. O., & R. Wurst. (2006). Lowland tropical peatlands of Southeast Asia. Dalam I. P. Martini, A. M. Cortizas, & W. Chesworth (Ed.), *Peatlands; evolution and records of environmental and climate changes* (145–172). Elsevier.

- Page, S. E., Rieley, J., & Banks, C. (2011). Global and regional importance of the tropical peatland carbon pool. *Global Change Biology*, 17(2), 798–818.
- Palandri, J. L., Rosenbauer, R. J., & Kharaka, Y. K. (2005). Ferric iron in sediments as a novel CO<sub>2</sub> mineral trap: CO<sub>2</sub>-SO<sub>2</sub> reaction with hematite. *Applied Geochemistry*, 20, 2038–2048.
- Parish, F., Sirin, A., Charman, D., Joosten, H., Minayeva, T., Silvius, M., & Stringer, L. (2008). *Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change: Main Report*. Global Environment Centre, Kuala Lumpur and Wetlands International, Wageningen.
- Pathirage, P. U. (2014). *Modelling of Clogging in a permeable reactive barrier in acid sulfate soil terrain* [Disertasi tidak diterbitkan]. University of Wollongong.
- Patrick, Jr. W. H., & Jugsujinda, A. (1992). Sequential reduction and oxidation of inorganic nitrogen, manganese, and iron in flooded soil. *Soil Science Society of America Journal*, 56, 1071–1073.
- Patrick, Jr. W. H., & Mikkelsen, D. S. (1971). Plant nutrient behavior in flooded soil. Dalam R. A. Olson (Ed.), *Fertilizer technology and use* (187–215). *Soil Science Society of America Journal*.
- Patrick, Jr. W. H., & Mahapatra, I. C. (1968). Transformation and availability to rice of nitrogen and phosphorus in waterlogged soils. *Advances in Agronomy*, 20, 323–356.
- Patrick, Jr., W. H., & K.R. Reddy. (1978). Chemical changes in rice soils. Dalam *Soil and Rice* (361–379). IRRI.
- Patrick, Jr., W. H., & Henderson, R. E. (1981). Reduction and reoxidation cycles of manganese and iron in flooded soil and in water solution. *Soil Science Society of America*, 45, 855–859.
- Paynea, M. K., & Stolt, M. H. (2017). Understanding sulfide distribution in subaqueous soil systems in southern New England, USA. *Geoderma*, 308, 207–214.
- Pedrot, M., Le Boudec, A., Davranche, M., Dia, A., & Henin, O. (2011). How does organic matter constrain the nature, size and availability of Fe nanoparticles for biological reduction? *Journal of Colloid and Interface Science*, 359, 75–85.

- Pei, L. J. (1985). Amelioration of an acid sulfate soil in the Philippines. I. The effect of organic and inorganic matter amendments on rice growth and yield in an acid sulfate soil. *Philippines Journal of Crop Science*, 10(1), 37–42.
- Peng, X., Horn, L., & Smucker, A. (2007). Pore shrinkage dependency of inorganic and organic soils on wetting and drying cycles. *Soil Science Society of America Journal*, 71, 1095–1104.
- Peraturan Menteri Pertanian Nomor 14/permentan/pl.110/2/2009 Tahun 2009 Tentang Pedoman Pemanfaatan Lahan Gambut untuk Budidaya Kelapa Sawit. (2009). <https://peraturan.go.id/id/permentan-no-14-permentan-pl-110-2-2009-tahun-2009>
- Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 150 Tahun 2000 tentang Pengendalian Kerusakan Tanah Untuk Produksi Biomassa. (2000). <https://peraturan.bpk.go.id/Details/54039>
- Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 57 Tahun 2016 tentang Perubahan atas Peraturan Pemerintah Nomor 71 Tahun 2014 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Ekosistem Gambut. (2016). <https://peraturan.bpk.go.id/Details/5778/pp-no-57-tahun-2016>
- Phong, N. D. (2008). *Modelling of canal water acidity due to acid sulphate soils; a case study of the Camau Peninsula, Mekong Delta, Vietnam* [Disertasi tidak diterbitkan]. University of Melbourne.
- Pirkonen, P., Luukainen, V., & Jarvinen, T. (1985). A study on the dewatering of Jamaican and Finnish by pressing. *Proceeding of Symposium on Tropical Peat Resources—Prospect and Potential* (294–308). Kingston.
- Polak, B. (1975). Character and occurrence of peat deposits in the Malaysian tropics. Dalam G. J. Barstra & W. A. Casparie (Ed.), *Modern Quarternary Research in Southeast Asia*. Balkema.
- Poggenburg, C., Mikutta, R., Schippers, A., Dohrmann, R., & Guggenberger, G. (2018). Impact of natural organic matter coatings on the microbial reduction of iron oxides. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 224, 223–248
- Ponnamperuma, F. N. (1972). The chemistry of submerged soils. *Advances in Agronomy*, 24, 29–96.

- Ponnamperuma, F. N., Attanadana, T., & Beye, G. (1973). Amelioration of three acid sulfate soils for lowland rice. Dalam, *Proceedings of the international symposium on acid sulfate soils; Acid sulfate soils* (391–406). ILRI Publication No. 18. Vol. II.
- Ponnamperuma, F. N. (1977). *Physicochemical properties of submerged soils in relation to fertility*. IRRI Research Paper Series No. 5. IRRI.
- Ponnamperuma, F. N. (1978). Varietal tolerance of rice for adverse soils. Dalam *Soil and Rice* (801–823). IRRI.
- Ponnamperuma, F. N. (1984). Effects of flooding on soils. Dalam T. Kozlowski (Ed.), *Flooding and plant growth; physical ecology* (10–45). Academic Press Inc. Harcourt Brace Javanovich Publisher.
- Pons, L. J. (1970). *Acid sulphate soils (soils with cat-clay phenomena) and the prediction of their origin from pyrite muds*. In field to laboratory. Fysisch. Geografisch en Bodemkundeig Laboratorium. Publication No. 16.
- Pons, L. J. (1973). Outline of the genesis, characteristics, classification and improvement of acid sulphate soils. Dalam H. Dost (Ed.), *Proceedings of the international symposium on acid sulphate soils* (3–27). Publication 18–I. International Institute for Land Reclamation and Improvement.
- Pon L. J., & Driessen, P. M. (1975). Reclamation and development of wasteland on oligotropics peat and acid sulphate soils. Dalam *Proceedings symposium on development problems soils in Indonesia*.
- Pons, L. J., & Van Breemen, N. (1981). Factors influencing the formation of potential acidity in tidal swamps. Dalam H. Dost & N. van Breemen (Ed.), *Proceedings of the Bangkok symposium on acid sulphate soils* (37–51).
- Pons, L. J., Van Breemen, N., & Driessen, P. M. (1982). Physiography of coastal sediments and development of potential soil acidity. Dalam J. A. Kittrick, D. S. Fanning, & L. R. Hossner (Ed.), *Acid sulfate weathering* (1-18). SSSA Special Publication No. 10, Soil Science Society of America: Madison, WI.
- Ponziani, M., Slob, E. C., Ngan-Tillar D. J. M., & Vanhala. H., (2011). Influence of water content on the electrical conductivity of peat. *International Water Technology Journal*, I(1), 14–21.

- Prade, K., Ottow, J. C. G., & Jacq, V. (1986). Excessive iron uptake (iron toxicity) by wetland rice (*Oryza sativa* L.) on acid sulphate soil in the Casamance/ Senegal. Dalam H. Dost (Ed.), *Selected papers of the Dakkar symposium on acid sulphate soils* (150–162). ILRI Publication No. 44.
- Prastowo, K., Moersidi, S., Santoso, E., & Sibuea, L. H. (1993). Pengaruh kompos diperkaya dengan pupuk Urea, TSP, P-Alam, KCl dan kapur terhadap tanaman. *Prosiding Pertemuan Teknis*. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat.
- Prem, M., Christian, H., Hansen, B., Wenzel, W., Heiberg, L., Sørensen, H., & Borggaard, O. K. (2014). High spatial and fast changes of iron redox state and phosphorus solubility in a seasonally flooded temperate wetland soil. *Journal of Hydrology*, *214*, 130–143.
- Prévost, M., Plamondon, A. P., & Belleau, P. (1999). Effects of drainage of a forested peatland on water quality and quantity. *Journal of Hydrology*, *214*(1–4), 130–143, [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00281-9](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00281-9).
- Price, J. S., Heathwaite, A. L., & Baird, A. J. (2003). Hydrological processes in abandoned and restored peatlands: An overview of management approaches. *Wetlands Ecology and Management*, *11*, 65–83.
- Proctor, M. C. F. (2003). Malham tarn moss: The surface water chemistry of an ombrotrophic bog. *Field Studies*, *10*, 553–578.
- Pulford, I. D., Backes, C. A., & Duncan, H. J. (1988). Inhibition of pyrite oxidation in coal mine waste. Dalam H. Dost (Ed.), *Selected papers of the Dakkar symposium on acid sulphate soils* (59–67). ILRI Publication No. 44.
- Purnomo, E., Mursyid, A., Syarwani, M., Jumberi, A., Hashidoko, Y., Hasegawa, T., Honma, S., & Osaki, M. (2005). Phosphorus solubilizing microorganisms in the rhizosphere of local rice varieties grown without fertilizer on acid sulfate Soils. *Soil Science and Plant Nutrition*, *61*(5), 679–681.
- Purnomo, E., Hasegawa, T., Hashidoko, Y., Saputra, P. J., & Osaki, M. (2009). Nitrogen nutrition of some local rice varieties grown without fertilizer on acid sulphate soil area in South Kalimantan, *Jurnal Tanah Tropika*, *14*(1), 41–47.

- Puslitbangtan. (1992). Program transmigrasi di lahan rawa. Dalam S. Partohardjono & M. Syam (Ed.), *Risalah pertemuan pengembangan terpadu pertanian lahan rawa dan lebak. SWAMPS*. Puslitbangtan.
- Puslittanak (Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat). (2000). *Atlas sumber daya tanah eksplorasi Indonesia*. Skala 1:1.000.000. Badan Litbang Pertanian, Dep. Pertanian.
- Rabenhorst, M. C., Fanning, D. S., & Burch, S. N. (2006). Acid sulfate soils: formation. Dalam R. Lal (Ed.), *Encyclopedia of Soil Science* (20–24). Vol. 1, 2<sup>nd</sup> edition. CRC Press.
- Radjaguguk, B. (1992). Utilization and management of peatlands in Indonesia for agriculture and forestry. Dalam B. Y. Aminuddin, S. L. Tan, B. Aziz, J. Samy, Z. Salmah, H. Siti Petimah, & S. T. Choo (Ed.), *Tropical Peat. Proceedings of the International Symposium on Tropical Peatland* (21–27). MARDI.
- Radjaguguk, B. (1993). (17 March 1993). *Peat resource of Indonesia: its extent, characteristics, and development possibilities* [Presentasi Makalah]. The third seminar on the greening of desert entitled: Desert Greening with Peat. Waseda University.
- Radjaguguk, B. (1997). Pertanian berkelanjutan di lahan gambut. Pengelolaan gambut berwawasan lingkungan. *Alami*, 2(1), 17–20.
- Radjaguguk, B. (2004). Developing sustainable agriculture on tropical peatland: Chalanges and prospects. Dalam J. Palvanen (Ed.), *Proceeding of the 12<sup>th</sup> international peat congress. Wise use of peatlands* (707–712). Vol 1.
- Radjaguguk, B. (2006). *Kesuburan tanah*. Diktat mata kuliah Kesuburan Tanah. Fakultas Pertanian, Universitas Gadjah Mada.
- Rachim, A. (1995). *Penggunaan kation–kation polivalen kaitannya dengan ketersediaan fosfat untuk meningkatkan produksi jagung pada tanah gambut* [Disertasi tidak diterbitkan]. Institut Pertanian Bogor.
- Rahim, A., Hutomo, G. S., Shahabuddin, Ismail & Farid. (2020). Diversifikasi produk olahan kakao melalui program pengembangan desa mitra di Kecamatan Ampibabo Kabupaten Parigi Moutong. *Jurnal Pengabdian Masyarakat*, 3,(2), 57-62

- Rakshit, S., Uchimiya, M., & Sposito, G. (2009). Iron (III) bioreduction in soil in the presence of added humic substances. *Soil Science Society of America Journal*, 73, 65–71.
- Ramsar Convention Secretariat. (2010). *Wetland inventory: A Ramsar framework for wetland inventory and ecological character description*. Ramsar handbooks for the wise use of wetlands, 4<sup>th</sup> edition, vol. 15. Ramsar Convention Secretariat, Gland, Switzerland.
- Rondon, M., Lehmann, J., Ramírez, J., & Hurtado, M. (2007). Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with biochar additions. *Biology and Fertility in Soils*, 43, 699–708.
- Reddy, K. R., Rao, P. S. C., & Patrick Jr, W. H., (1980). Factors influencing oxygen consumption rates in flooded soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44, 741–744.
- Reddy, K. R., & DeLaune, R. D. (2008). *The biogeochemistry of wetlands; Science and applications*, CRC Press.
- Regenspurg, S. (2002). *Characterization of schwertmannite–geochemical interactions with arsenate and chromate and significance in sediments of lignite opencast lakes* [Disertasi tidak diterbitkan]. University of Bayreuth.
- Regmi, G., Indraratna, B., & Nghiem, L. D. (2009). Long-term performance of a permeable reactive barrier in acid sulphate soil terrain. *Water, Air and Soil Pollution*, 9(5/6), 409–419.
- Regmi, G., Indraratna, B., Nghiem, L. D., & Prasad, B. G. (2011). Treatment of Acidic Groundwater in Acid Sulfate Soil Terrain Using Recycled Concrete: Column Experiments. *Journal of Environmental Engineering*, 433–443.
- Reid, R. J., & Butcher, C. S. (2011). Positive and negative impacts of plants on acid production in exposed acid sulphate soils. *Plant Soil*, 349, 183–190.
- Rickard, D. T. (1975). Kinetics and mechanism of pyrite formation at low temperatures. *American Journal of Science*, 275, 636–652.
- Rickard, D. (2019). How long does it take a pyrite framboid to form? *Earth and Planetary Science Letters*, 513, 64–68.

- Rickard, D., & Luther III, G. W. (1997a). Kinetics of pyrite formation by the  $H_2S$  oxidation of iron (II) monosulfide in aqueous solutions between 25 and 125°C: The mechanism. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(1), 135–147.
- Rickard, D., & Luther III, G. W. (1997b). Kinetics of pyrite formation by the  $H_2S$  oxidation of iron (II) monosulfide in aqueous solutions between 25 and 125°C: The rate equation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(1), 115–134.
- Rickard, D., & Luther III, G. W. (2007). Chemistry of iron sulfides. *Chemical Reviews*, 107, 514–562.
- Rieley, J. O. (1992). The ecology of tropical peat swamp forest- A Southeast Asian perspective. Dalam B. Y. Aminuddin, S. L. Tan, B. Aziz, J. Samy, Z. Salmah, H. Siti Petimah, & S. T. Choo (Ed.), *Tropical Peat. Proceedings of the International Symposium on Tropical Peatland* (244–254). MARDI.
- Rieley, J. O., Siefferman, G., Fournier, M., & Soubies, F. (1992). The peat swamp forest of Borneo; Their origin, development, past and present vegetation and importance in regional and global environmental processes. Dalam *Proceedings of the 19<sup>th</sup> International Peat Congress* (78–95).
- Rieley, J. O., Ahmad-Shah, A. A., & Brady, M. A. (1996). The extent and nature of tropical peat swamps. Dalam E. Maltby, C. P. Immirzi, & R. J. Safford (Ed.), *Proceedings of a Workshop on integrated planning and management of tropical lowland peatlands; Tropical lowland peatlands of Southeast Asia* (17–53). IUCN.
- Rieley, J. O., & Page, S. E. (2005). *Wise use of tropical peatlands: Focus on Southeast Asia*. ALTERRA–Wageningen University and Research Centre and the EU INCO–TRAPEAT and RESTORPEAT.
- Rieley, J. O., Notohadiprawiro, T., Setiadi, B., & Limin, S. H. (2008). Restoration of tropical peatland in Indonesia ; why, where and how ? Dalam C. Farrel & J. Feehan (Ed.), *Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Peat Congress, After wise use—the future of peatlands* (240–244). Vol. I.
- Rigby, P. A., Dobos, S. K., Cook, F. J., & Goonetilleke, A. (2006). Role of organic matter in framboidal pyrite oxidation. *Science of the Total Environment*, 36, 847–854.

- Rina, Y, Noorginayuwati, & Antarlina, S. S. (2006). Analisis finansial usahatani jeruk pada sistem surjan di lahan pasang surut. Dalam Setiadjit, S. Prabawati, Yulianingsih & T. M. Ibrahim (Ed.), *Prosiding ekspose nasional agribisnis jeruk siam*. Kerjasama BPTP KalBar, Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Pascapanen Pertanian, Pemerintah Provinsi Kalimantan Barat dan Pemerintah Kabupaten Sambas.
- Ritchie, A. I. M. (1994). Sulfide oxidation mechanisms: controls and rates of oxygen transport. Dalam J. L. Jambor & D. W. Blowes (Ed.), *Short course handbook on environmental geochemistry of sulfide mine-waste* (22, 201–244). Mineralogical Association of Canada.
- Ritsema, C. J., Groenenberg, J. E., & Bisdorn, E. B. A. (1992). The transformation of potential into actual acid sulphate soils studied in column experiments. *Geoderma*, 55, 259–271.
- Ritsema, C. J., & Groenenberg, J. E. (1993). Pyrite oxidation, carbonate weathering, and gypsum formation in a drained potential acid sulfate soil. *Soil Science Society of America Journal*, 57, 968–976.
- Ritung, S., Wahyunto, & Nugroho, K. (2012). Karakteristik dan sebaran lahan gambut di Sumatra, Kalimantan dan Papua. Dalam E. Husen, M. Anda, M. Noor, H. S. Mamat, Maswar, A. Fahmi, & Y. Sulaiman (Ed.), *Prosiding seminar nasional; pengelolaan lahan gambut berkelanjutan* (47–62). Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumber daya Lahan Pertanian.
- Ritzema, H., & Wösten, H. (2002). *Hydrology of Borneo's Peat Swamps*. STRAPEAT–Status Report Hydrology.
- Roden, E. E., & Wetzel, R. G. (1996). Organik carbon oxidation and suppression of methane production by microbial Fe (III) oxide reduction in vegetated and unvegetated freshwater wetland sediments. *Limnology and Oceanography*, 41, 1733–1748.
- Rodney, A. C., & Ewel, K. C. (2005). A tropical freshwater wetland; Production, decomposition and peat formation. *Wetland Ecology and Management*, 13, 671–684.
- Rorison, I. H. (1973). The effect of extreme soil acidity on the nutrient and physiology of plants. Dalam H. Dost (Ed.), *Proceedings of the international symposium on acid sulphate soils* (391–406), Publication 18–II. International Institute for Land Reclamation and Improvement.

- Rose, A. W., & Cravotta III, C. A. (1998). Geochemistry of coal mine drainage. Dalam K. B. C. Brady, M. W. Smith, & J. Schueck (Ed.), *Coal mine drainage prediction and prevention in Pennsylvania* (1–22). Pennsylvania Dept. Environ Protection.
- Rosilawati, K., Shamshuddin, J., & Fauziah, C. I. (2014). Effects of incubating an acid sulfate soil treated with various liming materials under submerged and moist conditions on pH, Al and Fe. *African Journal of Agricultural Research*, 9(1), 94–112.
- Rothe, M., Kleeberg, A., & M. Hupfer, (2016). The occurrence, identification and environmental relevance of vivianite in waterlogged soils and aquatic sediments. *Earth–Science Reviews*, 158, 51–64.
- Rukshana, F., Butterly, C. R., Baldock, J. A., & Tang, C. (2011). Model organic compounds differ in their effects on pH changes of two soils differing in initial pH. *Biology Fertility of Soils*, 47, 51–62.
- Sabiham, S. (1988). Studies on peat in the coastal plains of Sumatra and Borneo. Part I : Physiografi and geomorphology of the coastal plains. *Tonan Ajia Kenkyu* (South East Asian Qstudies), 26(3), 307–335.
- Sabiham, S., Dohong, S., & Prasetyo, T. (1997). Phenolic acids in Indonesia Peat. E. Page (Ed.), *Proceedings of the international symposium on biodiversity, environmental importance of tropical peat and peatlands; Biodiversity and sustainability of tropical peatlands* (289–292). Samara Publisher.
- Sabiham, S., & Ismangun, M. (1997). Potensi dan kendala pengembangan lahan gambut untuk pertanian. Dalam *Prosiding simposium nasional dan kongres V Peragi*.
- Sabiham, S. (2000). Kadar air kritik gambut Kalimantan Tengah dalam kaitannya dengan kejadian kering tidak-balik. *Jurnal Tanah Tropika*, 11, 21–30.
- Sabiham, S. (2006). *Pengelolaan lahan gambut indonesia berbasis keunikan ekosistem*. Makalah Orasi Ilmiah. Fakultas Pertanian, Institut Pertanian Bogor.
- Sabiham, S. (2010). Keunikan eksositem sebagai dasar pengelolaan lahan gambut ke depan. Pengantar buku lahan gambut: Pengembangan, konservasi, dan perubahan iklim. Gadjah Mada University Press.

- Sadiq, A. A., & Babagama, U. (2012). Influence of lime materials to ameliorate acidity on irrigated paddy fields: A review. *Academic Research International*, 3(1), 413–420.
- Sagiman, S. (2001). *Peningkatan produksi kedelai di tanah gambut melalui inokulasi Bradyrhizobium Japonicum asal gambut dan pemanfaatan amelioran (lumpur dan kapur)* [Disertasi tidak diterbitkan]. Institut Pertanian Bogor.
- Sahrawat, K. L. (1979). Ammonium fixation in some tropical rice soils. *Communication in Soil Science Plant Analysis*, 10, 1015–1023.
- Sahrawat, K. L. (1998). Flooding soil: a great equalizer of diversity in soil chemical fertility. *Oryza*, 35, 300–305.
- Sahrawat, K. L., & Narteh, L. T. (2001). Organic matter and reducible iron control of ammonium production in submerged soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 32, 1543–1550.
- Sahrawat, K. L. (2004a). Iron toxicity in wetland rice and the role of other nutrients. *Journal of Plant Nutrition*, 27(8), 1471–1504.
- Sahrawat, K. L. (2004b). Ammonium production in submerged soils and sediments: the role of reducible iron. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 35(3&4), 399–411.
- Sahrawat, K. L. (2004c). Organic matter accumulation in submerged soils. *Advance in Agronomy*, 81, 169–201.
- Sahrawat, K. L. (2005). Fertility and organic matter in submerged rice soils. *Current Science*, 88(5), 735–739.
- Sahrawat, K. L. (2015). Redox potential and pH as major drivers of fertility in submerged rice soils: a conceptual framework for management. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 46, 1597–1606.
- Sajarwan, A. (1998). *Pengaruh pemberian pupuk kandang terhadap laju dekomposisi dan perubahan sifat kimia tanah gambut fibrist* [Tesis tidak diterbitkan]. Universitas Brawijaya.
- Sajarwan, A. (2007). *Kajian karakteristik gambut tropika yang dipengaruhi oleh jarak dari sungai, ketebalan gambut dan tipe hutan di daerah aliran sungai sebangau*. [Disertasi tidak diterbitkan]. Program Pascasarjana UGM. Yogyakarta

- Salampak, (1999). *Peningkatan produktivitas tanah gambut yang disawahkan dengan pemberian bahan amelioran tanah mineral berkadar besi* [Disertasi tidak diterbitkan]. Institut Pertanian Bogor.
- Saleh, M., & Raihan, S. (2011). Keragaan melon varietas Action 434 dengan perlakuan zat pengatur tumbuh dan pupuk kalsium tinggi di lahan rawa pasang surut sulfat masam. Dalam Gunawan (Ed.), *Proseding seminar nasional pemberdayaan petani melalui inovasi teknologi spesifik lokasi* (567–570). BPTP Jogjakarta dan Sekolah Tinggi Pertanian Magelang.
- Salmah, Z., Spoor, G., Zahuri, A. B., & Welch, D. N. (1992). Importance of water management in peat soil at farm level. Dalam B. Y. Aminuddin, S. L. Tan, B. Aziz, J. Samy, Z. Salmah, H. Siti Petimah, & S. T. Choo (Ed.), *Tropical Peat. Proceedings of the International Symposium on Tropical Peatland* (228–238). MARDI.
- Salimin, M. I., Gandaseca, S., Ahmed, O. H., & Majid, N. M. A. (2010). Comparison of selected chemical properties of peat swamp soil before and after timber harvestin. *American Journal of Environmental Sciences*, 6(2), 164–167.
- Sanchez, P. A. (1976). *Properties and Management of Soils in the Tropics*. 1<sup>st</sup> edition. John Wiley & Soncs, Inc.
- Sánchez–Marañón, M., Romero–Freire, A., & Martín–Peinado, F. J. (2015). Soil–color changes by sulfuricization induced from a pyritic surface sediment. *Catena*, 135, 173–183.
- Sapek, A., Sapek, B., Chrzanowski, S., & Urbaniak, M. (2009). Nutrient mobilisation and losses related to the groundwater level in low peat soils. *International Journal of Environment and Pollution*, 37(4), 398–408.
- Saragih, S., & Nurzakiah, S. (2011). Peluang meningkatkan indeks pertanaman padi dengan IP 300 di lahan rawa pasang surut. *Agrosientiae*, 18(3), 38–43.
- Sarwani, M., Shamshuddin, J., Fauziah, I., & Husni, M. A. H. (2006). Changes in iron–poor acid sulfate soil upon submergence. *Geoderma*, 131, 110–122.

- Schoonen, M. A. A. (2004). Mechanisms of sedimentary pyrite formation. Dalam J. P. Amend, J. Katrina, Edwards, & T. W. Lyons (Ed.), *Sulfur Biogeochemistry: Past and present* (379, 117–134). Geological Society of America Special Paper.
- Schumann, M., & Joosten, H. (2008). *Global Peatland Restoration Manual*. Institute of Botany and Landscape Ecology, Greifswald University.
- Schwertmann, U., & Murad, E. (1983). Effect of pH on the formation of goethite and hematite from ferrihydrite. *Clays and Clay Minerals*, 31(4), 277–284.
- Schwertmann, U., & Taylor, R. M. (1989). Iron Oxide. Dalam J. B. Dixon & S. B. Weed (Ed.), *Mineral in Environment* (379–438). 2<sup>nd</sup> edition. Soil Science Society of America Book series I. SSSA.
- Setiadi, B. (1995). *Beberapa aspek agronomi budidaya Kedelai di lahan gambut: suatu kajian tanggapan tanaman terhadap amelioran*. Ringkasan Desertasi UGM.
- Setiadi, B. (1999). *Abu vulkanis sebagai amelioran lahan gambut kasus di kawasan transmigrasi*. BPPT.
- Setiawan, H. K. (1991). *Akibat pemampatan atas sifat sifat hidrologi gambut sehubungan dengan tingkat perombakan* [Skripsi tidak diterbitkan]. Universitas Gadjah Mada.
- Setiawan, B. I. (2015, 16 Juni 2015). *Konsepsi dan strategi pengembangan Polder Alabio*. [Presentasi makalah] pada FGD Revitalisasi Pertanian Polder alabio.
- Setyanto, P., Sopiawati, T., Andriani, A. T., Purnomo, A., Hervani, A., Wahyuni, S., & Mihardjaka, A. (2014). Emisi Gas rumah kaca dari penggunaan lahan gambut dan pemberian bahan amelioran: sintesis lima lokasi penelitian. Dalam A. Wahardjaka (Ed.), *Proseding seminar nasional pengelolaan berkelanjutan lahan gambut terdegradasi untuk mitigasi emisi GRK dan peningkatan nilai ekonomi* (45–62). Balitbangtan. Kementan.
- Seybold, C. A., Grossman, R. B., & Reinsch, T. G. (2005). Predicting cation exchange capacity for soil survey using linear models. *Soil Science Society of America Journal*, 69, 856–863.

- Shamshuddin, J., Sarwani, M., Fauziah, C. I., & Van Ranst, E. (2004). A laboratory study of pyrite oxidation in acid sulfate soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 35(1 & 2), 117–129.
- Shamshuddin, J., Azura, A. E., Shazana, M. A. R. S., Fauziah, C. I., Panhwar, Q. A., & Naher, U. A. (2014). Properties and management of acid sulfate soils in Southeast Asia for sustainable cultivation of rice, oil palm, and cocoa. Dalam D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy* (91–142). Vol. 124. Academic Press.
- Shand, P., Appleyard, S., Simpson, S. L., Degens, B., & Mosley, L. M. (2018). National acid sulfate soils guidance: guidance for the dewatering of acid sulfate soils in shallow groundwater environments, Department of Agriculture and Water Resources.
- Shastry, S. V., Tran, D. V., Nguyen, V. N., & Nanda, J. S. (2000). Sustainable integrated riceproduction. Dalam J. S. Nanda (Ed.), *Rice breeding and genetics, research priorities and challenges* (53–72). Science Publishers, Inc. New Hamisphere.
- Sieffermann, R. G., Fournier, M., Truitomo, S., Saderman, M. T., & Semah, A. M. (1988). Velocity of tropical peat acumulation in Central Kalimantan Province, Indonesia. Dalam *Proceeding of the 8<sup>th</sup> International Peat congress* (1, 90–98). Leningrad, USSR, International Peat Society.
- Siegert, F., Böehm, H. D. V., Rieley, J. O., Page, S. E., Jauhiainen, J., Vasander, H., & Jaya. A. (2002). Peat fires in Central Kalimantan, Indonesia: Fire impacts and carbon release. Dalam J. O. Rieley, & S. E. Page (Ed.), *Peatlands for People, Natural Resources Function, and Sustainable Management* (142–154). BPPT dan Indonesian Peat Association, Jakarta.
- Simatupang, R. S. (2007). Masalah gulma dan cara pengelolaannya untuk meningkatkan produksi padi di lahan rawa pasang surut. Dalam Mukhlis, M. Noor, A. Supriyo, I. Noor, & R. S. Simatupang (Ed.), *Proseding seminar nasional pertanian lahan rawa: revitalisasi kawasan plg dan lahan rawa lainnya untuk membangun lumbung pangan nasional*. Kuala Kapuas.
- Simatupang, R. S., Nurita, & Nazemi, D. (2014). Inovasi teknologi penataan dan penyiapan lahan rawa pasang surut. Dalam D. Nursyamsi (Ed.), *Teknologi inovasi lahan rawa pasang surut mendukung kedaulatan pangan nasional* (49–72). Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Kementerian Pertanian.

- Simola, H., Pitkanen, A., & Turunen, J. (2012). Carbon loss in drained forestry peatlands in Finland, estimated by re-sampling peatlands surveyed in the 1980s. *European Journal of Soil Science*, 1–10.
- Simpson, S. L., Fitzpatrick, R. W., Shand, P., Angel, B. M., Spadaro D. A., & Mosley, L. (2010). Climate-driven mobilisation of acid and metals from acid sulfate soils. *Marine and Freshwater Research*, 61, 129–138.
- Simpson, S. L., Mosley, L. M., Batley, G. E., & Shand, P. (2018). National acid sulfate soils guidance: guidelines for the dredging of acid sulfate soil sediments and associated dredge spoil management, Department of Agriculture and Water Resources.
- Singh, G. (1992). Oil palm cultivation on peat soil in United Plantations Berhad. Dalam B. Y. Aminuddin, S. L. Tan, B. Aziz, J. Samy, Z. Salmah, H. Siti Petimah, & S. T. Choo (Ed.), *Tropical Peat. Proceedings of the International Symposium on Tropical Peatland* (6–12). MARDI.
- Smith, A. M. L., Hudson-Edwards, K. A., Dubbin, W. E., & Wrigh, K. (2006). Dissolution of jarosite  $[KFe_3(SO_4)_2(OH)_6]$  at pH 2 and 8: Insights from batch experiments and computational modelling. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70, 608–621.
- Sodano, M., Lerda, C., Nisticò, R., Martina, M., Magnaccab, G., Celia, L., & Said-Pullicino, D. (2017). Dissolved organik carbon retention by coprecipitation during the oxidation of ferrous iron. *Geoderma*, 307, 19–29.
- Soekardi, M., & Hidayat, A. (1987, 22–27 Agustus, 1987). Extent and distribution of peat soils of Indoensia. [Presentasi makalah] The third meeting of the cooperative for research on problem soils.
- Soepardi, G., & Surowinoto, S. (1982, 1–14 Nopember 1982). Pemanfaatan tanah gambut pedalaman, kasus bereng bengkel [Presentasi makalah]. Seminar Lahan Pertanian Se-Kalimantan di Palangkaraya,
- Soil Survey Staff. (1975). *Soil taxonomy, a basic system of soil classification for making and interpreting soil survey*. Agricultural Handbook No. 36. US Government Printing Offices.
- Soil Survey Staff. (2010). *Keys to soil taxonomy*. 11<sup>th</sup> edition. United States Department of Agriculture (USDA) and Natural Resources Conservation Service (NRCS).

- Soil Survey Staff. (2014). *Key to soil taxonomy*. 12<sup>th</sup> edition. United States Department of Agriculture (USDA) Natural Resources Conservation Service (NRCS).
- Soil Survey Staff. (2022). *Keys to soil taxonomy*. 13<sup>th</sup> edition. United States Department of Agriculture (USDA) Natural Resources Conservation Service.
- Sorensen, K. W. (1993). Indonesian peat swamp forest and their role as carbon sink. *Chemosphere*, 27(6), 1065–1082.
- Stephens, J. C., & Speir, W. H. (1969). Subsidence of organic soils in the USA. *Land Subsidence*, 2, 523–534.
- Strakova, P., Niemi, R. M., Freeman, C., Peltoniemi, K., Toberman, H., Heiskanen, I., Fritze, H., & Laiho, R. (2011). Litter type affects the activity of aerobic decomposers in a boreal peatland more than site nutrient and water table regimes. *Biogeosciences*, 8, 2741–2755.
- Stucky, J. W. (2006). Properties and behaviour of iron in clay minerals. Dalam F. Bergaya, B. K. G. Theng, & G. Lagaly (Ed.), *HandBook of Clay Science*. Development in clay science vol. 1.
- Subagyo, H., Sudjadi, M., Suryatna, E., & Dai, J. (1990). Wet soils of Indonesia. Dalam J. M. Kimble (Ed.), *Proceeding 8<sup>th</sup> Int. soil correl. meeting (VIII ISCOM): Characterization, Classification, and Utilization of Wet Soils* (248–259). Louisiana and Texas. USDA, SCS, National Soil Survey Center, Lincoln, NE.
- Subagyo, H. (1997). Potensi pengembangan dan tata ruang lahan rawa untuk pertanian. Dalam; A. S. Karama (Ed.), *Prosiding Simposium Nasional dan Kongres VI PERAGI* (17–55).
- Subagyo, H. (2006). Karakteristik dan penyebaran lahan rawa. Dalam D. S. Ardi, U. Kurnia, H.S. Mamat, W. Hartatik, & D. Setyorini (Ed.), *Karakteristik dan Pengelolaan Lahan Rawa* (1–22). Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumber daya Lahan Pertanian.
- Subagyo, H., Noor, M., Yusuf, W. A., & Khairullah, I. (2015). *Perspektif pertanian lahan rawa: Mendukung kedaulatan pangan*. IAARD Press. 108 p.

- Subagyono, K., Abdurachman A., & Suharta, N. (2001). Effects of puddling various soil types by harrows on physical properties of new developed irrigated rice areas in Indonesia. *Journal of Experimental Botany*, 53(366), 13–15.
- Subagyono, H., Suatika, I. W., & Ananto, E. E. (1999). Penataan lahan dan tata air mikro: Pengembangan SUP Sumatra Selatan. Proyek Pengembangan Sistem Usaha Pertanian (SUP) Lahan Pasang Surut Sumatra Selatan. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian.
- Subiksa, I. G. M. (2000). Ameliorasi lahan gambut untuk usaha tani yang berkelanjutan. Dalam B. Prayudi, M. Sabran, I. Noor, I. Ar-Riza, S. Partohardjono & Hermanto (Ed.), *Prosiding seminar nasional penelitian dan pengembangan pertanian di lahan rawa*. ISDP. Puslitbangtan. Badan Litbang Pertanian.
- Subiksa, I. G. M., Suganda, H., & Purnomo, J. (2009). *Pengembangan formula pupuk untuk lahan gambut sebagai penyedia hara dan menekan emisi gas rumah kaca (GRK)*. Laporan Penelitian Kerja Sama antara Balai Penelitian Tanah dengan Departemen Pendidikan Nasional.
- Subiksa, I. G. M. (2013). PUGAM: Specific fertilizer for peat land to reduce carbon emission and increased soil productivity. Dalam E. Husen, D. Nursyamsi, M. Noor, A. Fahmi, Irawan, & I. G. P. Wigena (Eds.), *Proceeding of international workshop on sustainable management of lowland for rice production* (166–175). Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian.
- Subiksa, I. G. M., Nugroho, K., Sholeh, & Widjaja-Adhi, I. P. G. (1997). The effect of ameliorants on the chemical properties and productivity of peat soil. Dalam J. O. Rieley, & S. E. Page (Ed.), *Proceedings of the international symposium on biodiversity, environmental importance of tropical peat and peatlands; Biodiversity and sustainability of tropical peatlands* (321–326). Samara Publisher.
- Subroto, & Yusrani, A. (2005). *Kesuburan dan pemanfaatan tanah*. Bayumedia Publishing.
- Sudjianto, A. T., Suryolelono, K. B., Rifa'i, A., & Mochtar, I. B. (2011). The effect of water content change and variation suction in behavior swelling of expansive soil. *International Journal Civil Environmental Engineering*, 11(3), 11–17.

- Suhardjo, H., & Driessen, P. M. (1977). Reclamation and use of Indonesian lowland peats and their effects on soil conditions. *Proceedings Third Asean Soil Conference, Kuala Lumpur* (419–424).
- Suhardjo, H., & Widjaja-Adhi, I. P. G. (1977). Chemical characteristics of the upper 30 cm of peat soils from Riau. *Proceedings ATA 106 midterm seminar. Peat and Podzolics soils and their potential for agriculture in Indonesia* (74–92). Soil Research Institute.
- Sukitprapanon, T., Suddhiprakarn, A., Kheoruenromne, I., Anusontpornperm, S., & Gilkes, R. J. (2015). Forms of acidity in potential, active and post-active acid sulfate soils in Thailand. *Thailand Journal of Agricultural Science*, 48(3), 133–146.
- Sukitprapanon, T., Suddhiprakarn, A., Kheoruenromne, I., Anusontpornperm, S., & Gilkes, R. J. (2016). A comparison of potential, active and post-active acid sulfate soils in Thailand. *Geoderma Regional*, 7, 346–356.
- Sulaiman, A. A., Subagyono, K., Alihamsyah, T., Noor, M., Hermanto, Muharram, A., Subiksa, I. G. M., & Suastika, I. W. (2018). *Membangkitkan lahan rawa, membangun lumbung pangan indonesia*. Buku Seri Pembangunan Pertanian 2015–2018. IAARD Press.
- Sundman, A., Karlsson, T., Sjöberg, S., & Persson, P. (2016). Impact of iron–organic matter complexes on aqueous phosphate concentrations. *Chemical Geology*, 426, 109–117.
- Sundstrom, E., Magnusson, T., & Hanell, B. (2000). Nutrient concentrations in drained peatlands along a north–south climatic gradient in Sweden. *Forest Ecology and Management*, 216, 149–161.
- Sullivan, L. A. (2012). Acid sulfate soils and their management: A global perspective. *Dalam*; P. Österholm, M. Yli-Halla, & P. Edén (Eds.). *Proceedings 7<sup>th</sup> International Acid Sulfate Soil Conference, Towards Harmony between Land Use and the Environment* (127–129).
- Sullivan, L. A., Ward, N. J., Toppler, N., & Lancaster, G. (2018). *National acid sulfate soils guidance: National acid sulfate soils sampling and identification methods manual*, Department of Agriculture and Water Resources.
- Sullivan, L. A., & Bush, R. T. (1997). Quantitative elemental microanalysis of rough-surfaced soil specimens in the scanning electron microscope using a peak-to-background method. *Soil Science*, 162, 749–757.

- Sumardi, Kasli, Kasim, M., Syarif, A., & Akhir, N. (2007). Respons padi sawah pada teknik budidaya secara aerobik dan pemberian bahan organik. *Jurnal Akta Agrosia*, 10(1), 65.
- Suriadikarta, D. A., & Setyorini, D. (2006). Teknologi pengelolaan lahan sulfat masam. Dalam D. S. Ardi, U. Kurnia, H. S. Mamat, W. Hartatik, & D. Setyorini (Ed.), *Karakteristik dan pengelolaan lahan rawa* (117–150). Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumber daya Lahan Pertanian.
- Sutikno, H., & Noor, M. (1997). Strategi pelestarian lahan gambut pasang surut. *Alami*, 2(1), 21–27.
- Suryantini. (2005). Serapan N, P dan K tanaman petsai dengan pemberian lumpur laut dan pupuk kandang pada tanah gambut. *Journal Agrosains*, 2(1), 14–28.
- Suryanto. (1994). *Improvement of the P nutrient status of tropical ombrogenous peat soils from Pontianak, West Kalimantan, Indonesia* [Disertasi tidak diterbitkan]. RUG, Ghent.
- Suwondo, Sabiham, S., Sumardjo, & B. Paramudya, (2012). Efek pembukaan lahan terhadap karakteristik biofisik gambut pada perkebunan kelapa sawit di Kabupaten Bengkalis. *Jurnal Natur Indonesia*, 14(2), 143–149.
- Swayze, G. A., Desborough, G. A., Smith, K. S., Lowers, H. A., Hammarstrom, J. M., Diehl, S. F., Leinz, R. W., & Driscoll, R. L. (2008). Understanding jarosite—from mine waste to mars Dalam P. L. Verplanck (Ed.), *Understanding contaminants associated with mineral deposits*. U.S. Geological Survey Circular 1328.
- Sylla, M., & Toure, M. (1988). *Edaphic constraints, current remedies and rice research requirements*.
- Sylla, M., Van Breemen, N., Fresco, L., Stein, A., & Dixon, C. (1993). Spatial and temporal variability of soil constraints along the Great Scarcies River, Sierra Leone. Dalam D. L. Dent & M. E. F. Van Mensvoort (Ed.), *Selected papers of the Ho Chi Minh City symposium on acid sulfate soils* (247–259). Publication No. 53. ILRI.
- Sylla, M. (1994). *Soil salinity and acidity: spatial variability and effects on rice production in West Africa's Mangrove zone* [Disertasi tidak diterbitkan]. Wageningen University.

- Takada, M., Mishima, Y., & Natsume, S. (2009). Estimation of surface soil properties in peatland using ALOS/PALSAR. *Landscape Ecology Engineering*, 5, 45–58.
- Takahashi, H., Shimada, S., & Ibie, B. I. (2002). Annual changes of water balance and a drought index in a tropical peat swamp forest of Central Kalimantan, Indonesia. Dalam J. O. Rieley & S. E. Page (Ed.), *Peatlands for people, natural resources function, and sustainable management*. BPPT dan Indonesian Peat Association.
- Tan, K. H. (2008). *Soils in the Humid Tropics and Monsoon Region of Indonesia*. CRC Press, Taylor and Francis Group.
- Taufik, M. (1997). *Pengaruh pengapuran dan pengeringan terhadap watak kelengasan tanah gambut ombrogen* [Skripsi tidak diterbitkan]. Universitas Gadjah Mada.
- Team MP-EMRP. (2008). *Master plan for the conservation and development of the ex mega rice project in Central Kalimantan*. GOI-RNE.
- The State of Victoria Department of Sustainability and Environment. (2010). *Victorian best practice guidelines for assessing and managing coastal acid sulfate soils*. The State of Victoria Department of Sustainability and Environment.
- Thomas J. E., Skinner, W. M., & Smart, R. S. C. (2001). A mechanism to explain sudden changes in rates and products for pyrrhotite dissolution in acid solution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65, 1–12.
- Tie, Y. L. (1982). *Soil classification in Sarawak*. Technical paper No. 6. Soils Division Research Branch, Department of Agriculture.
- Tie, Y. L., & Lim, J. S. (1992). Characteristics and classification of organic soils in Malaysia. Dalam B. Y. Aminudin (Ed.). *Proceedings of the International Symposium on Tropical Peatland*, Malaysia Agricultural Research and Development Institute, Kuching, Sarawak.
- Trueman, A. M., McLaughlin, M. J., Mosley, L. M., & Fitzpatrick, R. W. (2020). Composition and dissolution kinetics of jarosite-rich segregations extracted from an acid sulfate soil with sulfuric material. *Chemical Geology*, 543, 119606.
- Umar, S., & Alihamsyah, T. (2014). *Mekanisasi pertanian: untuk produksi padi di lahan rawa pasang surut*. Balittra.

- Umar, S., Noor, M., & Noorginayuwati. (2014). Kearifan lokal untuk peningkatan dan keberlanjutan produksi pertanian di lahan gambut. Dalam F. Agus, M. Anda, A. Jamil, & Masganti (Ed.), *Lahan gambut Indonesia: Pembentukan, karakteristik, dan potensi mendukung ketahanan pangan* (163–188). IAARD Press.
- Unger, M., Motavalli, P. P., & Muzika, R. M., (2009). Changes in soil chemical properties with flooding: A field laboratory approach. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 131(1–2), 105–110.
- Unger, M., Kennedy, A. C., & Muzika, R. M. (2009). Flooding effects on soil microbial communities. *Applied Soil Ecology*, 42, 1–8.
- Undang-undang (UU) Nomor 18 Tahun 2004 tentang Perkebunan. (2004). <https://peraturan.bpk.go.id/Details/40516/uu-no-18-tahun-2004>
- United Nations Development Programme (UNDP). (2006). *Malaysia's peat swamp forests, conservation and sustainable use*. United Nations Development Programme Malaysia. 33 p.
- Uomori, M. & Yamaguchi, T. (1997). The water absorption ability of peat. *International Peat Journal*, 7, 41–44.
- Urbanova, Z., Picek, T., & Barta, J. (2011). Effect of peat re-wetting on carbon and nutrient fluxes, greenhouse gas production and diversity of methanogenic archaeal community. *Ecological Engineering*, 37, 1017–1026.
- Utami, S. N. H. (2010). *Pemulihan gambut hidrofobik dengan surfaktan dan amelioran, serta pengaruhnya terhadap serapan p oleh jagung* [Disertasi tidak diterbitkan]. Universitas Gadjah Mada.
- Vadari, T., Haryono, Nugroho, K., Widjaja-Adhi, I. P. G., & Setiadi. B. (1995). Prospek penggunaan abu vulkanis untuk meningkatkan produktivitas lahan gambut di Kalimantan Barat. Dalam D. Santoso (Ed.). *Prosiding pertemuan teknis penelitian tanah dan agroklimat, bidang konservasi tanah dan air, dan agroklimat*. Puslittanak.
- Valat, B., Jouany, C., & Riviere, L. M. (1991). Characterization of the wetting properties of air-dried peats dan composts. *Soil Science*, 152(2), 100–107.
- Vegas-Vilarrúbia, T., Baritto, F., & Meleán, G. (2008). A critical examination of some common field tests to assess the acid-sulphate condition in soils. *Soil Use Management*, 24(1), 60–68.

- Verdonk, O., Cappaert, I., & De Boodt, M. (1973). The properties of the normally used substrates in the region Ghent. Dalam M. De Boodt (Ed.), *Proceedings symposium artificial media in horticulture; Technical communication of the international society for horticulture science (1930–1944)*.
- Verry, E. S., Boelter, D. H., Päivänen, J., Nichols, D. S., Malterer, T., & Gafni, A. (2011). Physical properties of organic soils. Dalam R. Kolka, S. Sebestyen, E. S. Verry, & K. Brooks (Ed.), *Peatland biogeochemistry and watershed hydrology at the Marcell experimental forest (135–176)*. CRC Press.
- Vile, M. A., Wieder, R. K., Ivkovic, T. Z., Scott, K. D., Hartsock, J. A., Iosue, C. L., Quinn, J. C., Fillingim, H. M., Popma, J. M. A., Dynarski, K. A., Jackman, T. R., Albright, C. M., & Wykoff, D. D. (2014). N<sub>2</sub>-fixation by methanotrophs sustains carbon and nitrogen accumulation in pristine peatlands. *Biogeochemistry*, 121, 317–328. DOI 10.1007/s10533-014-0019-6
- Virtanen, S., Puustinen, M., & Yli-Halla, M. (2017). Oxidation of iron sulfides in subsoils of cultivated boreal acid sulfate soil fields—based on soil redox potential and pH measurements. *Geoderma*, 308, 252–259.
- Vithana, C. L. (2014). *Assessment and behaviour of secondary iron(III) minerals in acid sulfate soil materials* [Disertasi tidak diterbitkan]. Southern Cross University.
- Vithana, C. L., Sullivan, L. A., Burton, E. D., & R. T. Bush, (2015). Stability of schwertmannite and jarosite in an acidic landscape: Prolonged field incubation. *Geoderma*, 239–240, 47–57.
- Waclimad (Water Management for Climate Change Mitigation and Adaptive Development in the Lowlands). (2012). *Lowland Definition*. Working Paper 1. Bappenas–Euroconsult MatMacDonald–World Bank.
- Wahyunto, Ritung, S., & Subagjo, H. (2005). *Peta sebaran lahan gambut, luas dan kandungan karbon di Kalimantan 2000–2002*. Wetlands International–Indonesia Programme & Wildlife Habitat. Canada (WHC).
- Wahyunto, Suparto, Bambang, H., & Bhekti, H. (2006). *Sebaran Lahan Gambut, Luas dan Cadangan karbon Bawah Permukaan di Papua*. Wetlands International-Indonesia Programme.

- Wang, Y., Liu, X., Butterly, C., Tang, C., & Xu, J. (2013). pH change, carbon and nitrogen mineralization in paddy soils as affected by Chinese milk vetch addition and soil water regime. *Journal Soils and Sediment*, 13, 654–663.
- Wang, X., Liu, F., Tan, W., Li, W., Feng, X., & Sparks, D. L. (2013). Characteristics of phosphate adsorption–desorption onto ferrihydrite: comparison with well–crystalline Fe (hydr)oxides. *Soil Science*, 178(1), 1–11.
- Wang, M. & Moore, T. R. (2014). Carbon, nitrogen, phosphorus, and potassium stoichiometry in an ombrotrophic peatland reflects plant functional type. *Ecosystems*, 17, 673–684. DOI: 10.1007/s10021-014-9752-x
- Wang, X., C. Westbrook, & A. Bedard–Haughn. (2016). Effect of mineral horizons on spatial distribution of soil properties and N cycling in a mountain. *Geoderma*, 273, 73–82.
- Wang, Y., Wang, H., He, J. S., & Feng, X. (2017). Iron-mediated soil carbon response to water-table decline in an alpine wetland. *Nature Communications*, 8, 15972. DOI: 10.1038/ncomms15972.
- Watanabe, T., Man, L. H., Vien, D. M., Khang, V. T., Ha, N. N., Linh, T. B., & Ito, O. (2009). Effects of continuous rice straw compost application on rice yield and soil properties in the Mekong Delta. *Soil Science and Plant Nutrition*, 55, 754–763.
- Ward, N. J. (2004). *Sulfide oxidation in some acid sulfate soil materials* [Disertasi tidak diterbitkan]. Southern Cross University.
- Ward, N. J., Sullivan, L. A., & Bush, R. T. (2004). Soil pH, oxygen availability, and the rate of sulfide oxidation in acid sulfate soil materials: Implications for environmental hazard assessment. *Australian Journal of Soil Research*, 42(5–6), 509–514.
- Warman, G. R. & Kristiana, R. (2018). Mengkaji sistem tanam tumpang sari tanaman semusim. *Proceeding Biology Education Conference*, 15(1), 791-794.
- Weerd, V. H. D. (2000). *Transport of Reactive Carriers and Contaminants in Groundwater Systems, A dynamic competitive happening* [Disertasi tidak diterbitkan]. Wageningen University.

- Wei, X., Zhu, Z., Wei, L., Wu, J., & Ge, T. (2019). Biogeochemical cycles of key elements in the paddy-rice rhizosphere: Microbial mechanisms and coupling processes. *Rhizosphere*, 10, 100145.
- Weiss, D., Shotyky, W., Rieley, J. O., Page, S. E., Gloor, M., Reese, S., & Martinez-Cortizas, A. (2002). The geochemistry of major and selected trace elements in a forested peat bog, Kalimantan, S.E. Asia, and its implications for past atmospheric dust deposition. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66(13), 2307–2323.
- Welch, S. A., Christy, A. G., Kirste, D., Beavis, F. R., & Beavis, S. G. (2007). Jarosite dissolution I—Trace cation flux in acid sulfate soils. *Chemical Geology*, 245, 183–187.
- Welch, S. A., Kirste, D., Christy, A. G., Beavis, F. R., & Beavis, S. G. (2008). Jarosite dissolution II—Reaction kinetics, stoichiometry and acid flux. *Chemical Geology*, 254, 73–86.
- Weng, L., Van Riemsdijk, W. H., & Hiemstra, T. (2008). Cu<sup>2+</sup> and Ca<sup>2+</sup> adsorption to goethite in the presence of fulvic acids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72, 5857–5870.
- Widiatmoko, W. P., Astiani, D., & Muin, S. (2022). Faktor penyebab kebakaran hutan dan lahan gambut dan upaya pengendalian masyarakat di lanskap bentang pesisir padang tikar Kabupaten Kubu Raya. *Jurnal Hutan Lestari*, 10(4), 901–916.
- Widjaja-Adhi, I. P. G. (1976, 24 April 1976) Tinjauan hasil peninjauan keadaan hara tanah di daerah pasang surut [Presentasi Makalah]. Seminar internal lembaga penelitian tanah.
- Widjaja-Adhi, I. P. G. (1992). Development of deep tropical peatland for perennial crop. Dalam B. Y. Aminuddin, S. L. Tan, B. Aziz, J. Samy, Z. Salmah, H. Siti Petimah, & S. T. Choo (Ed.), *Tropical Peat. Proceedings of the International Symposium on Tropical Peatland* (380–384). MARDI.
- Widjaja-Adhi, I. P. G., Nugroho, K., Ardi, D. S., & Karama, S. (1992). Sumber daya lahan rawa: potensi, keterbatasan dan pemanfaatan. Dalam S. Partoharjono & M. Syam. (Ed.), *Pengembangan terpadu lahan rawa pasang surut dan lebak. SWAMPS II. Puslitbangtan*.

- Widjaja-Adhi, I. P. G. (1995, 26–30 Juni 1995). *Pengelolaan tanah dan air dalam pengembangan sumber daya lahan rawa untuk usahatani berkelanjutan dan berwawasan lingkungan* [Presentasi Makalah]. Pelatihan calon pelatih untuk pengembangan pertanian di daerah pasang surut, Karang Agung Ulu, Sumatra Selatan. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan.
- Widjaya-Adhi, I. P. G. (1995, 7-8 November 1995). *Potensi, Peluang dan Kendala Perluasan Areal Pertanaman di Lahan Rawa Kalimantan dan Irian Jaya* [Presentasi Makalah]. Seminar perluasan areal pertanian di KT I, PII, Serpong.
- Widjaja-Adhi, I. P. G., & Alihamsyah, T. (1998). Pengembangan lahan pasang surut; Potensi, prospek, dan kendala serta teknologi pengelolaannya untuk pertanian. Dalam *Prosiding seminar nasional dan pertemuan tahunan komda HITI* (51–72).
- Widjaja-Adhi, I. P. G., Suriadikarta, D. A. Sutriadi, M. T., Subiksa, I. G.M., & Suastika, I. W. (2000). Pengelolaan, pemanfaatan dan pengembangan lahan rawa. Dalam A. A. Mihardja. (Ed.), *Sumber daya lahan Indoensia dan pengelolaaannya* (127–164). Balitbangtan.
- Wikipedia. (2016). Diakses pada 17 Nopember 2016, dari <https://en.wikipedia.org/wiki/Jarosite>.
- William, E., Saleh, M., & Raihan, S. (2010). Pertumbuhan dan hasil jagung manis (*Zea mays* Saccharata Sturt) di lahan rawa pasang surut sulfat masam di Kalimantan Selatan. Dalam B. S. Sutiman, A. Mulyono, E. B. Minarno, C. Crysdiyan, F. Rosi, T. Kustono A. E. Setyawati, N. Avicena, A. Aziz, M. Jamhuri, Y. E. Putrie & L. Maslucha. (Ed.), *Green Technology for Better Future* (21–23). Fakultas Sain dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim.
- Wilkin, R. T., & Barnes, H. L. (1996). Pyrite formation by reactions of iron monosulfides with dissolved inorganic and organic sulfur species. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(21), 4167–4179.
- Willet, I. R., Melville, M. D., & White, I. (1993). Acid drain waters from potential acid sulphate soils and their impact on estuarine ecosystems. Dalam D. L. Dent & M. E. F. Van Mensvoort (Ed.), *Selected papers of the Ho Chi Minh City symposium on acid sulfate soils* (419–425). Publication No. 53. ILRI.

- Wilson, C. A., Cloy, J. M., Graham, M. C., & Hamlet, L. E. (2013). microanalytical study of iron, aluminium and organic matter relationships in soils with contrasting hydrological regimes. *Geoderma*, 202–203, 71–81.
- Winkler, P., Kaiser, K., Thompson, A., Kalbitz, K., Fiedler, S., & Jahn R., (2018). Contrasting evolution of iron phase composition in soils exposed to redox fluctuations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 235, 89–102.
- Wolt, J. D. (1994). *Soil solution chemistry. Application to environmental science and agriculture*. John Willey & Sons, Inc.
- Wright, R. B., Lockaby, B. G., & Walbridge, M. R. (2001). Phosphorus availability in an artificially flooded Southeastern Floodplain forest soil. *Soil Science Society of America Journal*, 65, 1293–1302.
- Wüst, R. A. J., Ward, C. R., Bustin, R. M., & Hawke, M. I. (2002). Characterization and quantification of inorganic constituents of tropical peats and organic-rich deposits from Tasek Bera (Peninsular Malaysia): implications for coals. *International Journal of Coal Geology*, 49, 215–249.
- Wüst, R. A. J., Bustina, R. M., & Lavkulich, L. M. (2003). New classification systems for tropical organic-rich deposits based on studies of the Tasek Bera Basin, Malaysia. *Catena*, 53, 133–163. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(03\)00022-5](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(03)00022-5)
- Wüst, R. A. J., Rieley, J. O., Page, S. E., & Kaars, V. D. (2007). Peatland evolution in S.E. Asia over the last 35.000 years; implications for evaluating their carbon storage potential. Dalam J. O. Rieley, C. J. Banks & B. Radjagukguk (Ed.), *Proceedings of the international symposium and workshop on tropical peatland* (25–40).
- Xu, J. M., Tang, C., & Chen, Z. L. (2006). The role of plant residues in pH change of acid soils differing in initial pH. *Soil Biology and Biochemistry*, 38, 709–719.
- Yan, F., Schubert, S., & Mengel, K. (1996). Soil pH increase due to biological decarboxylation of organic anions. *Soil Biology and Biochemistry*, 28, 617–624.

- Yan, J., Jiang, T., Yao, Y., Lu, S., Wang, Q., & Wei, S. (2016). Preliminary investigation of phosphorus adsorption onto two types of iron oxide-organic matter complexes. *Journal of Environmental Sciences*, *42*, 152–162.
- Yan, X., Wei, Z., Hong, Q., Lu, Z., & Wu, J. (2017). Phosphorus fractions and sorption characteristics in a subtropical paddy soil as influenced by fertilizer sources. *Geoderma*, *295*, 80–85.
- Yang, W. H., Weber, K. A., & Silver, W. L. (2012). Nitrogen loss from soil through anaerobic ammonium oxidation coupled to iron reduction. *Nature Geoscience*, *5*, 538–541.
- Ye, Y., Volker, C., & Wolf-Gladrow, D. A. (2009). A model of Fe speciation and biogeochemistry at the Tropical Eastern North Atlantic Time-Series Observatory site. *Biogeosciences*, *6*, 2041–2061.
- Yin, A., Gao, C., Zhang, M., Wu, P., & Yang, X. (2017). Rapid changes in phosphorus species in soils developed on reclaimed tidal flat sediments. *Geoderma*, *307*, 46–53.
- Yu, K., & Patrick Jr, W. H. (2003). Redox range with minimum nitrous oxides and methane production in rice soil under different pH. *Soil Science Society of America Journal*, *67*, 1952–1958.
- Yuan, C. (2015). *Remediation of acid sulphate soils by organic matter addition* [Disertasi tidak diterbitkan]. School of Agriculture Food and Wine. Adelaide University.
- Yuan, C., Mosley, L. M., Fitzpatrick, R. W., & Marschner P. (2015). Amount of organic matter required to induce sulfate reduction in sulfuric material after re-flooding is affected by soil nitrate concentration. *Journal of Environmental Management*, *151*, 437–442.
- Yuan, C., Fitzpatrick, R. W., Mosley, L. M., & Marschner, P. (2015). Sulfate reduction in sulfuric material after re-flooding: Effectiveness of organic carbon addition and pH increase depends on soil properties. *Journal of Hazardous Materials*, *298*, 138–145.
- Yuan, C., Marschner, P. Fitzpatrick, R. W., & Mosley, L. M. (2016). Global risks of severe acidification of acid sulfate soils due to increasing drought and the importance of organic matter for mitigation. Dalam Soil Science Society of China (Ed.), *Soil science and ecological civilization* (176–186). Northwest A & F University Press.

- Yuan, C., Mosley, L. M., Fitzpatrick, R. W., & Marschner P. (2016). Organic matter addition can prevent acidification during oxidation of sandy hypersulfidic and hyposulfidic material: Effect of application form, rate and C/N ratio. *Geoderma*, 276, 26–32.
- Zachara, J. M., Fredrickson, J. K., Shu–Mei, L., Kennedy, D. W., Smith, S. C., & Gassman, P. L. (1998). Bacterial reduction of crystalline Fe<sup>3+</sup> oxides in single phase suspensions and subsurface materials. *American Mineralogist*, 83, 1426–1443.
- Zak, D., Wagner, C., Payer, B., Augustin, J., & Gelbrecht, J. (2010). Phosphorus mobilization in rewetted fens: The effect of altered peat properties and implications for their restoration. *Ecological Applications*, 20, 1336–1349.
- Zakiah, S., & Fahmi, A. (2020). Peran sifat tanah awal dalam perubahan sifat kimia tanah sulfat masam akibat aplikasi jerami padi. *Jurnal Agri Peat*, 1(2), 104–116.
- Zahrai, S. K., Madden, M. E. E., Madden, A. S., & Rimstidt, J. D. (2013). Na–jarosite dissolution rates: The effect of mineral composition on jarosite lifetimes. *Icarus*, 223, 438–443.
- Zhang, G., Dong, H., Jiang, H., Kukkadapu, R. K., Kim, J., Eberl, D., & Xu, Z. (2009). Biomineralization associated with microbial reduction of Fe<sup>3+</sup> and oxidation of Fe<sup>2+</sup> in solid minerals. *American Mineralogist*, 94, 1049–1058.
- Zhang, J. Z., & Huang, X. (2007). Relative importance of solid–phase phosphorus and iron on the sorption behavior of sediments. *Environmental Science and Technology*, 41, 2789–2795.
- Zhu, L., Lin, C., Wu, Y., Lu, W., Liu, Y., Ma, Y., & Chen, A. (2008). Jarosite–related chemical processes and water ecotoxicity in simplified anaerobic microcosm wetlands. *Environmental Geology*, 53, 1491–1502.
- Zin, K. P., Lim, L. H., Mallikarjunaiah, T. H., & Bandara, J. M. R. S. (2015). Chemical properties and phosphorus fractions in profiles of acid sulfate soils of major rice growing areas in Brunei Darussalam. *Geoderma Regional*, 6, 22–30.

## Tentang Penulis



### **Arifin Fahmi**

Ia lahir di Banjarmasin, Kalimantan Selatan pada November 1976. Ia menyelesaikan pendidikan S-1 di Jurusan Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Lambung Mangkurat (2000), S-2 Ilmu Tanah pada Program Pascasarjana Fakultas Pertanian Universitas Gadjah Mada (2008), dan S-3 Ilmu Pertanian pada Program Doktorat Universitas Gadjah Mada (2012). Ia pernah bekerja sebagai peneliti di Balai Penelitian Pertanian Lahan Rawa (Balittra) Banjarbaru, Kalimantan Selatan, pada tahun 2001 sampai 2021. Selanjutnya, mulai tahun 2022 hingga saat ini, ia bekerja sebagai peneliti di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN).

Selama berkarier, ia telah menghasilkan berbagai karya tulis ilmiah yang tersebar di berbagai jurnal, prosiding, dan sebagai bagian dari buku teks. Beberapa karya tulis ilmiah yang sudah diterbitkan dalam 5

tahun terakhir, antara lain “Indigenous Technology of Banjarese-Local Rice Cultivation System: A Lesson Learned for Acid Sulphate Soils Management”; “Coastal Acid-Sulfate Soils of Kalimantan, Indonesia, for Food Security: Characteristics, Management, and Future Directions”; “Fe-P Pools as Phosphorus Source for Rice in Acid Sulfate Soils”; “A Century of Traditional Rice Farming in Tidal Swamplands of South Kalimantan, Indonesia: Its Impact on Breeding and Conservation Program”; “Natural Wet Ponds’ Role as Fresh Water Storage in Tropical Environment” (*Clean Water and Sanitation - Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals*, Springer Book); “Ameliorasi Tanah Sulfat Masam untuk Budidaya Padi” dalam buku *Inovasi Teknologi Lahan Rawa*; “Karakteristik Lahan Rawa” dalam buku *Agroekologi Rawa*; “The Role of Peat Decomposition Stage on Iron Solubility and Distribution in Tidal Swamps”; “The Influence of Peat Layer Above Sulphidic Material on Iron Dynamic in Wetland”; “Peran Sifat Tanah Awal dalam Perubahan Sifat Kimia Tanah Sulfat Masam Akibat Aplikasi Jerami Padi”; “Impact of Land Reclamation on Acid Sulphate Soil and Its Mitigation”; “The Utilization of Agricultural Waste for Peatland Management”; “In Case Chili Cultivation”; “The Interaction of Peat and Sulphidic Material as Substratum in Wetland: Ash Content and Electrical Conductivity Dynamic”; “The Role of Land Inundation Type of Tidal Swamp Land on The Chemical Properties of Potential Acid Sulphate Soils Under Fertilizer and Lime Application”; “Peranan Lapisan Gambut pada Dinamika Fraksi Besi di Lahan Pasang Surut”; “Environmental Friendly Management of Acid Sulphate Soils, The Interaction of Peat Layer and Sulphidic Materials as Substratum”; “A Natural Equilibrium for Nutrients and Metals in Wetland”; “Pengaruh Lapisan Gambut di Atas Bahan Sulfidik Terhadap Dinamika Kelarutan Fe di Lahan Gambut”; dan “Fraksi Besi dan Pengaruhnya Terhadap Kelarutan Fosfor di Lahan Rawa”.

Dalam melaksanakan tugasnya sebagai peneliti, ia aktif menjalin kerja sama penelitian dengan berbagai instansi/lembaga, baik dari dalam maupun luar negeri, antara lain proyek penelitian Tropical Peat Biochemical Interaction with Acid Sulphate Soil (TROPEAS) bersama University of Helsinsky (Finlandia), Universitas Gadjah

Mada (Indonesia), Cantho University (Vietnam), dan Universitas Palangka Raya (Indonesia). Ia juga menjalankan proyek kerja sama penelitian berjudul "Study of Ecohydrology Approach on Peatland in Ex-Mega Rice Project Location in Central Kalimantan" bersama Asia-Pacific Centre for Ecohydrology (APCE)-UNESCO tahun 2017. Selain itu, ia juga mengikuti Scientific Exchange di Thailand pada tahun 2015 dan 2018, serta Vietnam pada tahun 2010, dan Training Analytical Instrument di Singapore pada tahun 2016.



### **Muhammad Noor**

Ia lahir di Banjarmasin, Kalimantan Selatan pada November 1957. Ia menyelesaikan pendidikan S-1 Jurusan Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Gadjah Mada (1984), S-2 Fakultas/Program Pascasarjana Institut Pertanian Bogor (1989), dan S-3 pada Program Doktor Universitas Gadjah Mada (2004). Ia dikukuhkan sebagai Profesor Riset bidang

Kesuburan Tanah Dan Biologi Tanah oleh Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) pada tahun 2014 sebagai Profesor Riset ke-451. Ia bekerja sebagai peneliti di Balai Penelitian Pertanian Lahan Rawa (Balittra) Banjarbaru, Kalimantan Selatan. Sejak tahun 2022, ia bekerja sebagai peneliti di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN).

Selama berkarier, ia telah menghasilkan berbagai karya tulis ilmiah yang tersebar pada berbagai jurnal, prosiding, buletin ilmiah, dan majalah ilmiah. Ia juga menulis dalam bentuk buku teks yang telah diterbitkan dalam 5 tahun terakhir, antara lain (1) *Debat Gambut: Ekonomi, Ekologi, Politik dan Kebijakan* (Penerbit Gajah Mada University Press [GMUP], 2016); (2) *Kebakaran Lahan Gambut: Dari Asap sampai Kanalisasi* (Penerbit GMUP, 2019); (3) *Pemanfaatan dan Pengelolaan Lahan Rawa: Kearifan, Kebijakan, dan Keberlanjutan* (Penerbit GMUP, 2021) yang ditulis bersama Yiyi Sulaeman; dan (4) *Trivia Rawa: Serba-Serbi Sumber Daya Lahan Rawa* yang ditulis bersama Destika Cahyana dan Muhrizal Sarwani.

Penghargaan yang telah ia raih, antara lain anugerah Agro Inovasi sebagai Inovator Luar Biasa Bidang Hak Cipta dan Merek oleh Menteri Pertanian pada tahun 2011 dan tanda jasa Karya Satya Lencana 30 tahun dari Pemerintah RI pada tahun 2016. Selain kerap menjadi narasumber pada berbagai lembaga pemerintah, swasta, LSM (NGO), ia juga mengajar dan membimbing mahasiswa tingkat sarjana (S-1) dan pascasarjana (S-2 dan S-3) di beberapa perguruan tinggi negeri dan swasta. Selain itu, ia juga aktif sebagai editor atau penyunting buku, dewan redaksi, dan mitra bestari pada beberapa jurnal dan majalah ilmiah nasional



### **Dedi Nursyamsi**

Ia lahir di Ciamis, Jawa Barat pada Juni 1964 sebagai anak ke-2 dari 5 bersaudara. Ia menyelesaikan S-1 Jurusan Tanah, Fakultas Pertanian, Institut Pertanian Bogor (1987), S-2 bidang nutrisi tanaman di Laboratory of Plant Nutrition, Graduate School of Agriculture, Hokkaido University, Jepang (2000), dan S-3 program studi ilmu tanah yang ditempuhnya di Sekolah Pascasarjana Institut Pertanian Bogor (2008). Ia menerima anugerah Profesor Riset di bidang Ilmu Tanah, Agroklimatologi, dan Hidrologi (2017) dan tanda kehormatan Satyalancana Karya Satya XX (2015) serta XXX (2020).

Ia menjabat sebagai Kepala Subbidang Program Puslitbang Tanah dan Agroklimat (2001–2003), Kepala Balai Penelitian Lingkungan Pertanian (2008–2012), Kepala Balai Penelitian Pertanian Lahan Rawa (2012–2014), Kepala Balai Besar Litbang Sumber Daya Lahan Pertanian (2014–2019), Staf Ahli Menteri Pertanian Bidang Infrastruktur (2019), dan Kepala Badan Penyuluhan dan Pengembangan Sumber Daya Manusia Pertanian (BPPSDMP) sejak tahun 2019 sampai sekarang.

Dalam melaksanakan tugasnya sebagai peneliti, ia aktif menjalin kerja sama penelitian dengan berbagai instansi swasta dan pemerin-

tah, baik dari dalam maupun luar negeri. Instansi dari dalam negeri, antara lain kementerian, lembaga riset, dan perguruan tinggi, serta swasta. Adapun instansi dari luar negeri, antara lain IFDC, IMPHOS, OCP, Chiba University, Hokkaido University, IRRI, JICA, dan NIAES. Selain itu, ia juga aktif membimbing mahasiswa S-1, S-2, dan S-3 dari berbagai perguruan tinggi di tanah air, baik negeri maupun swasta. Ia juga menghasilkan banyak karya tulis ilmiah yang terbit dalam jurnal, prosiding, dan buletin ilmiah, baik skala nasional maupun internasional. Beberapa karya tulis dalam bentuk buku teks, antara lain *Pedoman Pengelolaan Lahan Sulfat Masam untuk Pertanian Berkelanjutan* (Penerbit IAARD Press Jakarta-GMU Press, 2014); *Pedoman Pengelolaan Lahan Gambut untuk Pertanian Berkelanjutan* (Penerbit IAARD Press Jakarta-GMU Press, 2014); *Pedoman Pengelolaan Lahan Rawa Lebak untuk Pertanian Berkelanjutan* (Penerbit IAARD Press Jakarta-GMU Press, 2014); dan *Sistem Surjan: Model Pertanian Adaptif Perubahan Iklim* (IAARD Press, 2014).



### **Ani Susilawati**

Ia lahir di Kuala Kapuas pada November 1977. Ia menyelesaikan pendidikan S-1 di Fakultas Pertanian Universitas Lambung Mangkurat (2000) dan S-2 di Fakultas/Program Pascasarjana Universitas Gadjah Mada (2012). Ia menjabat sebagai Peneliti Ahli Madya bidang Ilmu Tanah, Agroklimatologi, dan Hidrologi di Balai Penelitian Pertanian

Lahan Rawa dan sebagai Sekretaris Himpunan Peneliti Indonesia (HIMPENINDO) wilayah Kalimantan Selatan.

Ia aktif dalam berbagai kegiatan seminar/*workshop*/FGD/temu teknis dan pelatihan skala daerah, nasional, dan internasional. Selama berkarier, ia telah menghasilkan berbagai karya tulis ilmiah yang tersebar dalam berbagai jurnal, prosiding, buletin ilmiah, dan majalah ilmiah populer. Ia merupakan penulis salah satu buku teks yang berjudul *Tanah Rawa: Pembentukan, Karakteristik, dan Pemanfaatannya*

untuk Pertanian (IAARD Press, 2017) dan turut menulis bagian buku bunga rampai dengan judul “Teknologi Inovasi Lahan Rawa Pasang Surut Mendukung Kedaulatan Pangan Nasional” (IAARD Press, 2014); “Pengelolaan Air untuk Budidaya Padi di Lahan Rawa Pasang Surut” (IAARD Press, 2014); “Lahan Rawa Lebak: Sistem Pertanian dan Pengembangannya” (IAARD Press, 2017); “Agroekologi Rawa” (PT. RajaGrafindo Persada, 2017); “Inovasi Teknologi Lahan Rawa: Mendukung Kedaulatan Pangan” (Rajawali Press, 2018); “Sumber Daya Lahan Rawa: Dukungan Teknologi Menuju Lumbung Pangan Dunia” (IAARD Press, 2019); dan “Optimasi Lahan Rawa: Akselerasi Menuju Lumbung Pangan Dunia 2045” (IAARD Press, 2020). Selain itu, ia juga menulis salah satu bagian dari buku *Tropical Peatland Eco-management* (Springer, 2021). Sejak tahun 2022, ia bekerja sebagai Penyuluh Pertanian Ahli Madya pada Badan Standarisasi Instrumen Pertanian Lahan Rawa (BSIP), Kementerian Pertanian.



### **Izhar Khairullah**

Ia lahir di Kabupaten Banjar, Kalimantan Selatan pada Desember 1968. Ia menyelesaikan pendidikan S-1 jurusan Budidaya Pertanian pada Fakultas Pertanian Universitas Lambung Mangkurat Banjarbaru (1992), S-2 program studi Agronomi pada Universitas Lambung Mangkurat Banjarbaru (2005), dan S-3 program studi Ilmu Pertanian minat Agronomi, Universitas Gadjah Mada Yogyakarta (2012).

Pada tahun 1996, ia mengikuti pelatihan “Introduction to New Developments in GXE Analysis and Interpretation of Results” di Bogor yang dilaksanakan oleh Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan (Puslitbangtan) bekerja sama dengan International Rice Research Institute (IRRI). Pada Agustus 2003, ia ditugaskan untuk mengikuti pelatihan “Rice Breeding Course: Planning Rice Breeding Program for Impact” yang diselenggarakan oleh IRRI di

Los Banos, Laguna, Filipina. Pada tahun 1994, ia mengikuti pelatihan “Synthetic Aperture Radar MAP RIICE Training” IICALRD, Bogor; dan pada tahun 2015 mengikuti pelatihan “Synthetic Aperture Radar: Theory and Applications” di Vancouver, Kanada.

Ia aktif menulis karya tulis ilmiah pada jurnal internasional dan nasional, prosiding internasional dan nasional, serta bagian buku dan bunga rampai. Selain itu, ia juga aktif mengikuti seminar/simposium internasional dan nasional. Ia berpengalaman mengajar mata kuliah Pengantar Ilmu Pemuliaan Tanaman pada program studi Agroteknologi, Faperta Universitas Lambung Mangkurat (ULM). Selain itu, ia pernah membimbing mahasiswa S-1 pada program studi Biologi Fakultas MIPA ULM serta menguji mahasiswa S-1 FMIPA ULM dan S-3 Faperta Universitas Gadjah Mada Yogyakarta.

Ia turut serta dalam melepas varietas unggul Margasari, Martapura, dan Inpara-3, serta varietas unggul lokal Siam Mutiara dan Siam Saba. Ia tercatat sebagai anggota Perhimpunan Agronomi Indonesia (PERAGI), Perhimpunan Ilmu Pemuliaan Indonesia (PERIPI), Himpunan Ilmu Tanah Indonesia (HITI), Perhimpunan Meteorologi Indonesia (PERHIMPI), dan Himpunan Peneliti Indonesia (HIMPENINDO). Ia pernah bekerja di Balai Penelitian Pertanian Lahan Rawa (Balittra) dengan peran sebagai Koordinator Program dan Evaluasi (2013–2019) dan Ketua Kelti Pengelolaan Hara dan Tanaman Balittra (2021–2022). Setelah itu, ia bekerja dengan jabatan fungsional Peneliti Ahli Utama bidang Budidaya Tanaman di Badan Riset dan Inovasi nasional (BRIN).



### **Muhrizal Sarwani**

Ia lahir di Banjarmasin pada Maret 1960. Ia adalah Peneliti Ahli Utama pada Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumber daya Lahan Pertanian (BBSDLP) di Bogor. Sebelumnya, sejak tahun 1983, ia bekerja sebagai peneliti pada Balai Penelitian Pertanian Lahan Rawa (Balittra), Kalimantan Selatan. Ia men-

dapatkan gelar Sarjana Pertanian (Ir., S-1) dari Jurusan Ilmu Tanah Fakultas Pertanian IPB tahun 1983, gelar Master of Science (M.Sc.) dari jurusan Soil and Water, Wageningen Agricultural University (sekarang Wageningen University Research) di Belanda pada tahun 1987. Gelar PhD dirahinya dari University Putra Malaysia (UPM), Serdang, Malaysia, pada tahun 2001 dengan bidang kajian Land Management. Tahun 1988–1990, ia terlibat dalam kerja sama penelitian Indonesia-Belanda terkait lahan rawa sulfat masam di Kalimantan (LAWOO Project). Tahun 1990, ia menerima *research grant* dari Badan Litbang Pertanian untuk kegiatan Penelitian Pengembangan Lahan Rawa Pasang Surut di Kabupaten Batola, Kalimantan Selatan. Ia juga telah mendapat anugerah Satyalancana Karya Satya 30 tahun dari Pemerintah RI diterima pada tahun 2016.

Ia kerap menjadi narasumber di berbagai seminar/pelatihan pada lingkup kementerian, perguruan tinggi, dan masyarakat serta sering menjalin interaksi dengan lembaga swadaya masyarakat (LSM), khususnya di Kalimantan Tengah, yaitu CARE International dan World Education. Ia juga didaulat untuk menjadi pembimbing dan penguji mahasiswa S-2 dan S-3 di ULM dan IPB. Ia sering diundang sebagai delegasi Indonesia pada beberapa pertemuan internasional, antara lain The Second Senior Officials Meeting of the Global Research Alliance on Agricultural Green House Gases Governance Working Group di Paris, Prancis; The 19<sup>th</sup> Session of the Commission on Sustainable Development (CSD-19) di New York, Amerika Serikat; dan The Conference of the Parties (COP) to the Basel Convention, the Rotterdam Convention, and the Stockholm Convention 2019 di Jenewa, Swiss.

Adapun karya tulis ilmiah yang ditulisnya terbit di jurnal dan prosiding, baik nasional maupun internasional. Ia juga telah menulis beberapa buku teks yang sudah diterbitkan, antara lain *Lahan Rawa: Penelitian dan Pengembangan* (Penerbit AARD Press, 2012) dan *Trivia Rawa: Serba-Serbi Sumber Daya Lahan Rawa* (Penerbit Gadjah Mada University Press [GMUP], 2021).

Selain sebagai peneliti, ia juga diberi amanah sebagai pejabat struktural di beberapa tempat, yaitu Kepala BPTP Kalimantan Tengah di Palangkaraya (2004–2006); Kepala Balai Besar Pengkajian dan Pengembangan Teknologi Pertanian di Bogor (2006–2010); Kepala Balai Besar LitBang Sumber daya Lahan Pertanian di Bogor (2010–2014); dan Direktur Pupuk dan Pestisida, Ditjen Prasarana dan Sarana Pertanian, Kementan (2014–2019). Sejak tahun 2022, ia bekerja sebagai Analis Kebijakan Utama pada Badan Standarisasi Instrumen Pertanian (BSIP), Kementerian Pertanian.



### **Muhammad Saleh**

Ia lahir di kabupaten Hulu Sungai Tengah pada Mei 1960. Ia menyelesaikan pendidikan S-1 di Jurusan Produksi dan Pengelolaan Tanaman, Fakultas Pertanian Universitas Lambung Mangkurat dan S-2 pada program pascasarjana Fakultas Pertanian Universitas Gajah Mada. Ia menjabat sebagai Peneliti Ahli Utama bidang Genetika dan Pemuliaan Tanaman pada Balittra.

Selanjutnya, sejak tahun 2022, ia bekerja sebagai peneliti di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN).



# Indeks

## A

- aliran satu arah 228, 248, 363, 421  
aluvial 4, 21, 22, 39, 42, 44, 200,  
304, 315  
amelioran 148, 178, 179, 235, 237,  
238, 239, 240, 241, 242, 243,  
247, 259, 271, 272, 273, 274,  
280, 281, 287, 290, 291, 292,  
293, 302, 303, 305, 306, 307,  
315, 316, 328, 333, 355, 363,  
373, 393, 394, 395, 403  
ameliorasi 85, 178, 203, 226, 237,  
238, 239, 240, 241, 242, 248,  
254, 271, 282, 290, 302, 315,  
333, 358, 363, 373, 375, 399,  
412  
amorf 47, 67, 80, 89, 99, 102, 122,  
123, 184, 333  
anasir negatif 178, 180, 188, 196,  
202  
asam 78, 99, 100, 161, 239, 284,  
334, 368  
asam asetat 53, 98, 103  
asam laktat 53  
asam organik 42, 53, 64, 84, 104,  
161, 205, 228, 230, 236, 238,  
239, 280, 281, 292, 308, 334  
asam sulfat 46, 56, 65, 70, 72, 73, 76

## B

- bahan organik 53, 84, 85, 98, 99,  
109, 110, 114, 203, 205, 206,  
208, 210  
bahan sulfidik 40, 42, 45, 46, 47,  
48, 49, 55, 56, 67, 70, 71, 72,  
73, 154, 158, 162, 163, 178,

179, 180, 181, 182, 183, 184,  
186, 198, 199, 201, 202, 203,  
204, 205, 212, 215, 220, 225,  
226, 236, 250, 253, 266, 271,  
357, 412  
BBSDLP 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11,  
324, 346, 417  
besi 50, 89, 90, 91, 98, 101, 111, 112,  
115  
beting pasir pantai 18  
biogeokimia 3, 13, 30, 51, 55, 89,  
108, 109, 110, 115, 116, 127,  
129, 158, 183, 208, 219, 323  
bog 132, 134, 144, 343, 351, 368,  
370, 387, 406

## C

cekungan 19, 25, 36, 37, 39, 40, 41,  
44, 134, 140, 144

## D

daerah depresi, 25  
dataran banjir 20, 25, 37, 38, 39, 43,  
46, 337  
donor elektron 53, 83, 101, 109  
drainase 2, 28, 29, 42, 54, 62, 68, 72,  
76, 78, 93, 95, 104, 124, 134,  
149, 152, 153, 155, 159, 168,  
178, 179, 181, 182, 186, 187,  
193, 194, 196, 197, 199, 217,  
220, 221, 224, 226, 227, 228,  
229, 230, 231, 233, 236, 250,  
252, 253, 276, 296, 310, 325,  
334, 335, 337  
DSS 208, 219, 220, 273, 358

## E

ekosistem 2, 3, 13, 15, 16, 18, 21, 52,  
137, 149, 202, 210, 224, 280,  
323, 325, 385, 392  
elektron 4, 53, 55, 81, 83, 98, 101,  
103, 105, 107, 108, 109, 111,  
128, 129, 174, 184, 206, 335  
elektron akseptor 174  
endapan marine 27, 40, 44, 45, 46,  
47, 67, 139, 140, 335  
*euroconsult* 6, 7, 8, 9, 356, 379, 404

## F

Fe 30, 32, 34, 45, 47, 49, 50, 51, 53,  
55, 56, 57, 58, 59, 61, 62, 65,  
66, 69, 70, 73, 76, 77, 78, 79,  
81, 82, 83, 84, 85, 88, 89, 90,  
91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98,  
99, 100, 101, 102, 103, 104,  
110, 111, 112, 113, 114, 115,  
116, 117, 118, 119, 120, 121,  
122, 123, 124, 127, 128, 156,  
159, 160, 161, 162, 163, 179,  
180, 184, 195, 197, 202, 203,  
205, 206, 209, 210, 212, 214,  
215, 216, 221, 222, 239, 240,  
254, 255, 257, 271, 272, 286,  
288, 291, 305, 307, 308, 309,  
325, 346, 349, 350, 351, 353,  
354, 357, 361, 367, 368, 369,  
371, 374, 380, 384, 391, 392,  
409, 412  
fen 132, 134, 144, 351, 356, 383  
Feri 101  
fero 90, 104  
fibrik 136, 142, 164, 165, 167, 171,  
172

fiksasi 110, 124, 129, 158, 210, 216,  
335  
fluktuasi 36, 54, 61, 76, 87, 89, 93,  
94, 101, 107, 111, 113, 115,  
119, 124, 127, 149, 154, 156,  
159, 162, 262  
*food estate* 326, 327, 330, 381  
framboidal 50, 383, 390

## G

galangan 199, 201, 202, 233, 234,  
235, 236, 246, 247, 261, 262,  
268, 274, 287, 289, 300  
gambut 2, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 15, 17,  
19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 32,  
36, 39, 42, 44, 45, 53, 67, 71,  
131, 132, 133, 134, 135, 136,  
137, 138, 139, 140, 141, 142,  
143, 144, 145, 146, 147, 148,  
149, 150, 151, 152, 153, 154,  
155, 156, 157, 158, 159, 160,  
161, 162, 163, 164, 165, 166,  
167, 168, 169, 170, 171, 172,  
173, 174, 175, 204, 223, 224,  
225, 226, 227, 228, 229, 230,  
231, 232, 233, 235, 236, 238,  
239, 240, 241, 242, 243, 244,  
279, 280, 281, 282, 283, 285,  
286, 287, 288, 289, 290, 291,  
292, 293, 294, 295, 298, 300,  
301, 302, 303, 304, 305, 306,  
307, 308, 309, 310, 311, 312,  
315, 324, 325, 326, 327, 328,  
329, 330, 342, 344, 345, 346,  
355, 357, 358, 362, 363, 372,  
373, 375, 376, 379, 380, 381,  
388, 391, 392, 393, 394, 395,  
397, 399, 401, 402, 403, 404,

406  
genangan 2, 4, 16, 17, 18, 21, 24, 28,  
37, 40, 41, 43, 83, 136, 148,  
159, 185, 194, 199, 225, 231,  
234, 235, 254, 255, 256, 260,  
262, 278, 287, 329, 336, 338  
gutit 50, 51, 55, 56, 61, 62, 80, 81,  
89, 90, 97, 98, 100, 102

## H

hara 29, 30, 33, 35, 41, 42, 73, 81,  
85, 106, 109, 111, 114, 116,  
117, 118, 119, 129, 134, 146,  
148, 149, 151, 152, 153, 154,  
155, 156, 161, 173, 174, 175,  
178, 182, 184, 197, 198, 202,  
208, 209, 210, 212, 215, 216,  
217, 218, 219, 237, 240, 242,  
243, 246, 247, 255, 266, 273,  
274, 276, 277, 280, 281, 283,  
291, 292, 293, 294, 295, 302,  
303, 305, 306, 307, 308, 311,  
312, 315, 317, 324, 334, 335,  
339, 344, 363, 399, 406  
hemik 136, 142, 165, 167, 169, 171,  
172  
hidrofobik 149, 169, 170, 225, 325,  
403  
hidrooksida 76, 85, 212  
hilir 25, 26, 32, 36, 37, 39, 44, 45,  
124, 147, 321  
holosen 138, 139  
horizon 47, 56, 57, 71, 72, 335  
horizon sulfurik 47, 56, 57, 71, 72  
hortikultura 1, 10, 202, 226, 227,  
232, 234, 235, 242, 244, 245,  
248, 249, 258, 260, 261, 268,

- 270, 275, 281, 282, 298, 300,  
302, 324, 355
- hulu 19, 20, 26, 32, 36, 43, 44, 45, 68
- I**
- indigenous* 211, 265, 283, 338
- inlet* 195, 227, 228, 360
- intensitas pertanaman (IP) 246
- irreversible drying* 169, 226
- J**
- jarak tanam 259, 263, 264, 266, 268,  
269, 288, 290, 312, 314
- jenuh 3, 23, 89, 95, 135, 136, 137,  
149, 157, 163, 183, 230, 336
- K**
- kadar lengas 91, 94, 126, 155, 157,  
159, 166, 168, 169, 170, 230
- kahat hara 215, 247, 276, 280, 281
- kapasitas reduksi 102
- kapasitas tukar kation 164
- kapur 35, 182, 212, 213, 214, 215,  
219, 221, 235, 238, 240, 244,  
272, 287, 290, 291, 292, 293,  
302, 306, 307, 309, 315, 328,  
387, 393
- karakterisasi, 16, 69
- karbon 64, 93, 114, 135, 138, 231,  
334, 404
- karbonat, 47, 57, 63, 64, 65, 66, 83,  
89, 182, 184, 203, 214
- kelarutan 79, 81, 91, 94, 95, 106,  
108, 109, 110, 115, 119, 120,  
122, 123, 149, 155, 156, 173,  
178, 182, 202, 203, 206, 208,  
212, 214, 219, 246, 267, 288,  
324, 325
- kemasaman 30, 31, 32, 33, 42, 62,  
64, 65, 66, 67, 69, 72, 73, 76,  
77, 79, 80, 81, 85, 86, 87, 88,  
99, 109, 115, 116, 119, 154,  
169, 178, 179, 180, 181, 182,  
183, 184, 185, 197, 203, 211,  
212, 213, 214, 215, 237, 238,  
243, 246, 247, 255, 272, 280,  
281, 285, 306, 324, 325, 334
- kendala agronomis 245
- keracunan 91, 116, 120, 192, 195,  
196, 205, 206, 246, 247, 254,  
257, 267, 280, 281, 286, 288,  
292, 336
- ketersediaan 53, 55, 64, 66, 73, 77,  
81, 83, 107, 109, 110, 114,  
116, 119, 120, 122, 123, 151,  
152, 153, 155, 156, 159, 161,  
174, 175, 178, 180, 182, 184,  
185, 193, 198, 209, 210, 212,  
215, 216, 218, 219, 246, 248,  
255, 256, 259, 260, 270, 273,  
274, 288, 289, 291, 292, 302,  
316, 327, 346, 388
- klei 23, 46, 64, 71, 95, 118, 119, 124,  
126, 134, 135, 136, 139, 140,  
163, 164, 171, 206, 215, 272,  
279, 305, 336, 337
- kompos 209, 272, 290, 293, 303,  
304, 306, 308, 309, 315, 316,  
387
- kondisi hidrologis 32, 65, 69, 74, 86,  
87, 89, 110, 118, 119, 120,  
154, 155, 157, 158, 159, 161,  
173, 219, 336

- konsentrasi 30, 51, 52, 56, 66, 73,  
 83, 88, 91, 93, 94, 95, 97, 98,  
 99, 100, 101, 103, 107, 109,  
 120, 122, 124, 129, 153, 155,  
 161, 162, 163, 166, 178, 184,  
 185, 195, 196, 205, 206, 212,  
 216, 220, 221, 254, 255, 257,  
 291, 324  
 konsumsi elektron 83, 129  
 konsumsi proton 64, 83  
 kristalin 50, 96, 99, 102, 123  
 kristalisasi 50, 89, 98, 99, 122  
 kualitas air 30, 31, 32, 35, 41, 43, 65,  
 152, 178, 183, 185, 187, 192,  
 194, 196, 197, 198, 220, 247  
 kualitas lahan 178, 190, 191, 216,  
 330  
 kuantitas air 27, 29, 36, 190  
 kubah gambut 39, 144, 155
- L**
- lahan basah 1, 2, 5, 15, 18, 52  
 lahan gambut 2, 5, 7, 9, 10, 23, 25,  
 32, 36, 39, 42, 131, 132, 134,  
 135, 136, 142, 145, 147, 149,  
 150, 152, 153, 155, 156, 157,  
 159, 160, 162, 163, 164, 165,  
 166, 168, 171, 172, 173, 174,  
 175, 223, 224, 225, 226, 227,  
 228, 229, 230, 231, 232, 233,  
 235, 236, 238, 243, 244, 279,  
 280, 281, 282, 283, 285, 286,  
 287, 288, 289, 290, 291, 292,  
 293, 294, 295, 298, 300, 301,  
 302, 304, 305, 306, 307, 308,  
 309, 310, 311, 312, 315, 324,  
 325, 326, 328, 342, 344, 345,  
 346, 355, 358, 363, 373, 375,  
 376, 379, 380, 381, 388, 391,  
 392, 395, 399, 401, 403, 404,  
 406  
 lahan kering 1, 2, 11, 39, 105, 119,  
 159, 199, 229, 234, 235, 257,  
 264, 275, 281, 301  
 lahan lebak 3, 5, 6, 9, 11, 17, 20, 22,  
 23, 24, 25, 27, 36, 37, 38, 39,  
 40, 41, 42, 43, 287, 323  
 lahan potensial 5, 73  
 lahan rawa 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10,  
 11, 12, 13, 15, 16, 17, 18, 19,  
 20, 21, 22, 23, 24, 25, 33, 36,  
 37, 39, 44, 45, 65, 74, 81, 86,  
 90, 91, 92, 105, 109, 111,  
 116, 117, 119, 120, 122, 123,  
 127, 129, 131, 132, 134, 140,  
 155, 161, 192, 194, 199, 201,  
 208, 219, 229, 231, 232, 234,  
 235, 236, 238, 247, 248, 253,  
 254, 255, 256, 257, 262, 264,  
 274, 282, 298, 301, 302, 323,  
 324, 326, 327, 328, 330, 331,  
 334, 337, 338, 341, 344, 345,  
 346, 357, 358, 363, 365, 369,  
 370, 373, 376, 379, 381, 383,  
 388, 394, 396, 398, 399, 400,  
 401, 402, 406, 407, 418  
 lahan salin 5, 8  
 lahan sawah 11, 199, 229, 237, 270,  
 271, 283, 286, 325  
 lahan sulfat masam 5, 25, 256, 257,  
 272, 298, 324, 327, 345, 368,  
 369, 401  
 laju akumulasi 136, 137, 173  
 lama genangan 24, 40, 41, 83  
*landform* 2, 3, 9, 16, 19, 21, 336

lengas tanah 91, 94, 155, 159, 166,  
170, 226, 230  
lignin 169, 210

**M**

magnitudo 64  
mangrove 15, 19, 48, 67, 68, 145,  
370  
marginal 15, 109, 116, 161, 225,  
245, 255, 324  
marine 2, 4, 27, 39, 40, 43, 44, 45,  
46, 47, 65, 67, 68, 69, 71,  
140, 335  
marine 19, 20, 145  
*marsh land* 3  
mikroba 85, 128, 158, 243, 274, 379  
mikrobial 79, 85, 184, 204, 246, 334  
mikroorganisme 52, 54, 78, 83, 91,  
97, 98, 99, 101, 102, 103,  
104, 107, 109, 110, 116, 127,  
128, 129, 152, 153, 160, 173,  
174, 175, 203, 215, 255, 291,  
293, 303  
mineral Fe sulfida 45, 47, 51, 53,  
58, 82  
mineralisasi 68, 98, 111, 117, 119,  
129, 149, 153, 155, 156, 157,  
159, 160, 173, 174, 215, 336  
mineral sekunder 64, 98  
monokultur 246, 258, 260, 268, 282,  
289  
moor 132, 134, 144, 351  
muara sungai 18, 19, 20, 25, 30, 32,  
34, 35  
musuh alami 276, 296, 310, 318

**N**

netralisasi 64, 185, 213, 214  
nitrogen 272, 350, 352, 355, 363,  
370, 373, 375, 377, 378, 384,  
389, 404, 405

**O**

oksidasi 32, 46, 48, 54, 55, 56, 58,  
59, 61, 64, 65, 67, 72, 73, 74,  
76, 77, 78, 79, 80, 82, 83, 84,  
85, 86, 88, 90, 92, 95, 97, 98,  
101, 103, 104, 105, 108, 110,  
111, 115, 117, 119, 127, 128,  
129, 134, 152, 154, 174, 178,  
179, 180, 181, 182, 183, 198,  
202, 203, 205, 212, 214, 220,  
236, 337  
oksidasi pirit 32, 46, 54, 55, 58, 61,  
64, 65, 76, 77, 78, 79, 80, 86,  
92, 110, 127, 128  
oksidator 77, 79, 111, 115  
oksigen 4, 333, 335  
oktahedron 50  
ombrogen 140, 142, 144, 154, 155,  
156, 165, 238, 372, 402  
organik 4, 23, 42, 44, 45, 48, 51, 53,  
54, 55, 56, 62, 64, 75, 76, 78,  
81, 83, 84, 85, 86, 89, 90, 91,  
92, 93, 98, 99, 100, 101, 103,  
104, 107, 108, 109, 110, 111,  
113, 114, 116, 117, 118, 119,  
120, 122, 123, 124, 125, 127,  
128, 129, 132, 133, 134, 135,  
136, 137, 138, 140, 145, 146,  
148, 151, 152, 153, 156, 157,  
158, 160, 161, 162, 163, 164,  
166, 168, 170, 173, 174, 184,

- 203, 204, 205, 206, 207, 208,  
209, 210, 211, 212, 214, 215,  
217, 218, 219, 221, 224, 228,  
230, 236, 237, 238, 239, 242,  
243, 244, 266, 272, 273, 279,  
280, 281, 291, 292, 293, 294,  
302, 303, 304, 305, 306, 308,  
315, 334, 336, 337, 357, 397,  
401
- outlet* 193, 195, 227, 228, 236
- P**
- pasang surut 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13,  
16, 17, 18, 19, 20, 22, 23, 24,  
25, 26, 27, 28, 29, 30, 32, 33,  
35, 36, 37, 38, 39, 42, 43, 54,  
65, 67, 68, 73, 74, 82, 87, 94,  
101, 109, 119, 122, 123, 126,  
128, 144, 185, 186, 187, 189,  
190, 191, 192, 193, 195, 197,  
198, 199, 204, 208, 219, 220,  
228, 229, 234, 235, 236, 248,  
249, 254, 256, 257, 259, 260,  
261, 262, 264, 265, 267, 270,  
274, 281, 283, 287, 289, 323,  
328, 337, 338, 343, 344, 357,  
358, 360, 363, 369, 370, 373,  
376, 379, 381, 382, 391, 394,  
396, 401, 402, 406, 407
- pascapanen 265, 283, 318, 320, 321
- pelindian 30, 32, 33, 46, 95, 157,  
178, 337
- penataan lahan 43, 182, 198, 199,  
201, 202, 226, 231, 232, 233,  
234, 235, 236, 248, 260, 262,  
268, 282, 379
- pencucian 46, 52, 87, 117, 149, 178,  
185, 187, 188, 190, 191, 192,  
197, 202, 210, 215, 217, 227,  
236, 270, 271, 291, 337
- pengelolaan air 178, 183, 185, 186,  
190, 192, 193, 194, 198, 199,  
210, 220, 226, 227, 228, 231,  
237, 248, 249, 250, 252, 253,  
254, 281, 282, 324, 325, 328,  
344, 365, 381
- penggenangan 28, 52, 61, 74, 80, 82,  
83, 84, 85, 87, 94, 95, 101,  
107, 111, 117, 122, 123, 126,  
128, 153, 155, 178, 179, 181,  
183, 184, 185, 195, 196, 205,  
252, 254, 297
- permeabilitas 54, 124, 126
- pintu air 193, 194, 195, 220, 228,  
233, 236, 237, 253
- pirit 23, 32, 45, 46, 47, 48, 49, 50,  
51, 52, 53, 54, 55, 58, 61, 62,  
64, 65, 67, 69, 70, 71, 73, 76,  
77, 78, 79, 80, 81, 85, 86, 90,  
92, 98, 102, 104, 110, 113,  
115, 127, 128, 201, 286, 306,  
325
- pleistosen 68, 138
- pola tanam 232, 248, 258, 259, 260,  
261, 264, 265, 271, 275, 282,  
299, 337, 370, 372
- produktivitas lahan 12, 43, 178,  
200, 201, 202, 209, 259, 260,  
261, 291, 293, 294, 325, 344,  
358, 379, 380, 381, 403
- puncak musim kemarau, 20
- R**
- rawa 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12,  
13, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21,

- 22, 23, 24, 25, 33, 36, 37, 39,  
41, 42, 44, 45, 65, 67, 68, 74,  
81, 86, 90, 91, 92, 105, 109,  
111, 115, 116, 117, 119, 120,  
122, 123, 127, 129, 131, 132,  
134, 136, 140, 144, 145, 155,  
159, 161, 164, 192, 194, 199,  
201, 208, 219, 228, 229, 231,  
232, 234, 235, 236, 238, 247,  
248, 249, 253, 254, 255, 256,  
257, 262, 264, 274, 282, 298,  
301, 302, 323, 324, 326, 327,  
328, 330, 331, 334, 337, 338,  
341, 344, 345, 346, 354, 357,  
358, 363, 365, 369, 370, 373,  
376, 379, 380, 381, 382, 383,  
388, 394, 396, 398, 399, 400,  
401, 402, 406, 407, 418
- rawa belakang 16, 19, 37, 39, 337
- rawa lebak 6, 7, 16, 41, 42, 219, 337,  
338, 365
- rawa monoton 15, 337
- rawa pasang surut 3, 5, 6, 7, 16, 36,  
229, 234, 235, 236, 248, 257,  
262, 264, 274, 323, 328, 338,  
344, 357, 358, 370, 376, 379,  
394, 396, 402, 406, 407
- rawa pedalaman 20
- reaksi oksidasi 55, 79, 80, 83, 104,  
111, 127
- reaksi reduksi 52, 81, 83, 95, 99,  
101, 104, 105, 119, 122, 124
- reaktivitas 70, 89, 100, 206, 208
- redoksimorfik 123
- reduksi 30, 48, 49, 51, 52, 53, 66, 69,  
74, 79, 81, 83, 89, 94, 95, 98,  
99, 101, 102, 103, 104, 105,  
108, 110, 111, 112, 115, 116,  
119, 120, 122, 123, 124, 127,  
129, 159, 184, 203, 206, 210,  
275
- reduksi abiotik 101, 103
- reduksi-oksidasi 30
- reklamasi lahan 32, 149, 177, 178,  
179, 180, 198
- ## S
- salinitas 69
- saluran cacing 237
- saluran keliling 201, 236
- saluran primer 188, 189, 231, 337
- saluran sekunder 187, 188, 189,  
195, 231, 337
- saluran tersier 188, 189, 228, 230,  
231, 248, 249, 250, 300, 337,  
338
- sawit dupa 260, 261, 264, 265, 337
- schwermannit 47, 55, 56, 62, 81,  
89, 90
- sedimen 45, 46, 51, 68, 69, 73, 116,  
119, 135, 146, 337
- senyawa organik 53, 85, 92, 98, 99,  
100, 103, 107, 128, 129, 148,  
164, 168, 205, 206, 210, 291,  
305
- shuttle electron* 103
- sifat fisika 74, 156, 166, 170, 209,  
230, 233, 235, 242, 271, 305,  
315, 338
- sifat kimia 74, 120, 148, 150, 152,  
153, 154, 155, 175, 183, 204,  
272, 305, 315, 357, 373, 393,  
410
- sistem anjir 186, 188, 189, 227

- sistem garpu 186, 188, 191, 227  
sistem pengelolaan air 183, 185,  
186, 190, 192, 198, 227, 248,  
324, 325, 328  
sistem sisir 186, 189, 190, 191, 227  
sistem surjan 200, 201, 202, 232,  
233, 234, 247, 260, 261, 262,  
268, 282, 287, 391  
stabilitas 62, 63, 98, 183, 201, 239,  
260, 376  
subsidiensi 150  
*sulfaquent* 72  
*sulfaquept* 73  
sulfida 45, 47, 48, 49, 50, 51, 52,  
53, 54, 55, 58, 66, 67, 68, 69,  
71, 72, 73, 76, 80, 82, 89, 90,  
103, 127, 180, 182, 214  
sulfidisasi 49  
sulfurisasi 55  
sumber kemasaman 30, 31, 32, 76,  
80, 81, 115, 154, 180, 185,  
197, 212, 247  
*swamp* 3, 19, 22, 36, 145, 343, 358,  
362, 366, 369, 383, 394, 398,  
402, 403
- T**
- tabat 182, 192, 193, 195, 227, 228,  
229, 230, 237, 248, 249, 252,  
338  
tabukan 201, 202, 234, 268  
tanah sulfat masam aktual 23, 56,  
69, 70, 73, 76, 84, 206, 207  
tanah sulfat masam potensial 23,  
69, 70, 73, 76, 84, 123, 207  
tanaman bergiliran 258  
tanaman bersisipan 258  
tanaman campuran 258, 259  
tanaman hortikultura 10, 244, 245,  
300, 324, 355  
tanaman pangan 1, 10, 12, 17, 151,  
177, 223, 224, 226, 227, 233,  
242, 244, 245, 247, 248, 252,  
275, 281, 282, 283, 285, 288,  
295, 324, 381  
tanaman perkebunan 199, 202, 226,  
231, 240, 244, 245, 247, 252,  
276, 310, 312, 313, 317, 321,  
355  
tanggul sungai 17, 39, 40, 240, 337  
tata air makro 246, 281  
tata air mikro 192, 246, 281, 399  
tata air satu arah 31, 192, 194, 195,  
197, 227, 228, 237, 248, 249,  
264  
tergenang 1, 2, 3, 4, 15, 19, 23, 67,  
76, 83, 85, 91, 94, 98, 101,  
105, 106, 107, 108, 109, 111,  
115, 116, 118, 119, 120, 128,  
137, 138, 155, 157, 183, 186,  
198, 207, 215, 234, 246, 249,  
252, 263, 266, 279, 287, 300,  
323, 329, 339  
*thiobacillus ferrooxidans* 78, 79, 127  
tinggi genangan 4, 40, 41, 148, 256,  
336  
tipe luapan 17, 18, 24, 25, 27, 28,  
29, 33, 35, 36, 123, 187, 192,  
193, 195, 197, 198, 199, 200,  
201, 209, 219, 229, 234, 235,  
236, 246, 248, 249, 259, 264,  
281, 282, 323

transformasi 45, 55, 61, 64, 76, 80,  
89, 101, 118, 127, 157, 173,  
321, 339

tropika 46, 137, 138, 144, 147, 148,  
151, 163, 165, 166, 170, 173,  
231, 279, 338, 380, 393

tukungan 199, 200, 202, 203, 233,  
234, 235, 236

tumpang sari 203, 258, 259, 268,  
269, 288, 289, 290, 344, 372,  
405

## U

unsur meracun 30, 31, 32, 33, 106,  
178, 197, 339

usaha tani 201, 227, 228, 229, 232,  
233, 247, 250, 260, 261, 262,  
330, 399

## V

varietas padi lokal 264, 283

varietas padi unggul 255

vegetasi 2, 3, 4, 5, 19, 69, 132, 137,  
138, 139, 140, 144, 145, 148,  
153, 157, 173, 279

## Z

zona konservasi 17

zona pengembangan 17

zonasi 16, 17, 25, 95

**T**anah sulfat masam dan tanah gambut adalah dua jenis tanah bermasalah yang berada pada ekosistem lahan basah (*wetland*). Kedua jenis tanah ini mulai populer sejak tahun 1970-an dengan adanya pembukaan persawahan pasang surut bersamaan dengan program transmigrasi dan tidak pernah berhenti diperbincangkan sampai saat ini karena dinilai belum memberikan kepuasan dalam pemanfaatannya. Pada awalnya, dilaporkan produksi padi dan komoditas lainnya yang diusahakan oleh para transmigran, bahkan beberapa tanaman yang dibudidayakan, gagal tumbuh.

Buku *Sifat dan Pengelolaan Tanah Sulfat Masam dan Gambut* ini mencoba mengupas lebih detail tentang sifat kedua jenis tanah bermasalah terkait dengan pemanfaatannya untuk pertanian. Buku ini dapat dimanfaatkan peneliti, penyuluh, civitas academica, termasuk penyusun kebijakan dan pemangku kepentingan (*stakeholder*) yang terkait dengan bidang pertanian, perkebunan, kehutanan, perikanan, peternakan, dan lingkungan hidup sebagai pengetahuan sekaligus menambahkan khazanah pustaka tentang lahan basah secara umum dan lahan rawa khususnya.

Selamat membaca!

**BRIN Publishing**  
*The Legacy of Knowledge*

Diterbitkan oleh:  
**Penerbit BRIN**, anggota Ikapi  
Gedung B.J. Habibie Lt. 8,  
Jl. M.H. Thamrin No. 8,  
Kota Jakarta Pusat 10340  
E-mail: [penerbit@brin.go.id](mailto:penerbit@brin.go.id)  
Website: [penerbit.brin.go.id](http://penerbit.brin.go.id)

DOI: 10.55981/brin.787



ISBN 978-602-6303-47-9



9 786026 303479