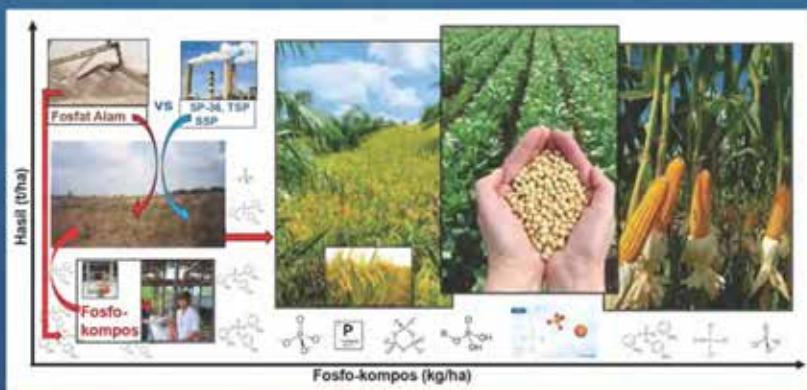


ORASI ILMIAH: RISET DAN INOVASI

AKSELERASI INOVASI TEKNOLOGI FOSFO-KOMPOS DALAM MENINGKATKAN PRODUKTIVITAS LAHAN KERING MASAM UNTUK MENDUKUNG KETAHANAN PANGAN BERKELANJUTAN

ORASI PENGUKUHAN PROFESOR RISET
ILMU PERTANIAN, BIDANG ILMU TANAH
KEPAKARAN KESUBURAN TANAH DAN NUTRISI TANAMAN



OLEH:

A. ARIVIN RIVAIE

BADAN RISET DAN INOVASI NASIONAL

**AKSELERASI INOVASI TEKNOLOGI
FOSFO-KOMPOS DALAM MENINGKATKAN
PRODUKTIVITAS LAHAN KERING MASAM
UNTUK MENDUKUNG KETAHANAN PANGAN
BERKELANJUTAN**

Diterbitkan pertama pada 2025 oleh Penerbit BRIN

Tersedia untuk diunduh secara gratis: 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/>



**AKSELERASI INOVASI TEKNOLOGI
FOSFO-KOMPOS DALAM MENINGKATKAN
PRODUKTIVITAS LAHAN KERING MASAM
UNTUK MENDUKUNG KETAHANAN
PANGAN BERKELANJUTAN**

**ORASI PENGUKUHAN PROFESOR RISET
ILMU PERTANIAN
BIDANG ILMU TANAH
KEPAKARAN KESUBURAN TANAH DAN NUTRISI
TANAMAN**

OLEH:

A. ARIVIN RIVAIE

Penerbit BRIN

© 2025 Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)
Pusat Riset Tanaman Pangan

Katalog dalam Terbitan (KDT)

Akselerasi Inovasi Teknologi Fosfo-kompos dalam Meningkatkan Produktivitas Lahan Kering Masam untuk Mendukung Ketahanan Pangan Berkelanjutan/A. Arivin Rivaie–Jakarta: Penerbit BRIN, 2024.

ix + 105 hlm.; 14,8 x 21 cm

ISSN 3090-3485

1. Fosfo-kompos
3. Ketahanan Pangan

2. Lahan kering masam

549,7

Copy editor : Utami Dwi Astuti
Proofreader : Martinus Helmiawan
Penata Isi : Utami Dwi Astuti
Desainer Sampul : Utami Dwi Astuti

Edisi pertama : 2025



Diterbitkan oleh:
Penerbit BRIN, Anggota Ikapi
Direktorat Repositori, Multimedia, dan Penerbitan Ilmiah
Gedung B.J. Habibie Lt. 8, 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
Website: penerbit.brin.go.id
 PenerbitBRIN
 @Penerbit_BRIN
 @penerbit.brin

DAFTAR ISI

BIODATA RINGKAS	1
PRAKATA PENGUKUHAN	5
I. PENDAHULUAN.....	7
II. DINAMIKA TEKNOLOGI PENGELOLAAN HARA FOSFOR (P) PADA LAHAN KERING MASAM	11
A. Era Pertanian Tradisional (Periode Pra 1960)	11
B. Era Pertanian Inovatif (Periode 1960–1980)	13
C. Era Pertanian Modern (1980–2000)	22
D. Era Pertanian Berkelanjutan (2000 - Sekarang)	24
III. INOVASI TEKNOLOGI FOSFO-KOMPOS UNTUK PENING- KATAN PRODUKTIVITAS LAHAN DAN TANAMAN	29
A. Deposit dan Karakteristik Fosfat Alam	29
B. Teknik Peningkatan Efektivitas Fosfat Alam	33
IV. PROSPEK, ARAH, SASARAN, DAN STRATEGI PENGEM- BANGAN INOVASI TEKNOLOGI FOSFO-KOMPOS.....	47
A. Potensi Pengembangan Teknologi	47
B. Tantangan dan Peluang Pengembangan Teknologi	51
C. Arah dan Sasaran Pengembangan Teknologi	53
V. KESIMPULAN.....	57
VI. PENUTUP.....	59
VII. UCAPAN TERIMA KASIH	61
DAFTAR PUSTAKA.....	65
DAFTAR PUBLIKASI ILMIAH.....	83
DAFTAR RIWAYAT HIDUP.....	99

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Siklus P di Dalam Tanah	20
Gambar 3.1	Mekanisme Pelarutan Fosfat Alam Melalui Pengomposan (Sabah et al., 2022)	37

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Analisis Usahatani Jagung dengan Aplikasi Langsung	26
Tabel 3.1 Syarat Mutu Pupuk Fosfat Alam untuk Pertanian (SNI 02– 3776–2005)	32
Tabel 4.1 Keunggulan Penggunaan Fosfo-kompos sebagai Pupuk P ...	50

BIODATA RINGKAS



A. Arivin Rivaie, lahir di Tanjung Karang, Lampung, pada tanggal 21-1-1964 adalah anak ke 5 dari Bapak H. Abdul Rachman Rifaie (Almarhum) dan Ibu Hj. Ratna Suriyati (Almarhumah). Menikah dengan Sri Imawati, S.E. dan dikaruniai dua orang anak, yaitu Arvina Utami, S.E. dan A. Arvanza Rivaie, S.Si.

Berdasarkan Keputusan Presiden Republik Indonesia Nomor 34/M Tahun 2021, tanggal 27 Juli 2021 yang bersangkutan diangkat sebagai Peneliti Ahli Utama pada Kementerian Pertanian dan Nomor 33/M Tahun 2022, tanggal 23 Agustus 2022 yang bersangkutan diangkat sebagai Peneliti Ahli Utama pada Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN).

Berdasarkan Keputusan Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional Nomor 138/I/HK/2025, tanggal 2 Juni 2025, yang bersangkutan melakukan orasi pengukuhan Profesor Riset.

Menamatkan Sekolah Dasar Negeri 24 Tanjung Karang, tahun 1975, Sekolah Menengah Pertama Negeri 2 Bandar Lampung, tahun 1979, dan Sekolah Menengah Atas Negeri 2 Bandar Lampung, tahun 1982. Memperoleh gelar Sarjana Pertanian dari Universitas Lampung tahun 1987, gelar Master in Soil Science and Eremology dari Ghent University tahun 1998, dan gelar Doctor of Philosophy in Soil Science dari Massey University tahun 2005.

Mengikuti beberapa pelatihan yang terkait dengan bidang kompetensinya, antara lain: Kursus Evaluator Analisis Dampak Lingkungan di IPB University (1994), Refresher Course in Soil Science & Physical Land Resources di Ghent (2006), Communicating Science di Makassar (2008), dan A training in Management Development Program di Melbourne (2012).

Pernah menduduki jabatan struktural sebagai Kepala Balai Pengkajian Teknologi Pertanian (BPTP) Maluku (tahun 2010–2013), Kepala BPTP Kep. Bangka Belitung (tahun 2013–2014), Kepala BPTP Lampung (tahun 2014–2019), Kepala BPTP DKI Jakarta (tahun 2019–2020), dan Kepala Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi (Balitklimat) (tahun 2020–2022).

Jabatan fungsional peneliti diawali sebagai Asisten Peneliti Muda III/a (1 Januari 1993, Kementerian Pertanian), Ajun Peneliti Muda III/a (1 Desember 1993, Kementerian Pertanian), Ajun Peneliti Madya III/b (1 April 1996, Kementerian Pertanian), Peneliti Muda IV/a (1 Oktober 2005, Kementerian Pertanian), Peneliti Madya IV/a (1 Agustus 2008, Kementerian Pertanian), Peneliti Madya IV/b (1 Oktober 2012, Kementerian Pertanian), Peneliti Utama IV/c (1 Maret 2015, Kementerian Pertanian), Peneliti Ahli Utama IV/d (27 Juli 2021, Kementerian Pertanian) dan memperoleh jabatan Peneliti Ahli Utama (24 Agustus 2022, BRIN).

Menghasilkan 81 karya tulis ilmiah (KTI), baik yang ditulis sendiri maupun bersama penulis lain dalam bentuk buku, jurnal, dan prosiding. Sebanyak 29 KTI ditulis dalam bahasa Inggris, serta paten dan lisensi.

Ikut serta dalam pembinaan kader ilmiah, yaitu sebagai pembimbing jabatan fungsional peneliti pada Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), dan penguji disertasi (S-3) pada IPB

University (2016) dan Annamalai University, India (2024–sekarang).

Aktif dalam organisasi profesi ilmiah, yaitu sebagai anggota Perhimpunan Periset Indonesia (2019–sekarang), dan Himpunan Ilmu Tanah Indonesia (2018–sekarang).

Menerima tanda penghargaan Mahasiswa Teladan Tingkat Fakultas Pertanian UNILA 1987 dari Depdikbud, Wisudawan Terbaik I Universitas Lampung (UNILA) 1987 dari UNILA, Lulusan Terbaik Pertama Latihan Prajabatan TK. III Deptan 1991 dari Kepala PPMKP Ciawi, Departemen Pertanian, dan Satyalancana Karya Satya XX Tahun (2016) dan XXX Tahun (2023) dari Presiden RI.

PRAKATA PENGUKUHAN

Bismillaahirrahmaanirrahiim.

Assalaamu'alaikum warahmatullaahi wabarakaatuh.

Salam sejahtera untuk kita semua.

Majelis Pengukuhan Profesor Riset, Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional yang mulia dan hadirin yang saya hormati.

Pertama-tama marilah kita panjatkan puji dan syukur ke hadirat ALLAH Swt atas segala rahmat, nikmat, dan karunia-Nya sehingga dalam kesempatan ini kita dapat berkumpul dan bersama-sama hadir pada acara orasi ilmiah pengukuhan Profesor Riset di Badan Riset dan Inovasi Nasional.

Pada kesempatan yang berbahagia ini, dengan segala kerendahan hati, izinkan saya pada tanggal 16 Juli 2025 menyampaikan orasi ilmiah dengan judul:

**“AKSELERASI INOVASI TEKNOLOGI FOSFO-KOMPOS
DALAM MENINGKATKAN PRODUKTIVITAS LAHAN
KERING MASAM UNTUK Mendukung KETAHANAN
PANGAN BERKELANJUTAN”**

Pada orasi ini, akan disampaikan *state of the art* dari teknologi aplikasi langsung fosfat alam (FA) untuk meningkatkan produktivitas lahan kering masam guna mendukung ketahanan pangan nasional. Berbagai inovasi teknologi tepat guna sangat diperlukan dalam hal ini, karena produktivitas tanaman pangan

di lahan kering masam sampai saat ini pada tingkat petani masih jauh di bawah potensinya.

Orasi ini diharapkan dapat memberikan pemahaman tentang perlunya implementasi inovasi teknologi aplikasi langsung fosfat alam (FA) pada lahan kering masam untuk perbaikan dan peningkatan kesuburan tanah, khususnya ketersediaan unsur hara fosfor (P) sebagai salah satu hara yang paling membatasi pertumbuhan dan hasil tanaman. Fosfat alam (*rock phosphate*) adalah istilah yang digunakan untuk beberapa jenis batuan yang mengandung mineral PO_4^{-3} dalam jumlah yang signifikan dalam struktur kimianya. Fosfat alam merupakan sumber hara P yang dapat digunakan langsung tanpa memerlukan proses pabrikasi, yang sekaligus dapat berperan sebagai amelioran (pembenah) tanah, sehingga lebih ekonomis dan berwawasan lingkungan. Fosfo-kompos merupakan salah satu produk dari teknologi berbasis FA yang dikombinasikan dengan bahan organik melalui pengomposan dan diperkaya inokulan mikroba. Pemanfaatan fosfo-kompos pada lahan-lahan kering masam yang diusahakan untuk tanaman pangan, dapat diharapkan meningkatkan produktivitas lahan dan memberikan hasil tanaman yang optimal. Dengan pemahaman-pemahaman tersebut, maka arah, sasaran dan strategi pengembangan teknologi tersebut yang tepat dapat dihasilkan, guna mendukung kepastian tercapainya swasembada pangan nasional.

I. PENDAHULUAN

Lahan kering masam adalah lahan dengan karakteristik bereaksi masam ($\text{pH} < 5,5$), fiksasi fosfor (P) yang tinggi dan tidak tersedia bagi tanaman, daya simpan air dan hara yang rendah, serta kandungan aluminium (Al), mangan (Mn) dan besi (Fe) yang meracun (Leiwakabessy, 1989; Rivaie, 2014a; Agegnehu et al., 2021; Yusnaini et al., 2024). Lahan ini tidak tergenang air sepanjang tahun dan ketersediaan airnya tergantung pada curah hujan. Lahan kering masam saat ini yang tersedia untuk perluasan areal tanaman semusim sekitar 7,36 juta ha (Rivaie et al., 2016; Mulyani et al., 2017). Jika dibandingkan dengan lahan gambut dan pasang surut, ditinjau dari potensi luasan, keterbatasan biofisik, dan risiko lingkungan, maka lahan kering masam berpotensi lebih besar untuk pengembangan pertanian pangan (Irawan et al., 2015).

Selain populasi penduduk yang bertambah pesat, alih fungsi lahan sawah ke non-pertanian di Indonesia, dengan laju sekitar 96.500 ha per tahun (Mulyani et al., 2017) menjadi ancaman bagi ketahanan pangan yang tidak mungkin dihindari akibat pesatnya pertumbuhan kawasan industri, perumahan, dll. (Rivaie et al., 2016; Slameto et al., 2019a). Selain itu, perubahan iklim mengakibatkan banyak sawah di daerah pantai ditinggalkan petani karena produktivitasnya terus menurun akibat terdampak salinisasi (Rivaie et al., 2017; Heryani et al., 2022). Lahan yang rentan terhadap salinisasi cukup luas, yaitu 12,020 juta ha (Sukarman et al., 2018). Peningkatan indeks pertanaman dan percepatan tanam sebagai upaya menjaga ketahanan pangan

juga bisa meningkatkan serangan hama dan penyakit yang dapat menggagalkan panen (Wahid et al., 2013; Widiarta et al., 2020).

Ketahanan pangan nasional ke depan akan menghadapi masalah yang makin beragam. Namun ketersediaan pangan harus terjaga karena hak memperoleh pangan merupakan hak azasi manusia sesuai dengan UUD 1945 pasal 27, dan deklarasi Roma tahun 1966. Untuk itu Presiden RI periode 2025–2029 melalui Asta Cita kedua menetapkan salah satu Misionya adalah memantapkan sistem pertahanan keamanan negara dan mendorong kemandirian bangsa, antara lain melalui swasembada pangan. Berbagai langkah strategis harus terus dilakukan untuk meningkatkan produksi pangan agar ketersediaannya tetap terjamin (Wahid et al., 2013; Slameto dan Rivaie, 2017; Slameto et al., 2019b). Pemanfaatan lahan kering masam sangat potensial untuk mendukung ketahanan pangan, walau membutuhkan perbaikan kesuburan tanah.

Pada lahan kering masam rata-rata produktivitas dengan teknologi petani untuk padi gogo hanya sebesar 2,0–3,4 ton/ha GKP (Septiyana et al., 2021; Dahamarudin dan Rivaie, 2013), jagung pipilan kering 3,2–5,3 ton/ha (Kasno et al., 2024), dan kedele biji kering 0,64–0,78 ton/ha (Yafizam, 2009; Endriani et al., 2021). Hasil-hasil penelitian menunjukkan bahwa melalui implementasi berbagai inovasi teknologi pemupukan P yang ada, lahan kering masam mampu memberikan produksi gabah sebesar 3,7–5,4 ton/ha (Toha, 2007; Septiyana et al., 2021), meningkat 59–85% dibandingkan produktivitas dengan paket teknologi petani. Produktivitas jagung menjadi 7,0–11,0 ton/ha pipilan kering (Kasno et al., 2024), meningkat 100–110%. Hasil kedelai kering 2,0–2,7 ton/ha (Harsono et al., 2014; Endriani et al., 2018; Diptaningsari dan Rivaie, 2021), meningkat 212–246%. Ini berarti penggunaan inovasi teknologi yang sesuai di

lahan kering masam dapat meningkatkan produktivitas tanaman mendekati potensi hasilnya dan penggunaan pupuk P merupakan kunci utama peningkatan produktivitas tersebut.

Pupuk P anorganik saat ini harganya masih relatif mahal dan makin sulit didapatkan. Untuk itu, diperlukan inovasi lain yang lebih murah dan efektif, diantaranya adalah pemanfaatan fosfat alam (FA), yang dapat diproses secara sederhana menjadi “Fosfo-kompos”. Fosfat alam merupakan bahan mentah dalam industri pembuatan pupuk P anorganik (TSP, SP-36, dll.) yang juga dapat diaplikasikan langsung ke lahan sebagai sumber P (Rivaie et al., 2008a; Van Kauwenbergh et al., 2013). Dibandingkan dengan aplikasi pupuk TSP, aplikasi langsung FA di lahan kering masam memberikan efektivitas yang relatif sama dengan TSP (Chien dan Friesen 2000; Adiningsih et al., 2001; Rivaie et al., 2008a; Rivaie dan Tillman, 2010a; Rivaie, 2014b; 2015a), lebih murah, tersedia lebih lambat, dan memiliki efek residu beberapa musim berikutnya (Smalberger et al. 2006; Rivaie and Tillman, 2009a; Rivaie dan Loganathan, 2010b; Husnain et al., 2014), serta memiliki efek pengapuran (Chien dan Friesen 2000; Rivaie, 2015a; Yusnaini et al., 2021).

Fosfo-kompos adalah produk FA yang telah ditingkatkan reaktifitasnya melalui pengomposan dengan bahan organik dan mikroba pelarut fosfat, dapat meningkatkan kesuburan tanah masam (Rivaie et al., 2008a; Ditta et al., 2016; Niswati et al., 2021; Yusnaini et al., 2021; Sabah et al., 2022). Pendayagunaan teknologi fosfo-kompos diharapkan dapat menjadi inovasi teknologi pengelolaan lahan kering masam guna meningkatkan produktivitas lahan dan tanaman secara optimal dan berkelanjutan, serta memberi kontribusi yang nyata bagi ketahanan pangan nasional.

II. DINAMIKA TEKNOLOGI PENGELOLAAN HARA FOSFOR (P) PADA LAHAN KERING MASAM

Teknologi pengelolaan hara P pada lahan kering masam di Indonesia terus mengalami dinamika dari waktu ke waktu, seiring dengan tuntutan kebutuhan dan kemajuan ilmu dan teknologi yang ada. Sejak tahun 1960-an hingga kini, perkembangan teknologi penggunaan pupuk P dapat dikelompokkan menjadi empat periode.

A. Era Pertanian Tradisional (Periode Pra 1960)

Pada periode tahun 1960-an banyak penelitian pertanian terkait pemanfaatan fosfat alam (FA) yang dilakukan di manca negara (Van Kauwenbergh et al., 2013). Sebagai contoh, berbagai penelitian lapangan di New Zealand melaporkan bahwa FA akan memberikan hasil yang efektif jika diaplikasikan pada tanah-tanah masam sebagai pengganti pupuk P anorganik (sintesis) (Hedley dan Bolan, 2003). Pada periode ini, pertanian di Indonesia masih berada pada era tradisional (subsisten), yaitu pertanian dimana sebagian besar hasil panen dikonsumsi sendiri oleh keluarga. Petani mengenal dua pola pertanian menurut agroekosistemnya, yaitu pertanian lahan basah (sawah) atau rawa-rawa dan lahan kering (ladang atau tegal). Lahan pertanian basah ditanami padi sawah atau pohon sagu yang tumbuh alami, sedangkan lahan kering ditanami padi ladang, jagung, umbi-umbian, kacang-kacangan, buah-buahan, dan sayuran (Alfons dan Rivaie, 2011; 2012abc; Rivaie, 2013a; Rivaie, 2014c).

Di daerah-daerah luar Pulau Jawa, petani lokal umumnya masih menerapkan sistem perladangan berpindah. Selain

menanam padi ladang, petani juga mengumpulkan dan/atau menanam berbagai sumber pangan lokal, yaitu sagu dan umbi-umbian, seperti keladi, gadung, kacang, hotong, dll. (Rivaie, 2011b; Alfons dan Rivaie, 2011; 2012abc; Rivaie, 2013a). Produktivitas tanaman masih bergantung kepada kesuburan tanah alami seperti yang ada pada sistem hutan. Sebagian petani menanam tanaman pangan di sela-sela tanaman hutan dalam pola-pola agroforestry atau pada lahan-lahan bukaan baru dengan kesuburan yang masih tinggi (Rivaie, 2014d; 2015b). Sistem ladang berpindah ini pada umumnya terdapat di daerah yang berpenduduk sedikit atau jarang. Pembukaan lahannya dilakukan dengan cara tebas dan bakar (*slash and burn*) yang menghasilkan kation-kation basa yang meningkatkan pertumbuhan tanaman (Leiwakabessy, 1989). Penanaman bibit dengan cara tanpa olah tanah (*no-tillage*) atau olah tanah konservasi (*conservation tillage*) dan bibit ditanam dengan cara ditugal (Rivaie et al., 1993; Isnaini et al., 2023). Tidak ada upaya khusus petani untuk memelihara kesuburan tanah, apalagi melakukan pemupukan. Setelah beberapa kali tanam, kesuburan tanah mulai menurun dan lahan kering mulai didominasi oleh alang-alang (*Imperata cylindrica*) dan kondisi ini memaksa petani berpindah mencari lahan yang masih subur (Leiwakabessy, 1989; Darwis dan Rivaie, 1993).

Para petani transmigrasi dari Pulau Jawa di era ini sudah terbiasa dengan praktek budidaya secara menetap di lahan kering. Teknik-teknik bercocok tanam mereka peroleh secara turun-temurun atau berbagi pengalaman dengan sesama petani dan pengalaman sendiri, melalui uji coba sederhana, sebagai upaya untuk meningkatkan produksi. Sudah ada prinsip ilmiah walaupun masih berkadar rendah. Sebagai contoh, petani akan mulai mengolah tanahnya setelah disesuaikan dengan gejala iklim (Leiwakabessy, 1989; Rivaie et al., 2008b). Pada era

pertanian tradisional, petani di Indonesia menghadapi berbagai kendala dalam mengelola lahan kering masam, terutama karena keterbatasan pengetahuan, belum tersedianya inovasi teknologi yang dibutuhkan, dan kekurangan sumber daya, khususnya modal (Leiwakabessy, 1989; Rivaie et al., 2008b). Sebagai contoh, umumnya petani belum menggunakan pupuk, sehingga produktivitas masih sangat rendah. Produktivitas di daerah Kabupaten Tulang Bawang, Lampung misalnya, yang merupakan lahan kering masam bukaan baru dari hutan sekunder atau primer, tanahnya masih bersifat masam. Lahan tersebut memberikan hasil padi gogo hanya 1.260 kg/ha (gabah kering panen), jagung 510 kg/ha (pipilan kering panen), kedele 250 kg/ha (biji kering), kacang tanah 950 kg/ha (polong kering) dan singkong 15.600 kg/ha (basah). Hasil yang masih sangat rendah ini selain karena tanahnya yang masam, juga karena belum digunakannya pupuk, baik pupuk organik maupun anorganik termasuk pupuk P sintesis ataupun fosfat alam (Maryadi, 1986; Rivaie, 2015a).

B. Era Pertanian Inovatif (Periode 1960–1980)

Titik awal penelitian penggunaan pupuk termasuk pupuk P pada tanah-tanah masam di Indonesia dimulai sejak tahun 1970-an, dimana rekomendasi pemupukan mulai didasarkan pada pendekatan pengujian tanah (Leiwakabesy, 1989; Adiningsih, 1992). Periode ini bersamaan pula dengan dimulainya penelitian pola tanam (*cropping patterns*) di lahan petani dengan mengikut sertakan petani sebagai pemberi masukan dalam perencanaan dan pelaksanaan (Adnyana, 2000; Rivaie et al., 2008b). Penelitian tersebut bekerja sama dengan *International Rice Research Institute* (IRRI) dan beberapa negara di Asia, dimulai pada tahun 1973 di Indramayu, Jawa Barat untuk lahan sawah

tadah hujan, serta di Lampung untuk lahan kering (Rivaie dan Karmawati, 1993; Adnyana, 2000, Rivaie dan Suwardih, 2014).

Pada era ini program penelitian peningkatan produksi bahan pangan sudah mulai dilakukan pada lahan sawah irigasi teknis dan pada lahan sub-optimal. Di Indonesia, lahan sub-optimal tersebut terdiri dari lahan sawah irigasi sederhana, sawah tadah hujan, sawah rawa pasang surut dan sawah lebak, lahan kering masam dan lahan kering beriklim kering. Terdapat beberapa lahan sub-optimal yang memiliki kendala utama yang sama, yaitu kemasaman tanah dalam pemanfaatannya untuk pertanian tanaman pangan, meskipun berada pada agroekosistem yang berbeda, seperti: (i) lahan kering masam, dengan masalah kemasaman $\text{pH} < 5,5$ akibat kelarutan Al yang tinggi; (ii) lahan rawa pasang surut, dengan masalah keberadaan lapisan pirit yang sangat masam; dan (iii) lahan rawa lebak, dengan kendala kemasaman karena pengaruh pirit dan pelapukan gambut (Irawan et al., 2015; Mulyani et al., 2017), disamping kesamaan maupun perbedaan beberapa sifat-sifat fisik, kimia, dan biologi tanah lainnya.

Lahan kering masam merupakan tanah yang terlapuk lanjut dengan beberapa karakteristik utama yang juga sekaligus merupakan kendala bagi pemanfaatannya untuk budidaya tanaman pangan. Perlu pemahaman yang lebih baik tentang karakteristik tersebut, sehingga dapat menjadi landasan dalam menentukan teknologi yang perlu dikembangkan. Adapun karakteristik utama dari lahan kering masam seperti yang diuraikan berikut ini.

1. Kendala Kemasaman Tanah Tinggi

Sebagian besar tanah di wilayah tropis merupakan tanah masam dengan kejenuhan Al dan kapasitas fiksasi P yang tinggi.

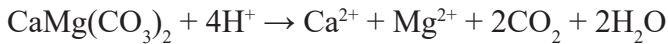
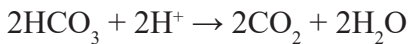
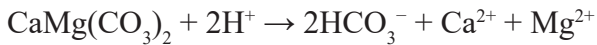
Walaupun demikian, tanaman di daerah tropis dapat tumbuh hampir sepanjang tahun (Rivaie, 2014ab; Sukarman et al., 2024). Tanah dapat menjadi masam karena beberapa alasan, yaitu antara lain karena bahan induk yang memang masam dan karena secara alami tanahnya kekurangan kation seperti Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , dan Na^+ . Kekurangan kation-kation ini karena curah hujan yang berlebihan yang mencuci elemen-elemen ini ke dalam profil tanah yang lebih dalam. Hal ini terjadi di daerah yang curah hujannya melebihi evapotranspirasi. Di daerah ini, asidifikasi tanah merupakan proses yang berkelanjutan yang dapat dipercepat oleh aktivitas tanaman, hewan, dan manusia, atau diperlambat melalui praktik pengelolaan yang tepat (Bolan dan Hedley, 2003).

Kemasaman tanah juga dapat muncul dari penggunaan pupuk ammonium (NH_4^+) yang berkepanjangan, pengambilan kation melalui tanaman yang dipanen, pencucian, dan pelepasan asam organik dari dekomposisi sisa tanaman dan limbah organik. Penggunaan tanaman leguminosa (kacang-kacangan) secara terus-menerus dapat lebih meningkatkan kemasaman tanah pertanian (Bolan dan Hedley, 2003; Rivaie dan Tillman, 2009b). Pengasaman tanah juga dapat terjadi akibat pelepasan H^+ selama siklus karbon (C), nitrogen (N), dan sulfur (S) dalam sistem tanah–tanaman–hewan, dan melalui hujan asam akibat polusi industri (Bolan dan Hedley, 2003; Rivaie, 2014c).

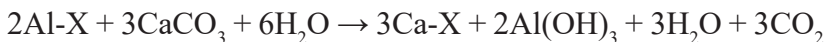
Penurunan kemasaman tanah terutama ditujukan untuk menurunkan kandungan atau kejenuhan Al dalam tanah. Bahan-bahan yang diberikan ke dalam tanah dalam upaya peningkatan pH dan penurunan kandungan Al antara lain adalah kapur (CaCO_3 , Ca(OH)_2) dan dolomit ($\text{CaMg(CO}_3)_2$). Dolomit

merupakan bahan yang mengandung CaO dan MgO (Agegnehu et al., 2021; Kasno et al., 2024b).

Pengapuran memiliki peran penting dalam mencapai hasil yang optimal bagi tanaman yang tumbuh di tanah masam. Kapur hendaknya diberikan satu minggu sebelum pemberian pupuk makro N, P, dan K, agar kondisi tanah dapat diperbaiki terlebih dahulu, sehingga pupuk yang diberikan tidak terikat oleh Al dan ketersediaan hara menjadi lebih baik. Persamaan di bawah ini menggambarkan reaksi yang terjadi ketika kapur dolomit ditambahkan ke tanah masam:



Persamaan di atas menunjukkan bahwa netralisasi kemasaman oleh kapur terjadi dalam dua tahap. Pada tahap pertama, ion kalsium (Ca) dan magnesium (Mg) bereaksi dengan ion hidrogen (H), menggantikannya dengan Ca^{2+} dan Mg^{2+} pada situs pertukaran (partikel bermuatan negatif dari tanah liat atau bahan organik), yang menghasilkan pembentukan bikarbonat (HCO_3^-). Pada tahap kedua, HCO_3^- berinteraksi dengan ion H^+ , menghasilkan karbon dioksida (CO_2) dan air (H_2O), yang meningkatkan pH. Ketika kapur larut dalam larutan tanah, Ca menggantikan aluminium (Al) dari situs pertukaran, dan anion bikarbonat bereaksi dengan ion H^+ , yang mengakibatkan peningkatan pH. Persamaan berikut menggambarkan reaksi yang terjadi ketika kapur ditambahkan ke dalam tanah masam:



Pada persamaan ini, X mewakili keterikatan pada situs pertukaran. Reaksi ini menetralkan Al dengan mengikatnya dengan ion hidroksil ($-\text{OH}$), sehingga membuatnya tidak larut

dalam air (Hartatik dan Adiningsih, 1987; Rivaie dan Asnawi, 1993; Sukarman et al., 2024). Suatu percobaan aplikasi pengapuran menunjukkan bahwa penambahan 2000 kg/ha kapur, 300 kg/ha Urea, dan 300 kg/ha TSP pada lahan kering masam di daerah transmigrasi memberikan produksi padi gogo kering giling sebanyak 1,8–4,1 ton/ha, jagung pipilan kering 3,4–10,7 ton/ha, kedelai biji 1,17–2,5 ton/ha, dan kacang tanah biji 1,5–1,6 ton/ha (Leiwakabesy, 1989).

Aplikasi langsung fosfat alam (FA) selain untuk meningkatkan ketersediaan P bagi tanaman, juga berfungsi sebagai sumber Ca (20–40%). Beberapa penelitian menunjukkan bahwa aplikasi pupuk FA pada tanah masam menghasilkan efek pengapuran yang nyata (Chien, 1982; Chien dan Friesen, 2000; Rivaie, 2015a; Yusnaini et al., 2021). Respons pertumbuhan tanaman yang positif dengan aplikasi FA dapat disebabkan oleh peningkatan pH yang diikuti dengan peningkatan ketersediaan P dan pengurangan toksisitas Al (Rivaie, 2015a; Agegnehu et al., 2021; Yusnaini et al., 2021). Pengapuran walaupun hanya menyebabkan peningkatan pH kurang dari 0,5 unit, akan tetapi penurunan Al dapat dipertukarkan bisa sangat berarti, terutama jika pH tanah kurang dari 5,5. Sebagai contoh, pada suatu studi inkubasi tanah Oxisol dari Kolombia yang diberi pupuk FA (Sechura), Al yang dapat dipertukarkan menurun dari 2,0 meq/100 g menjadi 0,40 meq/100 g. Nilai pH tanah meningkat dari 4,6 menjadi 5,0 dan Ca yang dapat dipertukarkan meningkat dari 0,2 menjadi 1,5 meq/100 g. Akibatnya, kejenuhan Al turun dari sekitar 80% menjadi 20% yang diikuti perbaikan pertumbuhan tanaman yang disebabkan oleh peningkatan ketersediaan P dan pengurangan toksisitas Al (Chien, 1982; Chien dan Friesen, 2000; Rivaie, 2015a; Yusnaini et al., 2021). Konsumsi ion H^+

untuk pelarutan pupuk fosfat alam (FA) di dalam tanah terjadi sesuai dengan persamaan berikut ini:



Pelarutan FA tersebut akan meningkatkan pH di sekitar partikel FA, yang pada gilirannya dapat menghambat reaksi pelarutan dan mengubah lingkungan tanah mikro di sekitarnya (Zoyza et al., 1998). Berbagai aspek agronomi dan ekonomi perlu dipelajari lebih lanjut untuk menilai potensi efektivitas pupuk FA untuk tujuan pengapuran lahan kering masam pada pertanaman berbagai varietas unggul baru (VUB) padi gogo, kedelai, ataupun jagung yang mulai banyak digunakan oleh petani di Indonesia.

2. Kendala Al Tinggi

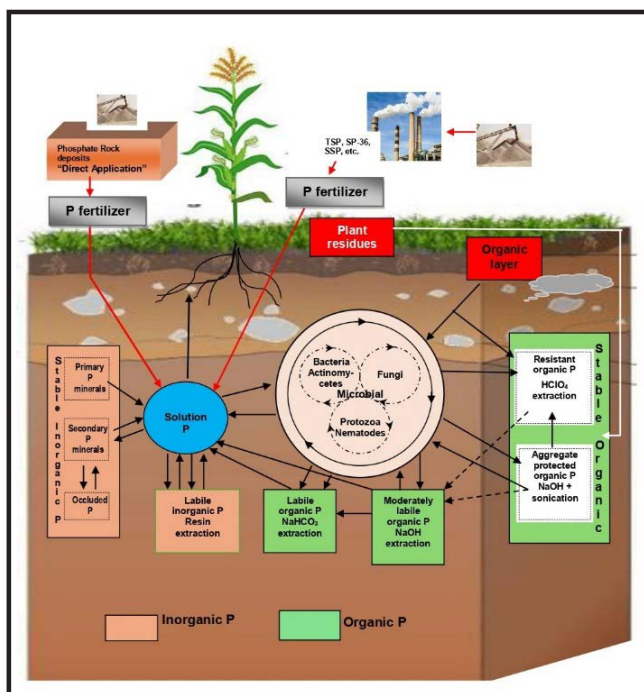
Pada tanah masam, rendahnya kejenuhan Ca dan konsentrasi Al^{3+} yang tinggi di lapisan subsoil akan menghambat pertumbuhan akar. Akibatnya tanaman lebih rentan terhadap stres air dan kekurangan nutrisi. Upaya penurunan kandungan Al dapat dilakukan dengan penambahan dolomit atau kapur. Kebutuhan penggunaan kapur dapat dihitung berdasarkan Al-dd, kejenuhan Al, dan pemberian kapur untuk mencapai pH 7,0. Sebagai contoh, kebutuhan kapur dengan 1 kali Al-dd tanah dari Situng adalah 3,5 t/ha (Hartatik dan Adiningsih, 1987). Pada tanah yang sangat masam, aplikasi kapur diperlukan untuk mengurangi toksisitas Al pada tanaman yang peka. Suatu penelitian pada tanah Oxisol di Kolombia (pH 4,8 dan kejenuhan Al 75%), digunakan jagung toleran asam cv. CIMMYT SA3 untuk mengevaluasi efektivitas agronomis pupuk FA-Huila, dan FA-Capinota, serta campuran pupuk FA (Huila dan Capinota) dan TSP. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pupuk FA kurang

efektif dibandingkan TSP. Namun, campuran FA-Capinota dan TSP yang dipadatkan terbukti sama efektifnya dengan TSP untuk tanaman musim pertama, setelah aplikasi hanya 300 kg/ha kapur dolomit. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa jagung toleran tanah masam mampu memanfaatkan P yang tidak larut dalam air pada campuran FA-Capinota dan TSP yang dipadatkan. Aplikasi kapur sangat penting untuk tanaman pangan di tanah sangat masam, meskipun pupuk FA juga diaplikasikan. Namun, dosis kapur yang diaplikasikan harus dikaji terlebih dahulu untuk mencegah dampak negatif pada pelarutan pupuk FA. Studi lebih lanjut juga diperlukan untuk menguji strategi yang mengintegrasikan penggunaan varietas tanaman toleran tanah masam dengan aplikasi pengapuran dan penggunaan pupuk FA untuk mendapatkan produksi tanaman yang tinggi secara berkelanjutan (Chien dan Friesen, 2000; Endriani et al., 2018; Agegnehu et al., 2021).

3. Kendala P Tanah Rendah

Unsur P adalah salah satu hara yang paling membatasi produksi tanaman. Efisiensi pemupukan P oleh tanaman biji-bijian (serealia) bervariasi antara 15 dan 30%. Dari sejumlah pupuk P yang ditambahkan, hanya sebagian kecil saja yang diserap oleh tanaman, sisanya terlarut ke dalam tanah, yang menyumbang pada degradasi tanah dan Eutrofikasi air (Rivaie dan Tillman, 2010a; Rivaie, 2011a; Rivaie 2014b; Dhillon et al., 2017). Bagaimana perjalanan unsur hara P pada tanah di lahan kering sampai pada permukaan akar untuk diserap oleh tanaman dapat dilihat pada Gambar 1 di bawah. Bentuk unsur P dalam tanah dapat dibagi menjadi dua kategori utama, yaitu bentuk P anorganik (seperti Al, Fe, dan Ca-P) dan bentuk P organik. Transformasi P di tanah dipengaruhi oleh proses kimiawi dan biologis (Chauhan et al., 1981; Ditta dan Khalid, 2016; Amarasinghe et al., 2022).

Tanaman menyerap P dari larutan tanah terutama sebagai anion H_2PO_4^- atau HPO_4^{2-} . Pada lingkungan tanah-tanah masam P dapat mengendap sebagai Fe-P dan Al-P, yang tidak tersedia bagi tanaman (Chauhan et al., 1981; Chien dan Friesen, 2000; Rivaie et al., 2008a; Rivaie dan Tillman, 2009c; 2010; Rivaie dan Loganathan, 2010b). Kekurangan hara P adalah masalah nutrisi yang penting bagi tanaman pangan, terutama di tanah-tanah Oxisol dan Ultisol, yang biasanya memiliki kandungan P total dan tersedia yang rendah serta kapasitas fiksasi P tinggi yang menghambat serapan oleh tanaman (Rivaie dan Tillman, 2009c; Rivaie, 2014a; Endriani et al., 2018).



Sumber: Chauhan et al. (1981), Rivaie (2004), dengan beberapa penyesuaian

Gambar 2.1 Siklus P di Dalam Tanah

Untuk meningkatkan produktivitas pertanian pada lahan kering masam, perlu ditambahkan unsur hara (pupuk) untuk memenuhi kebutuhan tanaman dan menggantikan hara yang hilang terangkut panen. Berbeda dengan hara N, yang dapat disediakan secara tidak langsung melalui fiksasi oleh bakteri rhizobia pada akar tanaman kacang-kacangan, hara P harus disediakan dari sumber pupuk P anorganik atau organik (Chien dan Friesen, 2000). Ketika pupuk P ditambahkan ke tanah, dengan cepat bereaksi (sekitar 70%) dengan kation seperti Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , dan Fe^{3+} , membentuk beberapa senyawa yang tidak larut. Oleh karena itu, upaya meningkatkan pemanfaatan P oleh tanaman sangat penting dari sudut pandang ekologis dan ekonomi (Chauhan et al., 1981; Chien dan Friesen, 2000; Rivaie et al., 2008a; Rivaie dan Tillman, 2009c; 2010; Amarasinghe et al., 2022).

4. Kendala C Organik Tanah Rendah

Budidaya tanaman semusim (pangan) secara intensif pada lahan kering masam akan mempercepat kehilangan bahan organik dan unsur hara, serta tanah menjadi rentan terhadap pemadatan dan erosi. Berkurangnya bahan organik mengakibatkan tanah mengalami penurunan produktivitas. Di daerah tropis kandungan bahan organik yang rendah adalah hal yang umum akibat tingginya proses dekomposisi (Rivaie dan Isnaini, 2013; Sukarman et al., 2024; Yusnaini et al., 2024).

Salah satu upaya untuk mengatasi kendala kemasaman tanah adalah dengan memanfaatkan bahan organik. Sebagai gambaran, pengapuran pada padi gogo yang ditanam pada tanah Oxisol memberikan produksi padi kering giling 2,7 ton/ha, sedangkan pembenaman pupuk hijau memberikan produksi 2,9 ton/ha (Basri

dan Zaini, 1992). Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan bahan organik dapat mensubstitusi kebutuhan kapur (Basri dan Zaini, 1992; Sukarman et al., 2024). Mekanisme pembenaman bahan organik serupa dengan pengapuran, yaitu dengan mengikat Al dan Fe di larutan tanah serta menambah ketersediaan unsur-unsur hara seperti N, P dan K. Tanah yang miskin bahan organik akan memiliki kemampuan yang lebih rendah dalam menyimpan hara dari pupuk, sehingga efisiensi pemupukan rendah karena sebagian besar pupuk hilang dari zona perakaran. Kombinasi penggunaan pupuk organik dan pupuk anorganik telah terbukti sebagai strategi terbaik dalam pengelolaan kesuburan tanah di daerah tropis (Makinde dan Agboola, 2002; Rivaie, 2013; Rivaie et al., 2013). Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa penambahan bahan organik *Azolla pinnata* dapat meningkatkan P tersedia tanah dan produksi padi (Rivaie et al, 2013).

C. Era Pertanian Modern (1980–2000)

Pertanian modern di Indonesia dimulai tahun 1979 (awal Revolusi Hijau), di mana pemerintahan Orde Baru melakukan investasi pertanian besar-besaran dengan puncak tercapainya swasembada pangan nasional pada tahun 1984. Pada era ini, fokus pertanian tidak hanya pada peningkatan produksi, tetapi juga peningkatan pendapatan petani dan pemanfaatan sumberdaya lahan secara maksimal (Adiningsih, 1992).

Sebagian besar lahan kering yang terdapat di Pulau Sumatera, Kalimantan, Sulawesi dan Papua merupakan tanah-tanah masam yang sudah terlapuk lanjut dan berkesuburan rendah (Mulyani et al., 2017; Sukarman et al., 2024). Kendala-kendala pemanfaatannya harus diatasi agar produksi tanaman optimal dan kesuburan tanah terpelihara. Program penelitian pengelolaan pupuk di lahan kering masam sudah dimulai sejak

awal tahun 1970-an (Leiwakabesy, 1989; Adiningsih, 1992) yang menghasilkan inovasi-inovasi teknologi yang telah digunakan untuk mengatasi kendala-kendala teknis budidaya pertanian tanaman pangan. Penelitian komprehensif tentang pemupukan berimbang telah dilakukan pada tahun 1990–2000 dalam skala besar. Hasil penelitian tersebut antara lain berupa Peta Tanah Status P skala 1:250.000 untuk menetapkan rekomendasi pupuk P. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa pemupukan berimbang spesifik lokasi secara signifikan meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk P dan hasil padi (Rochayati et al., 2001).

Khusus penelitian pemupukan P yang bersumber dari FA pada tanaman pangan telah dilakukan sejak tahun 1980-an. Sebenarnya pertanian di Indonesia sejak awal tahun 1980 telah menggunakan pupuk FA, walau masih terbatas pada tanaman perkebunan, seperti karet, kelapa sawit, kelapa, kopi, coklat dan teh. Bahan FA tersebut umumnya berasal dari Yordania, Tunisia, Aljazair, Maroko, dan Pulau Christmas. Beberapa percobaan menunjukkan bahwa aplikasi langsung FA yang reaktif pada lahan kering masam memberikan efektivitas yang sama atau lebih dibandingkan dengan pupuk P anorganik (TSP atau SP–36). Sebagai contoh, percobaan selama empat musim pada Ultisols di Sitiung, Sumatera Barat dengan pH 4,5 dan kejenuhan Al 78% menunjukkan bahwa pada dosis P 160 kg/ha, semua pupuk FA yang digunakan (North Carolina, Ciamis, dan Tunisia) memiliki efektivitas yang melampaui efektivitas SP–36 (Adiningsih et al., 2001). Penelitian lain menunjukkan bahwa efektivitas agronomi dari berbagai sumber FA yang reaktif adalah setara atau bahkan

melebihi efektivitas agronomi pupuk TSP (Partohardjono dan Adiningsih, 1991).

Menjelang tahun 2000-an, kegiatan penelitian menghasilkan inovasi teknologi rekomendasi pemupukan yang lebih bersifat spesifik lokasi untuk skala kabupaten. Pada tahun 2001 telah dikembangkan inovasi aplikasi software sistem pakar pemupukan *Phosphorus and Potassium Decission Support System* (PKDSS). Sistem pakar PKDSS pertama kali diluncurkan pada tahun 2001 dengan versi 1 (beta), diikuti dengan versi 2 (beta) pada tahun 2005, yang dirancang untuk tanaman padi, jagung, dan kedelai. Sistem pakar pupuk PKDSS adalah suatu aplikasi berbasis komputer yang bertujuan untuk mengatasi masalah kesuburan tanah, khususnya dalam menentukan dosis pupuk yang tepat yang dapat digunakan oleh pengguna awam di lapangan. Rekomendasi pupuk dalam PKDSS didasarkan pada hasil uji tanah. Pada tahun 2005 juga telah dikembangkan inovasi teknologi pemupukan termasuk hara P, berupa *Soil-Test Kit* untuk padi gogo, jagung, dan kedelai di lahan kering (Sulaeman et al., 2012).

D. Era Pertanian Berkelanjutan (2000 - Sekarang)

Sejak tahun 2010-an dimulai kegiatan penelitian inventarisasi potensi sumberdaya hayati tanah, untuk perbaikan produktivitas tanah dan peningkatan efisiensi pemupukan P pada skala laboratorium dan rumah kaca. Penelitian di bidang pupuk hayati pada tahap awal misalnya, menginventarisir *Azotobacter* sp., bakteri pelarut P, dan jamur pelarut P yang potensial. Beberapa produk yang mengandung bakteri pelarut P telah dihasilkan, antara lain Rhizoplus, Nodulin, BioPhos, SMESh, Agrimeth, dan BioNutrient. Pada tahun 2011 dikembangkan inovasi formula pupuk majemuk berteknologi nano, antara lain pupuk P-Nano,

yang memanfaatkan FA secara langsung sebagai sumber pupuk nano (Balai Penelitian Tanah, 2020).

Teknologi aplikasi FA di lahan kering masam setelah tahun 2000-an lebih mengarah kepada teknologi peningkatan kelarutan atau efektivitas agronominya, agar ketahanan pangan melalui peningkatan produktivitas yang berkelanjutan yang disertai oleh peningkatan pendapatan petani dapat tercapai. Inovasi teknologi baru yang hemat biaya, spesifik lokasi, dan berkelanjutan perlu segera ditemukan dan ditransfer ke petani. Berbagai hasil studi menunjukkan bahwa produksi tanaman yang berkelanjutan dengan ketergantungan pada penggunaan pupuk anorganik dengan dosis yang rekomendasi seperti saat ini, tidak dapat dilakukan lagi di masa mendatang. Penggunaan pupuk anorganik dan organik secara terpadu akan menjadi strategi berkelanjutan dan akan mengurangi ketergantungan terhadap pupuk anorganik buatan pabrik (Niswati et al., 2021; Amarasinghe et al., 2022). Pada penggunaan pupuk P bersumber FA di lahan kering masam, strategi yang dilakukan antara lain adalah dengan teknologi mengurangi ukuran partikel FA, mengasamkan FA dengan asam organik alami atau sintetik melalui pengomposan (Rivaie et al., 2008a; Rivaie 2015a; Niswati et al., 2021), dan atau melalui penambahan bio-inokulan (Amarasinghe et al., 2022).

Pada era ini, hasil-hasil kajian cara pengelolaan hara P bersumber FA di lahan kering masam pada beberapa tanaman pangan menunjukkan bahwa aplikasi langsung FA tunggal ataupun yang diintegrasikan dengan amelioran berupa pupuk kandang atau kompos dapat meningkatkan produksi tanaman dan keuntungan ekonomi. Pada padi gogo peningkatannya mencapai 3,7–4,3 ton/ha gabah kering panen (Septiyana et al., 2021); jagung mencapai 8,0–11,0 ton/ha pipilan kering (Kasno

et al., 2023); dan kedelai menghasilkan 2,4–2,7 ton/ha biji kering (Endriani et al., 2018).

Suatu percobaan aplikasi langsung FA reaktif dilakukan pada pertanaman jagung di lahan petani (*on-farm*) di tanah Ultisol di Pleihari, Provinsi Kalimantan Selatan. Perlakuan yang diuji adalah: (i) praktek petani, (ii) pupuk FA 1 ton/ha + pupuk kandang 1 ton/ha, dan (iii) pupuk FA 1 ton/ha + pupuk kandang 2 ton/ha. Pada percobaan ini FA yang dicoba berasal dari Tunisia (29,0% P_2O_5 ; 12,2% dalam asam sitrat 2%), Maroko (31,7% P_2O_5 ; 11,0% dalam asam sitrat 2%), Senegal (33,0% P_2O_5 ; 8,6% dalam asam sitrat 2%), dan Yordania (33,3% P_2O_5 ; 16,0% dalam asam sitrat 2%). Produksi jagung meningkat nyata pada perlakuan 1 ton/ha FA yang ditambah pupuk kandang 1 atau 2 ton/ha. Percobaan ini juga membuktikan bahwa pupuk FA-Maroko memberikan keuntungan dari aspek agronomi maupun ekonomi, serta adanya efek residual (Husnain et al., 2014). Analisis usaha tani dari masing-masing perlakuan dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 2.1 Analisis Usaha tani Jagung dengan Aplikasi Langsung Fosfat Alam pada Lahan Kering Masam di Pleihari, Kalimantan Selatan

Musim tanam	Perlakuan	Biaya produksi (Rp/ha)	Pendapatan (Rp/ha)	R/C rasio
I	A	1.341.385	1.394.595	1,50
	B	2.238.730	836.230	1,21
	C	2.488.715	766.020	1,18
II	A	1.530.255	370.090	1,12
	B	1.145.035	1.829.710	1,61
	C	1.425.025	2.484.550	1,71
III	A	1.599.615	808.605	1,24
	B	1.325.830	1.688.950	1,51

Musim tanam	Perlakuan	Biaya produksi (Rp/ha)	Pendapatan (Rp/ha)	R/C rasio
IV	C	1.585.930	2.088.195	1,58
	A	1.401.820	1.527.365	1,63
	B	1.208.190	2.256.665	1,98
	C	1.488.180	2.752.980	2,04

Sumber: Husnain et al. (2014)

Keterangan: A = praktek petani (urea 340 kg/ha, SP-36 11 kg/ha, KCl 100 kg/ha, pupuk kandang 1540 kg/ha); B = pupuk FA 1 ton/ha, pupuk kandang 1 ton/ha, urea 300 kg/ha, KCl 100 kg/ha; C = pupuk FA 1 ton/ha, pupuk kandang 2 ton/ha, urea 300 kg/ha, KCl 100 kg/ha; Pendapatan = selisih penerimaan dengan biaya produksi; R/C rasio = perbandingan antara penerimaan dan biaya produksi

Ke depan, inovasi-inovasi teknologi pupuk P berbasis FA hendaknya merupakan teknologi pemupukan P yang bersifat spesifik-lokasi, yang dikembangkan dengan menggunakan aplikasi komputer *phosphate rock decision support system* (PRDSS) dalam menentukan rekomendasi pupuk P. Teknologi pemupukan yang demikian merupakan inovasi teknologi yang berwawasan eko-region karena menggunakan input data tanah, curah hujan, jenis komoditas, dan pola tanam lokal (Smalberger et al. 2006; Rivaie dan Pasandaran, 2015; Tafakresnanto et al., 2024). Aplikasi komputer tersebut hendaknya tidak hanya mempermudah pengelolaan data dan informasi saja, tetapi juga merupakan perangkat ramah pengguna yang dapat digunakan tidak hanya untuk penyuluh atau petani milenial saja, tetapi juga untuk petani yang sudah lanjut usia.

Selanjutnya untuk mendukung kemudahan teknis di lapangan, perlu pula dikembangkan alat sensor pengukur tingkat reaktifitas FA (rendah, sedang, atau tinggi) sebagai acuan dalam pemanfaatannya, khususnya acuan metode atau inovasi teknologi yang diperlukan untuk meningkatkan reaktifitas jenis FA tertentu atau mengukur tingkat reaktifitasnya pada fase-fase selama pengomposan.

III. INOVASI TEKNOLOGI FOSFO-KOMPOS UNTUK PENINGKATAN PRODUKTIVITAS LAHAN DAN TANAMAN

Fosfo-kompos, sebagai inovasi produk pupuk organik yang berbasis fosfat alam (FA), menawarkan potensi besar untuk meningkatkan ketersediaan nutrisi esensial bagi tanaman, memperbaiki fisik tanah, dan pada akhirnya, meningkatkan produktivitas lahan kering masam dan hasil panen. Di beberapa daerah di Indonesia deposit FA dalam jumlah terbatas juga ditemukan. Tetapi selain jumlahnya yang tidak potensial untuk diusahakan, kadar P total dan tingkat kelarutannya juga rendah, sehingga kurang tersedia bagi tanaman.

A. Deposit dan Karakteristik Fosfat Alam

Fosfat alam, juga dikenal sebagai batu fosfat (*phosphate rock*) adalah istilah yang biasa digunakan untuk beberapa jenis batuan yang mengandung mineral PO_4^{-3} dalam jumlah yang signifikan atau mineral yang memiliki ion PO_4^{-3} dalam struktur kimianya. Meskipun banyak jenis batuan yang mengandung P, tetapi batuan yang mengandung jumlah PO_4^{-3} yang bernilai ekonomi sebagai bahan tambang atau bijih tambang jarang ditemukan (Kasno et al., 2009; Van Kauwenbergh et al., 2013). Keberadaan deposit dan karakteristik fosfat alam dapat disimak pada uraian berikut ini.

1. Deposit dan Jenis Fosfat Alam

Fosfat alam dapat diklasifikasikan ke dalam tiga jenis berdasarkan proses pembentukannya, yaitu: (i) Fosfat primer, yang terbentuk dari pembekuan magma alkali yang mengandung mineral fosfat apatit, terutama fluor apatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$). Apatit terdiri dari Chlorapatite $3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{CaCl}_2$ dan Fluorapatite $3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{CaF}_2$; (ii) Fosfat sedimen (marin), yang merupakan endapan fosfat yang terbentuk di dasar laut dalam, pada lingkungan yang tenang dan alkali; dan (iii) Fosfat guano, yang berasal dari akumulasi sekresi burung pemakan ikan dan kelelawar. Umumnya kadar P_2O_5 dalam FA bervariasi antara 16–37%, bahkan untuk fosfat yang berasal dari batuan beku dapat mencapai 42% P_2O_5 . Sementara itu, kadar P_2O_5 dalam deposit sedimen cenderung lebih homogen, berkisar antara 20–32%. Sebagian besar FA yang ditemukan di Indonesia mempunyai kandungan total P yang rendah, sehingga hanya sesuai untuk penambangan rakyat (Kasno et al., 2009; Van Kauwenbergh et al., 2013).

Deposit fosfat merupakan sumberdaya alam yang sangat vital bagi industri pupuk P. Hanya beberapa negara yang memiliki deposit fosfat yang ekonomis dan cocok untuk diproses menjadi pupuk atau digunakan langsung sebagai pupuk. Amerika Serikat, Maroko, dan China, bersama dengan Federasi Rusia, menyumbang 75% dari total produksi pupuk P dunia. Negara-negara Arab berkontribusi sekitar 25% dari total produksi pupuk P dunia (Kasno et al., 2009; Van Kauwenbergh et al., 2013).

Di Indonesia deposit fosfat ditemukan di kawasan pegunungan karang, batu gamping, atau dolomit, yang merupakan deposit gua yang tersebar di wilayah Aceh, Sumatera Utara, Sumatera Barat, Jawa Barat, Jawa Tengah, Jawa Timur, Nusa Tenggara, dan Papua. Berdasarkan hasil survei eksplorasi, cadangan

FA di Indonesia diperkirakan mencapai 895 ribu ton. Jumlah cadangan yang sangat kecil ini tidak potensial untuk memenuhi kebutuhan pupuk P baik skala lokal atau regional, walaupun sifat reaktifitasnya yang rendah bisa ditingkatkan melalui proses pembuatan fosfo-kompos. Cadangan tersebut tersebar di Pulau Jawa (66%), Sumatera Barat (17%), Kalimantan (8%), Sulawesi (5%), serta sekitar 4% di Papua, Aceh, Sumatera Utara, dan Nusa Tenggara. Perkiraan cadangan terbesar terdapat di Jawa Timur, khususnya di daerah Tuban, Lamongan, Gresik, dan Madura, yang mencapai sekitar 313 ribu ton. Secara umum, kadar P_2O_5 total pada deposit FA di Indonesia sangat bervariasi, mulai dari yang rendah hingga sedang (Kasno et al., 2009).

2. Karakteristik Fosfat Alam

Mineral fosfat terdapat sekitar 150 jenis dengan kandungan P antara 1–38% P_2O_5 . Beberapa deposit FA ditemukan dalam bentuk apatit. Secara umum, deposit FA berasal dari batuan sedimen dalam bentuk karbonat fluorapatite, yang dikenal sebagai francolite ($Ca_{10-x-y}Na_xMg_y(PO_4)_{6-z}(CO_3)_{z/3}F_{0,4z}F_2$). Deposit yang berasal dari batuan beku dan metamorfik umumnya berupa fluorapatit ($Ca_{10}(PO_4)_6F_2$) dan hidroksi apatit ($Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$). Deposit fosfat yang terbentuk dari ekskresi burung dan kelelawar (guano) biasanya ditemukan dalam bentuk karbonat hidroksi apatit ($Ca_{10}(PO_4,CO_3)_6(OH)_2$). Mineral lainnya, seperti kuarsa, kalsit, dan dolomit, ditemukan sebagai mineral sekunder dalam apatit. Selain fosfat dan karbonat, batuan FA juga mengandung berbagai unsur seperti Ca, Mg, Al, Fe, Si, Na, Mn, Cu, Zn, Mo, B, Cd, Hg, Cr, Pb, As, U, V, F, dan Cl. Unsur utama yang terdapat dalam FA antara lain P, Al, Fe, dan Ca. Secara kimiawi, FA terdiri dari P dengan dominasi Ca-P, Al-P, atau Fe-P, dan unsur-unsur lain sebagai unsur ikutan. Unsur ikutan yang perlu diperhatikan adalah kandungan logam berat yang cukup tinggi, seperti Cd,

Cr, Hg, Pb, dan U (Kasno et al., 2009; Van Kauwenbergh et al., 2013).

Fosfat alam memiliki tingkat kelarutan yang tinggi dalam kondisi asam, sehingga sangat cocok digunakan sebagai sumber pupuk P pada lahan kering masam seperti Ultisol, Oxisol, dan sebagian Inceptisol. Secara umum, kelarutan FA akan meningkat seiring dengan penurunan pH, Ca yang dapat ditukar, dan P yang terlarut dalam tanah. Dalam jangka panjang, FA memiliki efek residu yang masih bermanfaat pada beberapa musim kemudian. Sebaliknya, FA kurang cocok untuk tanah dengan pH netral atau alkalin (Rivaie et al., 2008a; Rivaie dan Tillman; 2009c; Rivaie, 2015a; Endriani et al., 2018; Yusnaini et al., 2021). Kelarutan FA dalam asam kuat atau asam mineral mengindikasikan kadar P total, sedangkan kelarutan dalam asam lemah menggambarkan reaktifitas atau kelarutannya. Reaktifitas atau kelarutan FA adalah parameter yang menunjukkan kemampuannya dalam melepaskan P yang dapat dimanfaatkan tanaman. FA dapat dikelompokkan ke dalam empat kategori kualitas (A, B, C, dan D) berdasarkan kadar total P_2O_5 dan P_2O_5 larut dalam asam sitrat (SNI 02-3776-2005, Tabel 2). Deposit FA yang memiliki kualitas tinggi ditandai dengan kandungan total P_2O_5 lebih dari 20% dan reaktifitas yang tinggi, dengan kadar P_2O_5 yang larut dalam asam sitrat 2% lebih dari 6% (Kasno et al., 2009).

Tabel 3.1 Syarat Mutu Pupuk Fosfat Alam untuk Pertanian (SNI 02-3776-2005)

No.	Uraian	Satuan	Persyaratan			
			Mutu A	Mutu B	Mutu C	Mutu D
1.	Kadar fosfor sebagai P_2O_5					
	- Total	% b/b	min. 28	min. 24	min. 14	min. 10

No.	Uraian	Satuan	Persyaratan			
			Mutu A	Mutu B	Mutu C	Mutu D
	- Larut asam sitrat 2%	% b/b	min. 7	min. 6	min. 3,5	min. 2,5
2.	Kadar air	% b/b	maks. 5	maks. 5	maks. 5	maks. 5
3.	Kehalusan					
	- Lolos 80 mesh Tyler	% b/b	min. 50	min. 50	min. 50	min. 50
	- Lolos 25 mesh Tyler	% b/b	min. 80	min. 80	min. 80	min. 80
4.	Cemaran logam					
	- Cadmium (Cd)	ppm	maks. 100	maks. 100	maks. 100	maks. 100
	- Timbal (Pb)	ppm	maks. 500	maks. 500	maks. 500	maks. 500
	- Raksa (Hg)	ppm	maks. 10	maks. 10	maks. 10	maks. 10
5.	Cemaran Arsen (As)	ppm	maks. 100	maks. 100	maks. 100	maks. 100

Sumber: Kasno et al. (2009)

B. Teknik Peningkatan Efektivitas Fosfat Alam

Sebelum diaplikasikan ke lahan, agar FA dapat mendukung pertumbuhan dan hasil tanaman secara optimal, kelarutannya perlu ditingkatkan. Beberapa teknik yang dapat digunakan untuk meningkatkan efektivitas agronomi pupuk FA adalah teknik biologi, kimia, fisik, termo-kimia, ataupun mekano-kimia seperti sebagai berikut.

1. Peningkatan dengan Teknik Biologi

Karena harga pupuk P anorganik (TSP, SP-36, dll.) yang tidak murah, maka saat ini makin meningkat minat untuk menggunakan FA. Meskipun banyak metode yang tersedia untuk melarutkan P

dari pupuk FA, penerapan praktis dari metode-metode yang ada masih terbatas karena kurangnya sumberdaya yang dibutuhkan dan pemahaman yang kurang tentang teknologi atau metode-metode tersebut (Rivaie et al., 2008a; Niswati et al., 2021; Yusraini et al., 2021; Amarasinghe et al., 2022).

Beberapa teknik biologi untuk meningkatkan efektivitas agronomi FA sebagai pupuk P yang dapat dilakukan adalah: (i) pengomposan limbah atau residu pertanian dengan pupuk FA, seperti halnya pada pembuatan fosfo-kompos; (ii) inokulasi benih atau bibit dengan mikroba pelarut P (jamur, bakteri dan aktinomisetes); dan (iii) penggunaan genotipe tanaman yang memiliki sistem perakaran yang luas/besar. Tanaman ini dapat meningkatkan jangkauan eksplorasi tanah yang luas dan mengeluarkan proton (H^+) dan asam-asam organik yang dapat meningkatkan kelarutan P pada FA melalui penurunan pH dan/atau khelasi, dan meningkatkan kadar enzim fosfatase yang dapat memecah P organik menjadi P anorganik (Rajan, 2004; Rivaie dan Tillman, 2009ab; Rivaie, 2016; Niswati et al., 2021; Yusraini et al., 2021; Pratiwi et al., 2023; 2024). Adapun penjelasan lebih lengkap tentang teknik-teknik peningkatan efektivitas agronomi FA secara biologi seperti berikut ini.

a. Fosfo-kompos

Mengolah fosfat alam (FA) dengan menambahkan bahan organik (residu pertanian atau limbah) dan inokulan mikroba lalu mengomposkan campuran tersebut akan meningkatkan kelarutan dan ketersediaan P bagi tanaman. Produk pengomposan pupuk FA dengan teknologi demikian disebut fosfo-kompos (Singh dan Amberger, 1991; Rajan, 2004; Rivaie et al., 2013; Rivaie,

2014e; Ditta dan Khalid, 2016; Niswati et al., 2021; Yusnaini et al., 2021; Sabah et al., 2022).

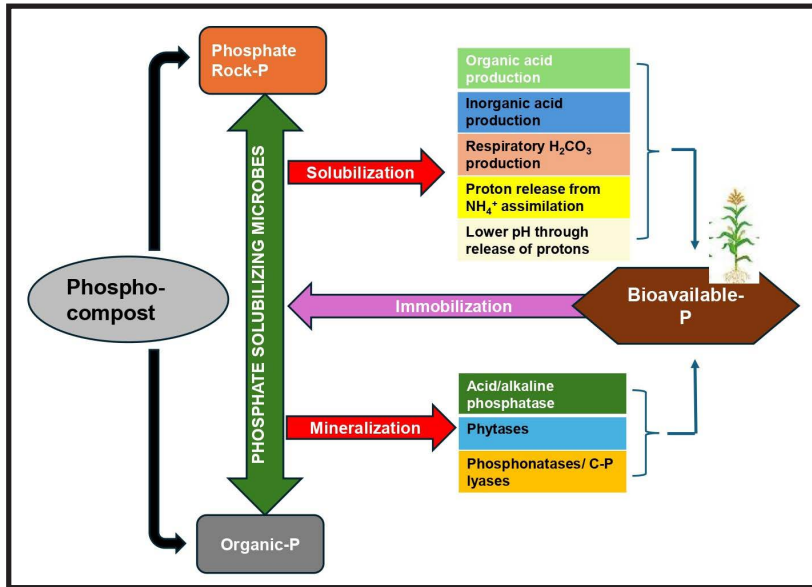
Metode pengomposan pada pembuatan fosfo-kompos sangat bermanfaat dalam kondisi di mana: (i) pupuk FA dengan reaktivitas sedang sampai tinggi tersedia; (ii) pupuk organik secara rutin digunakan untuk meningkatkan kadar bahan organik tanah dan memenuhi kebutuhan nutrisi, yang umum dilakukan di banyak wilayah tropis; (iii) penerapan praktik pertanian organik, yang melarang penggunaan pupuk anorganik buatan pabrik (sintetis); dan (iv) pada lokasi pembuangan limbah dan residu pertanian yang memerlukan metode pengelolaan yang ramah lingkungan (Rajan, 2004; Ditta dan Khalid, 2016; Niswati et al., 2021; Yusnaini et al., 2021). Dalam kaitan ini, pemanfaatan berbagai limbah dalam pembuatan fosfo-kompos, contohnya agroindustri tapioka (onggok), pabrik gula (blotong), limbah sekam padi (biochar) ataupun serbuk kelapa akan sangat berguna sebagai sumber hara N, P, dan K, membantu perbaikan struktur tanah, dan untuk pengelolaan limbah atau penanganan polutan.

Pada pembuatan fosfo-kompos, selama proses dekomposisi bahan organik berlangsung, terjadi aktivitas mikroba terutama jenis bakteri dan jamur yang signifikan (Ditta dan Khalid, 2016; Rivaie et al., 2013; Niswati et al., 2021; Yusnaini et al., 2021; Sabah et al., 2022), yang menghasilkan sejumlah besar asam-asam organik dan zat humik. Zat humik dapat dibagi menjadi tiga fraksi utama berdasarkan kelarutannya dalam asam atau alkali, yaitu asam fulvat (larut dalam asam dan alkali), asam humat (larut dalam alkali tetapi mengendap dalam asam), dan humin (tidak larut dalam asam dan alkali). Di antara ketiganya, asam fulvat memiliki berat molekul terkecil, diikuti oleh asam humat dan humin. Asam fulvat adalah bentuk paling reaktif dari zat humik, mampu menyerap sejumlah besar Ca^{2+} dan

melepaskan ion H^+ , yang membantu melarutkan FA. Asam humat dapat membentuk kompleks dengan P dan Ca, yang memfasilitasi pelarutan lebih lanjut dari FA. Aplikasi zat humik ke tanah juga meningkatkan ketersediaan P bagi tanaman. Untuk mempercepat dekomposisi bahan organik dalam pembuatan fosfo-kompos, dapat digunakan inokulan mikroba (*Aspergillus* spp., *Penicillium* spp., *Trichoderma viride*, *Cellulomonas* spp., dan *Cytophaga* spp.) dan memasukkan sumber energi seperti molase sebelum pengomposan (Singh dan Amberger, 1991; Rajan, 2004; Ditta and Khalid, 2016; Niswati et al., 2021; Yusnaini et al., 2021; Sabah et al., 2022). Penambahan mikroba tersebut, misalnya *Trichoderma viride* juga dapat membantu meningkatkan ketahanan tanaman terhadap penyakit tular tanah (*soil born pathogen*).

Penggunaan fosfo-kompos meningkatkan pergerakan P terlarut dalam tanah, memperluas volume tanah yang dapat menyuplai P untuk diserap oleh akar tanaman. Dengan kata lain, peningkatan pelepasan P dari FA dipengaruhi oleh proses pengasaman FA yang dilakukan oleh asam organik dan kemampuan asam organik tersebut untuk mengkhelasi Ca, Fe, dan Al (Singh dan Amberger, 1991; Rajan, 2004; Rivaie et al., 2013; Niswati et al., 2021). Mekanisme yang terjadi dalam pelarutan FA adalah melalui pelepasan berbagai asam lemah (organik dan anorganik) bersama senyawa pengkhelat di rizosfer, yang pada gilirannya akan menyebabkan penurunan pH tanah

(Rivaie et al, 2008a; Niswati et al., 2021; Sabah et al., 2022), seperti dapat dilihat pada Gambar 2 berikut.



Gambar 3.1 Mekanisme Pelarutan Fosfat Alam Melalui Pengomposan (Sabah et al., 2022)

Percampuran 4 (empat) bagian bahan organik dengan 1 (satu) bagian FA (perbandingan berat kering) merupakan kombinasi yang terbaik dalam pembuatan fosfo-kompos. Hal dibuktikan dari percobaan pelarutan pupuk FA yang dicampur dengan jerami gandum pada rasio 1:4 dan diinokulasi dengan tanah dan ekstrak kompos, lalu rasio karbon terhadap nitrogen (C:N) disesuaikan dengan menambahkan urine. Fosfo-kompos yang dibuat dari campuran limbah pertanian, kotoran sapi, dan

tanah sebagai sumber inokulum bakteri terbukti seefektif pupuk superfosfat (SSP) (Singh dan Amberger, 1991).

b. Inokulasi Endomikoriza

Istilah mikoriza merujuk pada hubungan saling menguntungkan antara akar dan jamur di mana jamur tersebut mengambil peran sebagai rambut akar. Jenis mikoriza yang meningkatkan penyerapan P pada tanaman dikenal sebagai mikoriza vesikular-arbuskular (VAM), dan jenis spora yang umum digunakan adalah *Glomus fasciculatum*, *G. mosseae*, *G. etunicatum*, *G. tenue*, dan *Giaspora margarita*. Jamur mikoriza vesikular-arbuskular memiliki struktur unik yang disebut vesikel dan arbuskula. Arbuskula yang sangat bercabang ini memfasilitasi pemindahan nutrisi dari jamur ke sel-sel akar tanaman, sedangkan vesikel adalah formasi seperti kantung yang menyimpan P dalam bentuk fosfolipid (Rajan, 2004).

Aplikasi jamur mikoriza pada perakaran tanaman akan berdampak terhadap penyerapan P dibandingkan dengan tanaman non-mikoriza yang bergantung pada tingkat aplikasi P, dengan penyerapan yang umumnya meningkat pada tingkat aplikasi P yang rendah hingga sedang. Infeksi mikoriza mengubah kurva respons P, sehingga kurva tersebut meningkat lebih tajam dan mencapai puncaknya pada tingkat P yang jauh lebih rendah, baik bentuk P larut dalam air maupun hanya sedikit larut, seperti pada pupuk FA. Jamur VAM dapat menginfeksi sebagian besar species tanaman pangan (Rajan, 2004; Wahid dan Rivaie, 2014). Suatu percobaan menunjukkan bahwa penambahan jamur mikoriza vesikular-arbuskular (VAM) yang sesuai dapat meningkatkan hasil padi hingga 300% dibandingkan dengan perlakuan tanpa inokulasi (Rajan, 2004). Selanjutnya, suatu percobaan tumpangsari jagung dan kacang tanah pada tanah Ultisol menunjukkan bahwa pertumbuhan dan hasil jagung

meningkat nyata akibat inokulasi bibit dengan jamur VAM (Wahid dan Rivaie, 2014).

c. Penggunaan Mikroba Pelarut P

Mikroba heterotrof mampu memproduksi asam organik yang dapat melarutkan mineral P dan/atau mengkhelat pasangan kation dari ion P, sehingga membebaskan P ke dalam larutan. Mikroba tersebut juga dapat meningkatkan pertumbuhan tanaman dengan memfiksasi N_2 , menghasilkan hormon-hormon, membantu penyerapan nutrisi, dan meningkatkan ketahanan terhadap stres dan penyakit (Barea et al., 2002; Rivaie et al., 2013; Rivaie, 2014e; Pratiwi et al., 2023; 2024). Bakteri jenis ini meliputi *Bacillus megaterium*, *B. circulans*, *B. subtilis*, *B. polymyxa*, dan *Pseudomonas straita*. Jenis jamur meliputi *Aspergillus awamori*, *Penicillium bilaii*, *P. digitatum*, dan *Trichoderma* sp. Hasil analisis menunjukkan bahwa mikroba tersebut adalah pelarut P yang dapat meningkatkan efektivitas agronomi pupuk FA (Barea et al., 2002; Rivaie, 2014e; Niswati et al., 2021; Yusnaini et al., 2021). Pada percobaan lapangan dengan beberapa tanaman juga menunjukkan bahwa mikroba pelarut P dapat meningkatkan hasil tanaman hingga 70%. Di beberapa negara mikroba pelarut P tersedia secara komersial dan budidayanya dalam skala besar sudah dilakukan (Kucey et al., 1989; Rajan, 2004; Pratiwi et al., 2023; 2024).

d. Penggunaan Genotipe Tanaman

Pemilihan spesies dan varietas tanaman yang mampu mentolerir kemasaman tanah membantu kita meminimalkan kebutuhan aplikasi kapur yang mahal dan kendala biaya transportasinya. Efisiensi penyerapan P dapat ditingkatkan dengan memilih spesies tanaman atau genotipe yang melakukan berbagai mekanisme yang dapat meningkatkan penyerapan P, seperti: (i)

pertumbuhan akar yang meningkat signifikan, memungkinkan eksplorasi tanah yang lebih luas; (ii) pelepasan proton dan asam organik yang meningkatkan kelarutan P melalui penurunan pH atau pengkkelatan; dan (iii) memproduksi enzim fosfatase yang lebih banyak, yang mengubah P organik menjadi P anorganik (Miyasaka dan Habte, 2001; Rivaie dan Tillman, 2009ab; Rivaie, 2014e; 2016; Diptaningsari dan Rivaie, 2021; Niswati et al., 2021).

Untuk meningkatkan efektivitas FA, strategi yang juga dapat diterapkan adalah menanam genotipe tanaman yang dapat meningkatkan kemasaman di rizosfir, seperti tanaman legum pengikat N, yang dapat meningkatkan pelarutan FA sehingga P lebih mudah diakses oleh tanaman sekitarnya. Untuk itu, berbagai tanaman leguminosa dapat dimasukkan ke dalam rotasi tanaman atau suatu pola tanam, guna meningkatkan pelarutan FA dan bentuk-bentuk P labil dalam tanah (Rajan, 2004; Rivaie et al., 2008c; Rivaie, 2013; 2014e; 2015a; 2016; Diptaningsari dan Rivaie, 2021).

2. Peningkatan dengan Teknik Kimia

Produk FA yang diasamkan sebagian (*Partially acidulated phosphate rocks* atau PAPRs) adalah pupuk P alternatif yang dibuat dengan cara memperlakukan FA dengan asam sulfat (H_2SO_4) atau asam fosfat (H_3PO_4) dalam jumlah yang kurang dari yang dibutuhkan untuk menghasilkan single superfosfat (SSP) atau triple superfosfat (TSP). Hasilnya memberikan produk pupuk P yang hemat biaya dengan peningkatan efektivitas agronomi untuk sumber FA lokal yang mungkin tidak cocok bila diaplikasikan secara langsung. Metode ini juga menghasilkan produk yang lebih ekonomis dibandingkan dengan pupuk P anorganik karena membutuhkan lebih sedikit asam dan energi

untuk setiap unit P yang dihasilkan. Produk dari pupuk FA yang diasamkan sebagian biasanya memiliki konsentrasi yang lebih tinggi dibandingkan pupuk P anorganik. Asidulasi parsial mungkin menjadi metode yang lebih efektif untuk meningkatkan efektivitas pupuk FA (Rajan, 2004; Rivaie et al., 2008a; Niswati et al., 2021).

Tingkat pengasaman FA biasanya dinyatakan dalam persentase. Jika satu per lima dari asam sulfat (H_2SO_4) yang diperlukan untuk menghasilkan superfosfat dari FA, maka produk yang dihasilkan disebut FA yang diasamkan sebagian–20% H_2SO_4 . Penelitian menunjukkan bahwa FA yang diasamkan menggunakan 40–50% H_2SO_4 atau 20–30% H_3PO_4 sama efektifnya dengan pupuk superfosfat (SSP, TSP, dll.). Efektivitas agronomis yang tinggi dari produk FA tersebut disebabkan oleh beberapa faktor: (i) Efek priming akar (peningkatan pertumbuhan) yang disebabkan tersedianya monokalsium fosfat ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) sebagai sumber P tanaman; dan (ii) Pelarutan $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ yang menghasilkan H_3PO_4 yang bereaksi dengan FA sisa yang belum bereaksi, sehingga menghasilkan asidulasi sekunder. Produk ini telah diproduksi dan dipasarkan di New Zealand dengan mencampurkan FA yang reaktif dengan SSP (rasio 30:70 berdasarkan berat) (Rajan, 2004; Rivaie et al., 2008a).

3. Peningkatan dengan Teknik Fisik

a. Pemadatan dengan Pupuk P Anorganik

Produk pupuk P alternatif ini merupakan pupuk dengan komposisi kimia yang sama dengan pupuk FA yang diasamkan sebagian (*Partially acidulated phosphate rocks*, PAPRs). Produk ini diproduksi dengan cara memadatkan FA kering dengan pupuk P anorganik (SSP atau TSP) di bawah tekanan.

Kandungan pupuk P anorganik akan bervariasi tergantung pada rasio FA terhadap pupuk P anorganik yang digunakan. Metode pemadatan ini sesuai untuk FA yang tidak cocok untuk pengasaman parsial langsung dengan H_2SO_4 , karena tingginya kadar Al dan Fe-sesquioxida dalam tanah yang akan mengikat P. Penelitian menunjukkan bahwa efektivitas FA, termasuk yang memiliki reaktifitas rendah, akan meningkat ketika dipadatkan dengan pupuk P anorganik. Teknik pemadatan demikian akan memberikan hasil optimal pada rasio sekitar 50:50. Cara ini dapat membuat penggunaan FA lokal menjadi menarik secara agronomis dan ekonomis di negara-negara berkembang (Rajan, 2004; Rivaie et al., 2008a).

b. Pencampuran Kering FA dengan Pupuk P Anorganik

Teknik ini merupakan aplikasi langsung FA yang dicampur dengan pupuk P anorganik agar dapat meningkatkan efektivitasnya. Hal ini dibuktikan dari percobaan yang menggunakan FA yang dicampur dengan SP-36 atau TSP pada rasio P 1:1 yang diaplikasikan pada pertanaman jagung dan kacang tunggak. Berdasarkan serapan P oleh tanaman, pupuk FA meningkatkan efektivitasnya sebesar 165% untuk jagung dan 72% untuk kacang tunggak. Peningkatan efektivitas FA diduga berkaitan dengan efek pertumbuhan akar yang pesat akibat lebih tersedianya P terlarut, yang menyebabkan pemanfaatan FA dan unsur hara lainnya oleh akar menjadi lebih baik. Mengingat kebutuhan pemrosesan yang minimal dan peningkatan efektivitas FA yang dihasilkan, maka inovasi teknologi ini memiliki implikasi ekonomi yang signifikan (Rajan, 2004; Rivaie, 2014e). Perlu dikaji lebih lanjut efektivitas cara ini pada lahan kering masam

di Indonesia dengan pH tanah yang sering kali sudah sangat rendah.

c. Pencampuran Belerang (S) dan Pupuk FA

Hasil percobaan telah membuktikan bahwa efektivitas agronomi pupuk FA dapat ditingkatkan dengan mencampurnya dengan belerang (S). Produk campuran dapat juga diinokulasi dengan bakteri pengoksidasi belerang dari genus *Thiobacillus*, dan produknya disebut Biosuper. Di dalam tanah bakteri tersebut akan mengoksidasi S menjadi H_2SO_4 . Asam ini kemudian bereaksi dengan partikel FA di dekatnya, menghasilkan pembentukan monokalsium dan dikalsium fosfat. Pelarutan FA dalam tanah difasilitasi oleh pengasaman lokal, selain dari kemasaman alami yang ada di tanah (Rajan, 2004; Rivaie et al., 2008a; Rivaie, 2014e). Spesies bakteri pengoksidasi S yang penting meliputi *Thiobacillus thiooxidans* dan *Thiobacillus thioparus*. Populasi *Thiobacillus* spp. di dalam tanah sebenarnya sudah banyak, tetapi inokulasi tetap dianjurkan untuk mempercepat pertumbuhan bakteri dan meningkatkan pelarutan FA (Rajan, 2004).

Percobaan menunjukkan bahwa kombinasi FA/S dapat seefektif pupuk superfosfat (SSP) ketika rasio FA:S berkisar antara 1:1 hingga 5:1. Ketika menggunakan FA reaktif yang dihaluskan, rasio dapat ditingkatkan menjadi 7:1 tanpa mengurangi efektivitas agronomi. Untuk rumput pakan ternak, campuran FA/S yang dibuat dengan rasio FA:S 14:1 dapat seefektif SSP. Untuk tanaman yang jangka pendek butuh P tinggi, diperlukan pupuk FA reaktif dengan rasio FA:S yang lebih sempit. Selain itu, efektivitas agronomi kombinasi FA/S

akan meningkat di lingkungan tanah yang mendukung pelarutan pupuk FA (Rajan, 2004; Rivaie, 2014e).

4. Peningkatan dengan Teknik Termo-Kimia

Proses pengolahan pupuk FA melalui metode penggilingan termal sudah cukup populer di AS, Aljazair, dan Maroko untuk meningkatkan mutu FA. Produk yang dikenal dengan nama pupuk termofosfat ini dibuat dengan cara bahan baku FA dipanaskan (dipanggang) pada suhu 680°–980°C, lalu diperlakukan dengan air atau larutan salin (air laut), untuk memisahkan dicalcium fosfat (Zaynitdin, 2022). Produk FA yang sudah mengalami proses kalsinasi ini akan memiliki kadar P_2O_5 yang tinggi, mengandung setidaknya 31% P_2O_5 (Zaynitdin, 2022). Tingginya kadar P_2O_5 pada produk fosfat alam ini sangat sesuai bila diaplikasikan pada lahan kering masam untuk memenuhi kebutuhan P bagi tanaman pangan. Selain itu pupuk termofosfat dapat menetralkan kemasaman tanah pada lahan kering masam karena bersifat sedikit basa (Rivaie et al., 2008a; Rivaie dan Loganathan, 2010b; Zaynitdin, 2022). Produk ini banyak digunakan di negara-negara maju seperti Australia, Jerman, Rusia, Inggris, dan Belgia. Lebih dari 10% FA reaktif yang ada di pasar negara-negara tersebut dihasilkan melalui cara proses kalsinasi tersebut (Dwivedi dan Gupta, 2006).

5. Peningkatan dengan Teknik Mekano-Kimia

Meningkatkan efisiensi pupuk P menjadi tantangan di lahan kering masam dengan kadar P total yang rendah dan daya fiksasi P yang tinggi (Rivaie et al., 2008a; Rivaie dan Loganathan, 2010b; Rivaie, 2014e). Para peneliti semakin fokus pada FA yang diaktivasi secara mekano-kimia untuk meningkatkan kelarutan P (Petkova et al., 2015). Nano partikel dari fosfat alam

dengan ukuran 1 - 100 nm dinilai sesuai sebagai sumber hara P tanaman. Produk ini memiliki kadar P larut dalam asam sitrat yang lebih tinggi 2–3 kali lipat dibandingkan pupuk P anorganik. Produk nano-material ini juga dapat menyediakan P dalam jangka waktu lebih lama dan membantu mencegah kehilangan P akibat pencucian (*downward movement*) (Rivaie et al., 2008a; Fang et al., 2022). Percobaan pada tanah Luvisol (Alfisols, pH 6.47) menunjukkan bahwa aplikasi kombinasi 10% FA yang dikalsinasi + 90% TSP dan 20% FA yang dikalsinasi memberikan efektivitas 100% sama dengan TSP dalam meningkatkan hasil jagung dan penyerapan P oleh tanaman serta efisiensi P (Fang et al., 2022). Percobaan lainnya pada tanah Inceptisol (pH 5.6) yang membandingkan nano guano, nano FA, dan SP-36 menunjukkan bahwa produk nano FA merupakan pupuk yang paling efektif untuk tanaman jagung di Inceptisol (Herlina et al., 2022).

Berbagai hasil penelitian inovasi teknologi aplikasi langsung fosfat alam (FA) telah menunjukkan adanya peningkatan produksi tanaman dan keuntungan ekonomi yang menjanjikan (Rivaie dan Loganathan, 2010b; Husnain et al., 2014; Rivaie, 2014b; Rivaie et al., 2015a; Endriani et al., 2021; Niswati et al., 2021), yaitu padi gogo memberikan peningkatan produktivitas berkisar 26–85% dibandingkan teknologi petani, yaitu dari gabah kering panen 2,0–3,4 ton/ha (Septiyana et al., 2021; Dahamarudin dan Rivaie, 2013) menjadi 3,7–4,3 ton/ha (Septiyana et al., 2021); jagung memberikan peningkatan produktivitas berkisar 107–150%, yaitu dari jagung pipilan kering 3,2–5,3 ton/ha (Kasno et al., 2024) menjadi 8,0–11,0 ton/ha (Kasno et al., 2023); dan kedelai memberikan peningkatan produktivitas berkisar 246–275%, yaitu dari kedele biji kering

0,64-0,78 ton/ha (Yafizam, 2009; Endriani et al., 2021) menjadi 2,4–2,7 ton/ha (Endriani et al., 2018).

Setelah menelaah berbagai percobaan teknologi aplikasi langsung FA sebagai sumber hara P, hasilnya dapat dikatakan bahwa metode pembuatan fosfo-kompos merupakan teknologi yang paling unggul dan paling mudah untuk dilakukan guna meningkatkan produktivitas tanaman pada lahan kering masam di Indonesia. Mengingat luasnya areal pertanian tanaman pangan pada lahan kering masam yang memerlukan pemupukan P bertakaran tinggi, maka bila hanya mengandalkan pupuk P anorganik, pada kondisi perekonomian nasional dan global saat ini tentu cukup sulit dan sangat mahal. Oleh karena itu, maka pengembangan teknologi fosfo-kompos di lahan kering masam dalam skala nasional patut dipertimbangkan.

IV. PROSPEK, ARAH, SASARAN, DAN STRATEGI PENGEMBANGAN INOVASI TEKNOLOGI FOSFO-KOMPOS

Prospek pemanfaatan teknologi fosfo-kompos sangat baik untuk meningkatkan produksi tanaman pangan pada lahan kering masam di Indonesia. Hal ini bertitik tolak dari berbagai hasil penelitian yang menunjukkan kemampuan produk fosfo-kompos dalam mengatasi kendala-kendala kesuburan tanah yang ada. Teknologi ini diharapkan dapat menjadi teknologi tepat guna atau solusi yang berkelanjutan untuk hal tersebut. Pengembangan teknologi fosfo-kompos pada lahan kering masam untuk peningkatan produktivitas lahan dan tanaman guna mendukung ketahanan pangan nasional memiliki potensi, tantangan, dan peluang yang dapat disimak pada uraian berikut, dan pengembangan tersebut hendaknya dilakukan dengan arah, sasaran, dan strategi seperti di bawah ini.

A. Potensi Pengembangan Teknologi

Lahan kering masam yang sudah diusahakan untuk pertanian tanaman pangan di Indonesia seluas 36.820.000 ha (Sukarman et al., 2024) umumnya membutuhkan input pupuk P yang tinggi (200–300 kg SP-36/ha) (Husnain et al., 2014; Septiyana et al., 2021). Upaya pengembangan teknologi fosfo-kompos pada lahan kering masam tidak hanya akan memberikan potensi keuntungan ekonomi, tetapi juga berdampak positif terhadap lingkungan. Implementasi inovasi teknologi fosfo-kompos diyakini mampu memberikan peningkatan hasil padi padi gogo berkisar 62–90% dibandingkan paket teknologi petani, yaitu dari produktivitas gabah kering panen 2,0–3,4 ton/ha (Septiyana

et al., 2021; Dahamarudin dan Rivaie, 2013) menjadi 3,8–5,5 ton/ha. Produktivitas jagung akan meningkat 126–180%, yaitu dari 3,2–5,3 ton/ha (Kasno et al., 2024) menjadi 9,0–12,0 ton/ha pipilan kering. Sedangkan produktivitas kedelai akan meningkat dengan kisaran 284–290%, yaitu dari 0.64–0,78 ton/ha (Yafizam, 2009; Endriani et al., 2021) menjadi 2,5–3,0 ton/ha biji kering. Peningkatan produktivitas yang cukup besar tersebut pada gilirannya juga akan meningkatkan pendapatan petani.

Dikaitkan dengan peningkatan produktivitas tersebut di atas, maka keberhasilan pengembangan inovasi teknologi fosfo-kompos akan memberikan kontribusi yang besar terhadap ketahanan pangan nasional. Bila pengembangan inovasi teknologi ini diterapkan di 10 provinsi, masing-masing seluas 100.000 ha (total luas 1.000.000 ha), maka potensi peningkatan pangan untuk komoditas utama padi, jagung, dan kedelai adalah sebagai berikut: (i) Padi gogo yang ditanam awal musim hujan (MH1) dengan peningkatan 90% (setara 2,1 ton/ha), akan memberi kontribusi 2.100.000 ton gabah kering panen; (ii) Jagung ditanam di musim kemarau (MK1) dengan peningkatan 180% (setara 6,7 ton/ha), akan memberi kontribusi 6.700.000 ton pipilan kering; dan (iii) Kedelai ditanam awal musim hujan tahun berikutnya (MH1) dengan peningkatan 290% (setara 2,2 ton/ha), akan memberi kontribusi 2.200.000 ton biji kering.

Disamping meningkatkan cadangan pangan nasional, keberhasilan pengembangan inovasi teknologi fosfo-kompos juga akan meningkatkan efisiensi biaya input pupuk P dengan adanya substitusi pupuk P anorganik (SP-36, SSP, atau DAP) oleh petani yang mulai menggunakan fosfo-kompos. Saat ini di pasar kecamatan harga pupuk SP-36 (total $P_2O_5 = 36\%$) non-subsidi adalah Rp 13.000/kg, sedangkan harga pupuk FA (*rock phosphate*) ex. Egypt, total $P_2O_5 = 26\%$ adalah Rp 2.680/kg (PT

Boston Indo Global, 2025; PT Pusri Agro Lestari, 2025). Bila petani mensubstitusi setengah dari jumlah kebutuhan pupuk P anorganiknya dengan fosfo-kompos, dengan asumsi harga fosfo-kompos Rp 4.500/kg, maka berarti akan mengurangi biaya input pupuk P sekitar 50–60%.

Selanjutnya, penggunaan fosfo-kompos yang berbasis fosfat alam akan memberi residu dalam tanah yang lebih tinggi daripada residu pupuk P anorganik, sehingga penggunaannya dapat dipandang sebagai investasi modal (Smalberger et al., 2006; Rivaie, 2015a; Rivaie et al., 2008a; Rohayati et al., 2009; Ditta et al., 2016; Amarasinghe et al., 2022). Teknologi fosfo-kompos juga lebih ramah lingkungan. Berbeda dengan pupuk P anorganik (SP-36, SSP, DAP) yang dibuat melalui proses menggunakan bahan kimia, yaitu asam sulfat (H_2SO_4) dan asam fosfat (H_3PO_4) dan bahan bakar pembangkit listrik. Aktivitas pabriknya akan meningkatkan emisi gas penyebab pemanasan global (Adiansyah et al., 2019), disamping potensi dampak lingkungan dari Eutrofikasi oleh fosfor (P) dalam limbah yang tercuci ke perairan permukaan, walaupun pada tanah-tanah dengan kapasitas fiksasi P yang tinggi (Rivaie et al., 2008a). Beberapa keunggulan penggunaan fosfo-kompos dibandingkan dengan penggunaan pupuk P anorganik dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Keunggulan Penggunaan Fosfo-kompos sebagai Pupuk P dibandingkan dengan Pupuk P Anorganik pada Lahan Kering Masam

Fosfo-Kompos	Pupuk P Anorganik	Sumber
Hara P lepas lambat, diserap lebih efektif dan tersedia lebih lama bagi tanaman	Hara P cenderung mem- bentuk Fe-P dan Al-P yang kurang tersedia bagi tanaman	Rivaie et al. (2008a); Sabah et al. (2022)
Meningkatkan P tersedia, memperbaiki struktur tanah, dan aktivitas mikroba tanah, yang penting bagi kesehatan tanah dan siklus hara	Meningkatkan P tersedia bagi tanaman. Tidak mengandung bahan orga- nik	Ditta dan Khalid (2016); Sabah et al. (2022)
Risiko P tercuci/terlimpas lebih kecil karena P lepas lambat, sehingga lebih ramah lingkungan	Dapat menyebabkan polusi P pada badan air sekitar, melalui pencucian atau limpasan (Eutrofikasi)	Adiansyah et al. (2019); Rivaie et al. (2008a)
Ca dari fosfo-kompos turut meningkatkan pH tanah, sehingga P dan hara lainnya lebih tersedia bagi tanaman	P menjadi kurang tersedia karena kemasaman tanah yang tinggi, dimana banyak Fe dan Al terlarut	Chien dan Friesen (2000); Rivaie (2015)

Fosfo-Kompos	Pupuk P Anorganik	Sumber
Produk dari bahan organik lokal, fosfat alam, dan bioinokulan dengan biaya produksi dan aplikasi yang lebih rendah. Secara ekonomi lebih menguntungkan bagi petani kecil	Harga pupuk P anorganik makin mahal karena pembuatannya membutuhkan asam sulfat dan asam fosfat serta energi listrik	Rochayati et al. (2009); Husnain et al. (2014); Ditta dan Khalid (2016); Sabah et al. (2022)

B. Tantangan dan Peluang Pengembangan Teknologi

Pemanfaatan inovasi teknologi fosfo-kompos pada lahan kering masam skala nasional memiliki prospek yang baik, namun terdapat beberapa tantangan yang akan dihadapi segera dalam jangka pendek, yaitu: (i) Deposit FA sebagai bahan baku fosfo-kompos di Indonesia jumlahnya terbatas dan kandungan total P_2O_5 rendah. Untuk keperluan industri pupuk P dalam negeri bahan bakunya selama ini masih diimport (Rohayati et al., 2009). Diperlukan dukungan pemerintah dalam penyediaan bahan baku FA di pasar dan pengawasan kualitasnya sesuai dengan SNI 02-3776-2005; (ii) Diperlukan dukungan inovasi kelembagaan dari pemerintah, khususnya dalam penumbuhan usaha-usaha bisnis kecil (UMKM) yang mengolah pupuk fosfo-kompos di tingkat kecamatan atau desa (Rivaie dan Pasandaran, 2014). Sedangkan untuk jenis-jenis produk teknologi aplikasi langsung FA lainnya, seperti produk FA yang diasamkan sebagian (PAPRs), produk pemadatan FA dengan P anorganik, produk P Biosuper, produk kalsinasi FA, dan produk nano-FA berdasarkan pertimbangan teknis dan ekonomis tampaknya lebih sesuai untuk dikelola oleh BUMN/BUMD atau swasta; (iii) Pengetahuan petani tentang fosfo-kompos masih kurang, sehingga perlu ditingkatkan melalui kegiatan laboratorium lapang (Rivaie et al., 2008b) sebagai sarana

petani mempelajari pembuatan, penggunaan, dosis dan manfaat fosfo-kompos jangka panjang; dan (iv) Modal dan kelembagaan petani yang lemah. Poktan dan Gapoktan memerlukan fasilitasi subsidi dari pemerintah karena terbatasnya sarana dan prasarana distribusi dan penyimpanan.

Dengan tersedianya dukungan inovasi teknologi dan kelembagaan yang dibutuhkan tersebut, dapat diharapkan pengembangan teknologi fosfo-kompos akan memiliki daya saing yang lebih tinggi daripada pupuk P anorganik. Adopsi teknologi ini terus meningkat bila petani berkeyakinan bahwa aplikasinya meningkatkan produktivitas dan efisiensi biaya usahatani (Rivaie dan Pasandaran, 2014; Ansyor et al., 2019).

Peluang pengembangan teknologi fosfo-kompos pada lahan kering masam cukup besar, karena didukung oleh beberapa keunggulan komparatif dan kompetitif dibandingkan penggunaan pupuk P anorganik. Keunggulan tersebut antara lain, yaitu: (i) Fosfo-kompos mempunyai reaktivitas yang mendekati atau hampir sama dengan pupuk P anorganik; (ii) Memiliki efek residu yang bertahan dalam beberapa musim tanam, sehingga penggunaannya dapat dipandang sebagai investasi modal; (iii) Kandungan Ca yang tinggi pada fosfo-kompos memberi efek pengapuran dan memenuhi kebutuhan Ca bagi tanaman (Rohayati et al., 2009); dan (iv) Harga pupuk P anorganik makin mahal, karena jumlah cadangan bahan baku pupuk P makin terbatas, makin tingginya harga energi listrik, dan asam fosforik, serta masalah limbah pembuangan pabrik.

Saat ini perlu dimulai pengembangan teknologi fosfo-kompos, sebagai suatu metode yang sederhana, murah, berteknologi rendah, dan dapat diterapkan secara luas untuk meningkatkan ketersediaan P tanah, serta ramah lingkungan. Teknologi pembuatan fosfo-kompos sejalan dengan Kebijakan

Perpupukan Nasional yang sejak tahun 2021 memberi bantuan Unit Pengolah Pupuk Organik (UPPO) kepada kelompok-kelompok tani yang tersebar di 31 provinsi. Setiap UPPO terdiri dari bangunan rumah kompos, kandang komunal, bak fermentasi, ternak (sapi/kerbau) berjumlah 8 ekor, Alat Pengolah Pupuk Organik (APPO), dan Kendaraan Roda 3 (Dirjen PSP, 2022). Program ini membuka peluang pemberdayaan kelompok tani untuk berusaha di sektor sub-sistem agrobisnis hulu (UMKM) sebagai penyedia saprodi (produk fosfo-kompos).

C. Arah dan Sasaran Pengembangan Teknologi

Dalam rangka pengembangan teknologi fosfo-kompos, diarahkan agar ditindaklanjuti dengan berbagai kegiatan penelitian adaptif. Kegiatan penelitian tersebut dilakukan untuk mendapatkan informasi paket teknologi rekomendasi pemupukan P bersumber fosfo-kompos untuk tanaman pangan di lahan kering masam yang spesifik lokasi. Berbagai hal perlu yang dipelajari, termasuk mengidentifikasi isolat mikroba unggul lokal atau mengkaji jenis dan perbandingan yang optimal antara bahan limbah/residu pertanian dan FA dalam pembuatan fosfo-kompos. Hal ini penting agar kelarutan P dari fosfo-kompos mendekati atau sama dengan kelarutan pupuk P anorganik dan secara ekonomi menguntungkan. Penelitian adaptif juga diarahkan pada kawasan food-estate di lahan kering masam yang dikelola oleh korporasi.

Keterlibatan langsung para petani milenial dalam meningkatkan produksi tanaman di lahan kering masam melalui pengembangan teknologi inovatif rekomendasi pemupukan P bersumber fosfo-kompos perlu lebih ditingkatkan, khususnya dalam merakit paket teknologi yang spesifik lokasi (Rivaie et al., 2008b), menggunakan perangkat aplikasi komputer berisi sistem pakar pemupukan berbasis FA (*phosphate rock decision*

support system (PRDSS)) yang ramah pengguna. Disamping keterlibatan dalam pengembangan alat sensor di lapangan untuk mendeteksi tingkat reaktifitas bahan baku FA (rendah, sedang, atau tinggi) sebagai acuan dalam menentukan kesesuaian teknologi dalam pengolahannya.

Adapun sasaran utama pengembangan inovasi teknologi fosfo-kompos adalah: (i) Area-area pertanian pangan pada lahan kering masam, termasuk kawasan food-estate di Pulau Sumatera, Kalimantan, dan Papua, yang ke depan juga akan dijadikan bagian lumbung pangan nasional, sesuai program Asta Cita pemerintah, dan (ii) Area pertanian pangan di lahan kering masam yang kelompok taninya mendapat bantuan Unit Pengolah Pupuk Organik (UPPO). Pada kawasan-kawasan tersebut diharapkan akan terjadi peningkatan produktivitas lahan dan tanaman melalui pengembangan teknologi ini, yang pada gilirannya akan mendukung dan meningkatkan ketahanan pangan skala regional dan nasional.

D. Strategi Pengembangan Teknologi

Dalam rangka mencapai sasaran tersebut di atas, beberapa strategi berikut perlu ditempuh, yaitu: (i) Menggelar kegiatan-kegiatan kaji-terap bersama para penyuluh Kementan dan petani, yang sejak awal kegiatan sudah dilibatkan secara aktif (Rivaie et al., 2008b), mulai dari penyiapan bahan baku fosfo-kompos, penentuan takaran atau dosis yang digunakan, sampai bagaimana cara aplikasinya. Kegiatan ini menjadi laboratorium lapang dan *show-window* baik bagi petani target maupun petani wilayah dampak diseminasi hasil penelitian adaptifnya, guna mendorong adopsi teknologi secara lebih luas dan cepat; (ii) Menyelenggarakan kegiatan sosialisasi teknologi fosfo-kompos kepada para pengambil kebijakan terkait potensi dan peluang pengembangan inovasi teknologi ini, agar pengambil kebijakan tertarik untuk mengembangkan di daerahnya. Kegiatan sosialisasi di kecamatan-kecamatan juga diperlukan bersama para penyuluh

Kementan yang berupa bimbingan teknis untuk para petugas lapang dan anggota Poktan/Gapoktan, guna membangkitkan minat adopsi; (iii) Mendorong BUMN/BUMD atau swasta untuk membentuk kemitraan dalam rangka menjamin ketersediaan bahan baku fosfo-kompos; dan (iv) Mendorong institusi/lembaga berkompeten untuk menciptakan perangkat lunak (aplikasi komputer) berisi rekomendasi pemupukan P bersumber fosfo-kompos pada lahan kering masam yang spesifik lokasi dan ramah pengguna berbasis Android, dan sensor detektor reaktifitas bahan baku fosfo-kompos.

V. KESIMPULAN

Pengelolaan hara fosfor (P) pada lahan kering masam merupakan tantangan krusial dalam pengembangan tanaman pangan, mengingat karakteristik tanahnya yang cenderung menghambat ketersediaan P bagi tanaman. Inovasi teknologi fosfo-kompos sebagai pupuk berbasis fosfat alam menawarkan solusi yang menjanjikan dalam mengatasi kendala tersebut. Kesimpulan berikut merangkum naskah orasi ini terkait tantangan yang dihadapi, keunggulan fosfo-kompos, dan dukungan yang dibutuhkan untuk keberhasilan implementasinya secara luas.

- 1) Pengembangan tanaman pangan pada lahan kering masam menghadapi permasalahan utama, berupa hara P (fosfor) yang tidak tersedia bagi tanaman karena tingginya kadar aluminium (Al) dan besi (Fe) dalam tanah, sehingga P terikat membentuk senyawa Al-P dan Fe-P, yang tidak dapat diserap oleh akar tanaman.
- 2) Fosfo-kompos, produk teknologi aplikasi langsung fosfat alam mampu mengatasi permasalahan hara P dan kendala-kendala utama kesuburan tanah lainnya pada lahan kering masam. Penggunaan teknologi tersebut di lahan kering masam memiliki keunggulan, yaitu: (i) Fosfo-kompos sebagai sumber hara P pada tanah masam menunjukkan efektivitas agronomi yang hampir sama atau sama dengan pupuk P anorganik; (ii) Residu fosfo-kompos dapat bertahan selama beberapa musim tanam atau tahun, dan memiliki efek pengapuran, sehingga juga berperan menurunkan

kemasaman tanah dan kelarutan Al; dan (iii) Bersifat lepas lambat (*slow release*) dan lebih ramah lingkungan.

- 3) Untuk menjamin keberhasilan pengembangan inovasi teknologi fosfo-kompos, diperlukan dukungan dari para pengambil kebijakan dan pemangku kepentingan berupa: (i) Penyediaan bahan bakunya, yaitu fosfat alam yang berkualitas sesuai dengan SNI 02-3776-2005; (ii) Penumbuhan usaha-usaha bisnis kecil (UMKM) pengolah pupuk fosfo-kompos; dan (iii) Pengenalan dan pendampingan cara penggunaan fosfo-kompos di lapangan pada petani/kelompok tani.
- 4) Keberhasilan program pengembangan inovasi teknologi fosfo-kompos pada lahan kering masam secara langsung akan berdampak pada peningkatan pendapatan petani di kawasan-kawasan pengembangan, yang pada gilirannya akan berdampak pada peningkatan ekonomi regional dan kontribusi yang nyata pada ketahanan pangan nasional.

VI. PENUTUP

Inovasi teknologi fosfo-kompos memiliki keunggulan kompetitif baik dari segi teknis maupun efektivitas agronomi, sehingga layak untuk dikembangkan di lahan kering masam. Namun dalam jangka panjang produk teknologi ini juga akan menghadapi tantangan, diantaranya: (1) Pengelolaan sumber daya alam yang berkelanjutan agar tidak merusak lingkungan, (2) Keterbatasan akses dan infrastruktur di daerah terpencil, sedangkan produksi fosfo-kompos memerlukan investasi teknologi atau infrastruktur distribusi yang memadai, (3) Apakah teknologi fosfo-kompos dapat beradaptasi terhadap perubahan iklim? Karena perubahan iklim sangat mungkin akan merubah karakteristik tanah. Dibutuhkan penelitian apakah teknologi ini dapat terus efektif, dan (4) Ketergantungan pada inovasi teknologi, karena upaya peningkatan produktivitas lahan akan memerlukan inovasi teknologi yang terus berkembang sesuai kebutuhan petani dan masalah lingkungan yang muncul. Dengan kata lain, akan terdapat tantangan ke depan yang mencakup faktor-faktor lingkungan, teknologi, ekonomi, dan sosial yang perlu diatasi dengan pendekatan yang terpadu dan berkelanjutan.

Di samping berbagai tantangan di atas yang harus perlu dijawab, keberhasilan pengembangan teknologi fosfo-kompos dalam mendukung program ketahanan pangan juga akan sangat tergantung pada peran serta para pemangku kepentingan (*stakeholders*), yaitu: (1) Peran pemerintah mengeluarkan kebijakan yang mendukung penggunaan produk fosfo-kompos, misalnya dengan memberikan insentif bagi petani pengguna fosfo-kompos; (2) Pemerintah berperan memberikan dukungan finansial kepada petani, termasuk subsidi atau kredit murah

untuk pengadaan teknologi ini; (3) Pemerintah mendanai riset kolaborasi antara lembaga penelitian, universitas, dan pihak swasta terkait pengembangan teknologi fosfo-kompos yang lebih efektif dan efisien atau lebih tepat guna untuk lahan kering masam; dan (4) Pihak swasta berperan melakukan penelitian dan pengembangan untuk menghasilkan produk fosfo-kompos yang lebih baik dan murah, serta memastikan pasokan yang cukup untuk memenuhi permintaan petani. Dengan peran serta dan kolaborasi yang baik antara pemerintah dan swasta, maka tantangan dalam meningkatkan produktivitas lahan kering masam skala nasional dengan menggunakan fosfo-kompos dapat diatasi secara efektif, sekaligus mendukung ketahanan pangan nasional secara berkelanjutan.

VII. UCAPAN TERIMA KASIH

Majelis Pengukuhan Profesor Riset yang saya muliakan dan hadirin yang saya hormati.

Perkenankan saya mengucapkan syukur kepada ALLAH SWT, atas karunia dan rahmatNya sehingga orasi ini dapat disampaikan dengan lancar dan penuh hikmat.

Pada kesempatan ini, saya menyampaikan terima kasih kepada Presiden Republik Indonesia, Jenderal TNI (Purn) Prabowo Subianto dan Presiden Republik Indonesia yang ke-7 Ir. H. Joko Widodo atas amanat dan penugasan saya sebagai peneliti ahli utama di BRIN; Kepala BRIN, Dr. Laksana Tri Handoko; Wakil Kepala BRIN, Prof. Ir. Amarulla Octavian, S.T., M.Sc., DESD., IPU., ASEAN.Eng., atas kesempatan dan dukungan pada penyelesaian naskah Orasi Ilmiah; Ketua Majelis Pengukuhan Profesor Riset BRIN, Prof. Ir. Wimpie Agoeng Noegroho Aspar, MSCE., Ph.D.; dan Sekretaris Majelis Pengukuhan Profesor Riset BRIN, Prof. Dr. Ir. Zainal Arifin, M.Sc.

Saya berterima kasih kepada Tim Penelaah Naskah Orasi Ilmiah, Prof. Dr. Ir. Sukarman, M.S.; Prof. Dr. Ir. Hasil Sembiring, M.Sc.; Prof. Dr. Ir. Sri Yusnaini, M.S., atas telaah dan sarannya. Terima kasih kepada Sekretaris Utama BRIN, Nur Tri Aries Suestiningtyas, S.IP., M.A.; Kepala Organisasi Riset Pertanian dan Pangan, Puji Lestari, S.P., M.Si., Ph.D.; Kepala BOSDM BRIN, Ratih Retno Wulandari, S.Sos., M.Si.; Kepala Pusat Riset Tanaman Pangan, Dr. Yudhistira Nugraha, S.P., M.P.; Penelaah Naskah Orasi tingkat Organisasi Riset, Puji Lestari, S.P., M.Si., Ph.D., Dr. Yudhistira Nugraha, S.P., M.P., Prof. Dr. Ir. Hasil

Sembiring, M.Sc., Prof. Dr. Ir. Arief Harsono, M.S., Prof. Dr. Ir. Elna Karmawati, M.Si. dan Prof. Dr. Ir. Made Jana Mejaya, M.Sc. atas telaah dan sarannya; Panitia Pelaksana Pengukuhan Profesor Riset; Ketua (Dr. Mas Teddy S.) dan anggota Kelris Pengelolaan Lahan, Pupuk, dan Pembenah Tanah (Kelris 15), serta semua pihak yang terkait.

Terima kasih saya ucapkan kepada Dr. Darwis S. N., Prof. Dr. Ir. Iswandi Anas Chaniago, M.Sc., Prof. Dr. Mike J. Hedley (Massey University), Ir. Hasnam, M.Sc., Ph.D., Prof. Dr. Ir. Achmad Suryana, M.S., Prof. Dr. Ir. Haryono, M.Sc., Prof. Dr. Ir. Effendi Pasandaran, M.S., dan Husnain, M.P., M.Sc., Ph.D. atas dukungan beliau semua terhadap pengembangan karir saya sebagai peneliti. Saya mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada guru-guru SD, SMP, dan SMA yang telah memberikan pendidikan moral dan etika dan ilmu pengetahuan yang menjadi dasar pengembangan kompetensi kandidat. Ucapan terima kasih yang besar kepada Prof. Dr. Muhajir Utomo, M.Sc. dan Dr. Herawati Soekardi Djausal, M.Si. sebagai pembimbing kandidat pada jenjang S1 di FP UNILA; Prof. Dr. Willy Verstraete pembimbing S2 kandidat di Ghent University, Belgium; dan Dr. P. Loganathan, Prof. Dr. Russ W. Tillman di Massey University dan Dr. Tim W. Payn di Forest Research Institute, Rotorua, New Zealand sebagai pembimbing S3 kandidat.

Saya juga mengucapkan terima kasih kepada Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., I.P.M., Dr. Ir. Spudnik Sujono K., Ir. Hasyim Asyari, M.M., Drs. Chairul Iskandar, Ir. Mesah Tarigan, M.Sc., Andi Rahman, M.Si., Valdi Riovia, S.Hut., MBA., Drs. Pairul Syah, M.H., Prof. Dr. Soni Isnaini, M.P., Prof. Dr. Ir. Risfaheri, M.Si., Prof. Dr. Ir. Rubiyo, M.S., Dr. Ir. Robet Asnawi, M.S., Prof. Dr. Ir. Yusuf, M.P., Djoko Mulyono, S.Si., M.P., Prof. Dr. Ir. Dermiyati, Prof. Dr. Ir. Ainin Niswati, Dr. Ir.

M. A. Syamsul Arif, M.Sc., Akhmad Ansyor, S.P., M.Sc., Dr. Robinson Putra, S.P., M.Si., Bob Toes, Ross Wallace, dan Dr. James Hanly, Ph.D. (Massey University), dan sahabat-sahabat lainnya atas doa, dorongan dan semangat yang diberikan hingga saya menyelesaikan naskah orasi ilmiah ini.

Hormat dan terima kasih sebesar-besarnya saya ucapkan kepada Ibunda tercinta, Hj. Ratna Suriyati (Almh) dan Ayahanda, H. Abdul Rachman Rifaie (Alm), yang mengasuh, mendidik dengan penuh kasih sayang. Terima kasih saya haturkan kepada Ibu mertua, Hj. Nur Almah (Almh) dan Ayah mertua, H. M. Thabranie Daud (Alm); Mbak Win, Atu Heri, Atu Anna, Atu Gus, Kak Sukri, dan Yanti, serta Bang Iwan (Prof. Dr. Sapta Nirwandar, S.E.), Mba Kuntari, dan Kak Haryanti Syafrin atas doa dan dorongan morilnya. Kepada Isteri tercinta Sri Imawati, ananda tersayang Arvina Utami dan A. Arvanza Rivaie, Papa ucapkan terima kasih atas dukungan dan doanya yang tiada henti.

Kepada para undangan, hadirin, dan semua pihak yang telah memberikan dukungan kepada saya, diucapkan banyak terima kasih. Semoga orasi ilmiah ini bermanfaat bagi pengembangan iptek di bidang pertanian di Indonesia. Dengan mengucapkan *Alhamdulillah Rabbil 'Aalamiin*, saya akhiri orasi ini dan mohon maaf atas segala kekurangan dan kekhilafan dalam menyampaikannya. *Wabillaahitaufiq Walhidayah. Wassalaamualaikum warahmatullaahi wa barakaatuh.*

DAFTAR PUSTAKA

- Adiansyah, J. S., Ningrum, N. P., Pratiwi, D., & Hadiyanto, H. (2019). Kajian daur hidup (*Life cycle assessment*) dalam produksi pupuk urea: Studi kasus PT Pupuk Kujang. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 17(3), 522. <https://doi.org/10.14710/jil.17.3.522-527>
- Adiningsih, J. S. (1992). Peranan efisiensi penggunaan pupuk untuk melestarikan swasembada pangan. Orasi Pengukuhan Ahli Peneliti Utama. Badan Litbang Pertanian, Jakarta. <https://repository.pertanian.go.id/items/2ebf96b9-b974-4b29-baec-75e14502f37c>
- Adiningsih, J. S., Nursyamsi, D., & Partohardjono, S. (2001). Direct application of phosphate rock: Indonesia's experience and constraints of adoption at farmer level. *Paper presented at the International Meeting on the Use of Phosphate Rock for Direct Application and Related Technology*, July 16–20, 2001, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Adnyana, M. O. (2000). Farming systems research in Indonesia: Lessons learnt and future direction. In *Proceeding of Caser-JIRCAS International Workshop, "Learning from the farming systems research experience in Indonesia"*, Bogor, 3–4 March, 1999. Japan International Research Center for Agricultural Sciences, Tsukuba, Japan.
- Agegnehu, G., Amede, T., Erkossa, T., Yirga, C., Henry, C., Tyler, R., & ... Sileshi, G. W. (2021). Extent and management of acid soils for sustainable crop production system in the tropical agroecosystems: a review. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*, 71(9), 852–869. <https://doi.org/10.1080/09064710.2021.1954239>

- Alfons, J. B., & **Rivaie, A. A.** (2011). Sagu mendukung ketahanan pangan dalam menghadapi dampak perubahan iklim. *Jurnal Perspektif*, 10(2), 81–91.
- Alfons, J. B., Hutuely, L., **Rivaie, A. A.**, Procula, R. M., Sirappa, M., Pasireron, M., & Sutrisno, N. (2012a). Membangun pulau mandiri pangan mendukung ketahanan pangan di Maluku. *Membangun Kemampuan Inovasi Berbasis Potensi Wilayah*. Penerbit IAARD Press. ISBN 978–602–9462–44–9.
- Alfons, J. B., & **Rivaie, A. A.** (2012b). Studi keragaman plasma nutfah ubi minor (*Dioscorea* spp.) di Maluku. Pelestarian dan pemanfaatan sumberdaya genetik secara berkelanjutan untuk meningkatkan kesejahteraan masyarakat. *Prosiding Seminar dan Kongres Nasional Sumber Daya Genetik (SDG)*. Medan 12–14 Desember 2012. Penerbit Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Bioteknologi dan Sumberdaya Genetik Pertanian. ISBN: 0123456789.
- Alfons, J., & **Rivaie, A. A.** (2012c). Kajian keragaman plasma nutfah keladi (*Xanthosoma* spp. dan *Colocasia* spp.) di beberapa kabupaten di Provinsi Maluku. Pelestarian dan pemanfaatan sumberdaya genetik secara berkelanjutan untuk meningkatkan kesejahteraan masyarakat. *Prosiding Seminar dan Kongres Nasional Sumber Daya Genetik (SDG)*. Medan 12–14 Desember 2012. Penerbit Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Bioteknologi dan Sumberdaya Genetik Pertanian. ISBN: 0123456789.
- Amarasinghe, T., Madhusa, C., Munaweera, I., & Kottegoda, N. (2022). Review on mechanisms of phosphate solubilization in rock phosphate fertilizer. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 53(4), 1–17. <https://doi.org/10.1080/00103624.2022.2034849>
- Ansyor, A., Hidayat, Z., & **Rivaie, A. A.** (2019). Pengaruh socio-demographic terhadap sikap petani dan penyuluh dalam aktivitas bioindustri di Provinsi Kepulauan Bangka Belitung. *Buletin*

Pengkajian Pertanian Spesifik Lokasi, 1(1), 11–20. <https://www.scribd.com/document/628507765/produktifitas-beberapa-pakan-ternak>

- Balai Penelitian Tanah. (2020). Laporan tahunan 2019. Teknologi pengelolaan tanah mendukung usahatani produktif dan berkelanjutan. Balai Penelitian Tanah. Balai Besar Litbang Sumber Daya Lahan Pertanian, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Kementerian Pertanian. 103 hal. <https://tanahpupuk-bsip-ppid.pertanian.go.id/doc/222/LAPTAHUNAN%202019.pdf>
- Barea, J. M., Toro, M., Orozco, M. E., Campos, E., & Azcon, R. (2002). The application of isotopic (^{32}P and ^{15}N) dilution techniques to evaluate the interactive effect of phosphate-solubilising rhizobacteria, mycorrhizal fungi and *Rhizobium* to improve the agronomic efficiency of rock phosphate for legume crops. *Nutrient Cycling in Agroecosystem*, 63(1), 35–42. <https://citeseerx.ist.psu.edu/t?repid=rep1&type=pdf&doi=7bcc3726ca1e7098f02d83aa924912310c44d870>
- Basri, I. H., & Zaini, Z. (1992). Research at the upland farming systems key site in Sitiung. *Proceedings of the Upland Rice-Based Farming Systems Research Planning Meeting*, 18 April – 1 May 1992, Chiang Mai, Thailand. International Rice Research Institute, Manila. Philippines (221–241). <https://catalog.hathitrust.org/Record/009155139>
- Bolan, N. S., & Hedley, M. J. (2003). Role of carbon, nitrogen, and sulphur cycles in soil acidification. In Z. Rengel (Ed.). *Handbook of soil acidity*. Marcel Dekker, New York: Marcel Dekker; 2003. p. 29–56. <https://doi.org/10.1201/9780203912317>
- Chauhan, B. S., Stewart, J. W. B., & Paul, E. A. (1981). Effect of labile inorganic phosphate status and organic carbon additions on the microbial uptake of phosphorus in soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 61, 373–385. <https://cdnsiencepub.com/doi/10.4141/cjss81-041>

- Chien, S. H. (1982). Direct application of phosphate rocks in some tropical soils of South America: A status report. In E. Pushparajah, & S. H. A. Hamid (Eds.). *Phosphorus and potassium in the tropics*. Malaysian Society of Soil Science, Kuala Lumpur. p. 519–529.
- Chien, S. H., & Friesen, D. K. (2000). Phosphate fertilizers and management for sustainable crop production in tropical acid soils. In IAEA (Ed). *Management and conservation of tropical acid soils for sustainable crop production*. IAEA-TECDOC–1159. Vienna, IAEA. 2000. p. 73–89. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1159_prn.pdf
- Dahamarudin, L., & **Rivaie, A. A.** (2013). Germination capacity, growth and yield of three upland rice varieties increased following seed invigoration treatments. *International Research Journal of Agricultural Science and Soil Science*, 3(2), 43–50.
- Darwis, S. N., & **Rivaie, A. A.** (1993). Teknologi budidaya tanaman industri pada lahan alang-alang. Dalam S. Sukmana, J. Suwardjo, S. Adiningsih, H. Subagjo, H. Suhardjo, & Y. Prawirasumantri (Eds.). *Pemanfaatan lahan alang-alang untuk usahatani berkelanjutan*. *Prosiding Seminar Lahan Alang-alang*, Bogor 1 Desember 1992. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor. Badan Litbang Pertanian. p. 125–135.
- Dhillon, J., Torres, G., Driver, E., Figueiredo, B., & Raun, W. R. (2017). World phosphorus use efficiency in cereal crops. *Agronomy Journal*, 109, 1670–1677. <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.2134/agronj2016.08.0483>
- Diptaningsari, D., & **Rivaie, A. A.** (2021). Comparison study of growth and yield of three soybean varieties on acid upland soil of South Lampung. The 1st International Conference on Sustainable Tropical Land Management. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 648 012066. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/648/1/012066/pdf>

- Dirjen Prasarana dan Sarana Pertanian. (2022). Petunjuk teknis kegiatan pupuk menuju pertanian organik melalui Unit Pengolah Pupuk Organik Tahun Anggaran 2023. Keputusan Direktur Jenderal Prasarana dan Sarana Pertanian No. 45.10/KPTS/SR.320/B/11/2022. <https://psp.pertanian.go.id/storage/1423/Petunjuk-Teknis-Kegiatan-Pupuk-Menuju-Pertanian-Organik-Melalui-UPPO.pdf>
- Ditta, A. & Khalid, A. (2016). Bio-Organo-Phos: A sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. *Organic Fertilizers - From Basic Concepts to Applied Outcomes*. p.109–136. <http://dx.doi.org/10.5772/62473>
- Dwivedi, A. D. & Gupta, D. K. (2006). Calcined phosphate fertilizer from Jhamarkotra secondary phosphate ore and rock phosphate beneficiation plant bulk circuit tail. *Proceedings of the International Seminar on Mineral Processing Technology - 2006*, Chennai, India. p. 382– 389. <https://core.ac.uk/download/pdf/297715106.pdf>
- Endriani, Diptaningsari, D., Meithasari, D., & **Rivaie, A. A.** (2018). Optimization of productivity of three soybean varieties through fertilization in dry land acid soils in South Lampung. *Proceeding of International Workshop and Seminar*, Surakarta, 18–20 September 2018, Central Java, Indonesia, p. 648–658. file:///C:/Users/Dell/Downloads/Endriani_new-1.pdf
- Endriani, **Rivaie, A. A.**, Barus, J., Meithasari, D., & Asnawi, R. (2021). Improving the quality of acid soils to increase soybean yields and farmer's incomes. The 1st International Conference on Sustainable Tropical Land Management. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 648 012059. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/648/1/012059/pdf>
- Fang, N. N., Chen, Z. H., Liu, Z. Q., Dai, H. M., Yang, X. M., & Wang, W. (2022). Effects of mechanochemically activated phosphate rock on maize growth and phosphorus use. *Plant, Soil,*

- Environment*, 68, 155–161. <https://pse.agriculturejournals.cz/pdfs/pse/2022/03/05.pdf>
- Harsono, A., Husein, E., Sucahyono, D., & Muzaiyanah, S. (2014). Pupuk hayati untuk mendukung pengembangan produksi kedelai di tanah masam. *Buletin Palawija*, 28, 102–114.
- Hartatik, W., & Adiningsih, J. S. (1987). Pengaruh pengapuran dan pupuk hijau terhadap hasil kedelai pada tanah Podsolik Sitiung di Rumah Kaca. *Pemberitaan Penelitian Tanah dan Pupuk*, 7, 1–4.
- Herlina, N., Utami, S. N. H., & Wulandari, C. (2022). Effects of nano guano, nano phosphate rock, and SP-36 fertilizers on maize growth and phosphorus uptake in Inceptisol. *Ilmu Pertanian (Agricultural Science)*, 7(2), 99–111. <file:///C:/Users/Dell/Downloads/71374-265900-3-PB-1.pdf>
- Heryani, N., Kartiwa, B., Sosiawan, H., Rejekiningrum, P., Adi, S. H., Apriyana, Y., Pramudia, A., Yufdy, M. P., Tafakresnanto, C., **Rivaie, A. A.**, Suratman, Dariah, A., Malik, A., Yusuf, & Setiani, C. (2022). Analysis of climate change impacts on agricultural water availability in Cimanuk Watershed, Indonesia. *Sustainability (Switzerland)*, 14(23), 16236. <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/23/16236>
- Husnain, Rochayati, S., Sutriadi, T., Nassir, A., & Sarwani, M. (2014). Improvement of soil fertility and crop production through direct application of phosphate rock on maize in Indonesia. *Procedia Engineering*, 83, 336–343. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814011187?via%3Dihub>
- Irawan, Dariah, A., & Rachman, A. (2015). Pengembangan dan diseminasi inovasi teknologi pertanian mendukung optimalisasi pengelolaan lahan kering masam. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 9(1), 37–50.
- Isnaini, S., Maryati, & **Rivaie, A. A.** (2023). Comparison of potassium quantity-intensity relationships in tropical paddy soil under tillage

and no-tillage systems after fifteen growing seasons. *Plant, Soil and Environment*, 69(1), 1–9. <https://doi.org/10.17221/337/2022-PSE>

- Kasno, A., Rochayati, S., & Prasetyo, B. H. (2009). Deposit, penyebaran dan karakteristik fosfat alam. Fosfat alam: pemanfaatan fosfat alam yang digunakan langsung sebagai pupuk sumber P. Balai Penelitian Tanah, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Departemen Pertanian. ISBN 978–602–8039–19–2. 141 hal. <https://repository.pertanian.go.id/server/api/core/bitstreams/39b147da–52bd–4116–8168–1e611f4454ca/content>
- Kasno, A., Nurida, N., Siregar, A. S., Samsun, A., Widowati, L. R., & Husnain. (2023). Enhancing chemical properties and maize yield through dolomite application on rock phosphate amended Oxisol. The 9th ICCC 2023. E3S Web of Conferences 467 01002. 2023. https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2023/104/e3sconf_9th-iccc_01002.pdf
- Kasno, A., **Rivaie, A. A.**, Tafakresnanto, C., Pratiwi, E., Karmawati, E., Siregar, A. F. Hatta, M., & Sutriadi, M. T. (2024). Nitrogen dynamic and precise management to predict corn yield in tropical upland acid soils. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 10(4), 1843–1858. https://www.gjesm.net/article_714210_2ecf99c7344c8e2582d20eb42934703d.pdf
- Kucey, R. M. N., Janzen, H. H., & Leggett, M. E. (1989). Microbially mediated increases in plant-available phosphorus. *Advances in Agronomy*, 42, 199–228. [https://doi.org/10.1016/S0065–2113\(08\)60525–8](https://doi.org/10.1016/S0065–2113(08)60525–8)
- Leiwakabesy, F. M. (1989). Management of acid humid tropical soils in Indonesia. In E. T. Craswell, & E. Pushparajah (Eds.). Management of acid soils in the humid tropics of Asia. *ACIAR Monograph No.13* (IBSRAM Monograph No.1), p. 54–61.
- Makinde, E. A., & Agboola, A. A. (2002). Soil nutrient changes with fertilizer type in cassava based cropping system. *Journal of*

- Plant Nutrition*, 25, 2303–2313. <https://doi.org/10.1081/PLN-120014077>
- Maryadi. (1986). Kondisi pertanian di daerah transmigrasi Tulang Bawang. *Majalah BPPT*, (X)4, 37–46. file:///C:/Users/Dell/OneDrive/Documents/BRIN/ORASI/DRAFT%20ORASI/Tulang%20Bawang.pdf
- Miyasaka, C. & Habte, M. (2001). Plant mechanisms and mycorrhizal symbioses to increase phosphorus uptake efficiency. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, 32, 1101–1147. <https://doi.org/10.1081/CSS-100104105>
- Mulyani, A., Dedi Nursyamsi, D., & Syakir, M. (2017). Strategi pemanfaatan sumberdaya lahan untuk pencapaian swasembada beras berkelanjutan. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 11(1), 11–22. <https://media.neliti.com/media/publications/223337-strategi-pemanfaatan-sumberdaya-lahan-un.pdf>
- Niswati, A., Fajrianto, A. D., Sunyoto, Hidayat, K. F., Yusnaini, S., & **Rivaie, A. A.** (2021). Changes in soil phosphorus availability and nutrient uptake by maize following the application of wastewater-acidulated phosphate rock. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 724 012016. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/724/1/012016/pdf>
- Partohardjono, S., & Adiningsih, J. S. (1991). Response of food crops to phosphate rocks. *Indonesian Agricultural Research and Development Journal*, 13, 46–57.
- Petkova, V., Koleva, V., Kostova, B., & Sarov, S. (2015). Structural and thermal transformations on high energy milling of natural apatite. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 121, 217–225. <https://www.researchgate.net/publication/282187689>
- Pratiwi, E., Ilmi, N. S., **Rivaie, A. A.**, Adriany, T. A., & Nababan, A. F. (2023). Enhancing zinc uptake and grain yield of Ciharang and Inpari IR Nutri Zinc rice varieties using Zn-solubilizing

bacteria. E3S Web of Conferences 467, 2023. 01025. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346701025>

- Pratiwi, E., Lestari, P., Nugraha, Y., Hartatik, W., Susanti, Z., Subiksa, I. G. M., Kasno, A., Adriany, T. A., Fatma, Y. S., Nababan, A. F., & **Rivaie, A. A.** (2024). Application of indigenous zinc-solubilizing bacteria in biofertilizers to enhance zinc nutrition of rice grains in inceptisols paddy fields. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 10(4), 1775–1790. https://www.gjesm.net/article_713141_560bb564d58b2b531e293e6505b31dff.pdf
- PT Boston Indo Global. (2025). Pupuk anorganik SP–36 Petro (Subsidi & Non-Subsidi). <https://bostonindoglobal.web.indotrading.com/>
- PT Pusri Agro Lestari. (2025). Pupuk Rock Phosphate ex Egypt. <https://padiumkm.id/store/631a76cd7476cace453f8960>
- Rajan, S. S. S. (2004). Ways of improving the agronomic effectiveness of phosphate rocks. Use of phosphate rocks for sustainable agriculture. *FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin*, 13, 85–97. <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/007/y5053e/y5053e00.pdf>
- Rivaie, A.A.**, & Asnawi, R. (1993). Pengaruh pengapuran dan pupuk fosfat terhadap sifat-sifat kimia tanah dan pertumbuhan vanili. *Buletin Ilmiah INSTIPER*, 4(1), 1–13.
- Rivaie, A.A.**, & Karmawati, E. (1993). Pengaruh beberapa pola tanam terhadap produksi kelapa dan padi gogo. *Buletin Tanaman Industri*, 6, 31–38.
- Rivaie, A. A.**, Taher, S., & Karmawati, E. (1993). Prospek pengembangan budidaya tanaman industri dengan pengolahan tanah konservasi. *Prosiding Seminar Nasional IV Konservasi Tanah*. Universitas Lampung 4–5 Mei 1993. Bandar Lampung. pp. 156–163.
- Rivaie, A.A.** (2004). Understory effects on phosphorus fertiliser response of second-rotation *Pinus radiata*. Ph.D. Thesis. Massey University, New Zealand. <http://hdl.handle.net/10179/1748>

- Rivaie, A. A.,** Loganathan, P., Graham, J. D., Tillman, R. W., & Payn, T. W. (2008a). Effect of phosphate rock and triple superphosphate on soil phosphorus fractions and their plant-availability and downward movement in two volcanic ash soils under *Pinus radiata* plantations in New Zealand. *Nutrient Cycling in Agroecosystem*, 82, 75–88. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10705-008-9170-6>
- Rivaie, A. A.,** Sarwani, M., Jamal, E., Medionovianto, R. D., & Hendayana, R. (2008b). Fasilitas riset aksi (*Action Research Facility*). Wadah percobaan partisipatif petani. Balai Besar Pengkajian dan Pengembangan Teknologi Pertanian. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. ISBN 978–979–1415–21–7. 30 hal. <https://repository.pertanian.go.id/handle/123456789/15983>
- Rivaie, A. A.,** Karmawati, E., & Rusli. (2008c). Posisi contoh daun untuk analisis status fosfor (P) pada bibit jarak pagar (*Jatropha curcas* L.) dan kadar P tersedia pada daerah perakarannya. *Jurnal Litro*, 14(4), 125–130. <https://repository.pertanian.go.id/handle/123456789/10802>
- Rivaie, A. A., & Tillman, R. W.** (2009a). Phosphorus fractions of fertiliser-derived P in an allophanic soil under *Pinus radiata* seedlings grown with broom and ryegrass. *Journal of Forestry Research*, 20, 229–236. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11676-009-0042-y>
- Rivaie, A. A. & Tillman, R.W.** (2009b). Rhizosphere pH and phosphatase activity in orthic allophanic soil under *Pinus radiata* seedlings grown with broom and ryegrass. *Journal of Forestry Research*, 6(1), 37–52. <https://media.neliti.com/media/publications/65570-EN-rhizosphere-ph-and-phosphatase-activity.pdf>
- Rivaie, A. A., & Tillman, R.W.** (2009c). Growth response of second-rotation *Pinus radiata* on an Orthic Allophanic soil to P fertilizer

and weed control. *Taiwan Journal of Forest Science*, 24(4), 243–56.
https://ws.tfri.gov.tw/001/Upload/OldFile/files/24-4_03.pdf

Rivaie, A. A., & Tillman, R.W. (2010a). Phosphorus fertilizer induced changes in the soil available P, the P nutrition and the growth of *Pinus radiata* seedlings grown in association with understory. *Journal of Forestry Research*, 21(2), 129–136. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11676-010-0021-3>

Rivaie, A.A., & Loganathan, P. (2010b). Phosphorus fertiliser source and weed control effects on growth of three-year-old second-rotation *Pinus radiata* on Orthic Pumice soil. *Southern Forests*, 72(2), 74–80. <https://www.ajol.info/index.php/sfjfs/article/view/58378>

Rivaie, A.A. (2011a). Growth response of broom (*Cytisus scoparius*) growing with and without radiata pine (*Pinus radiata*) seedlings to different P levels in soils. *Journal of Forestry Research*, 22(4), 597–602. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11676-011-0173-9>

Rivaie, A. A. (2011b). Potensi strategis hotong (*Setaria italica* (L) Beauv.) sebagai komponen ketahanan pangan di Maluku menghadapi dampak perubahan iklim. Percepatan transfer inovasi teknologi spesifik lokasi untuk pemberdayaan petani mendukung ketahanan pangan nasional. *Prosiding Seminar Nasional Inovasi Teknologi Pertanian Spesifik Lokasi*. Bogor, 19–20 Nopember 2011. Buku 1. Penerbit Balai Besar Pengkajian dan Pengembangan Teknologi Pertanian. ISBN: 978–979–1415–74–3.

Rivaie, A. A. (2013). Peranan tanaman koro pedang (*Canavalia* Sp.) mendukung ketahanan pangan dan perbaikan kesuburan tanah bekas tambang timah di Kepulauan Bangka Belitung. *Prosiding Seminar Nasional Inovasi Teknologi Pertanian Ramah Lingkungan Spesifik Lokasi Mendukung Pembangunan Pertanian Berkelanjutan* di Provinsi Bengkulu, 9 Desember 2013. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Kementerian Pertanian. ISBN: 978–602–9064–11–7. pp. 354–361.

- Rivaie, A. A., & Isnaini, S.** (2013). Influence of flooding levels on changes in C, N and weight of rice straw in a paddy soil. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*, 3(5), 80–85. <https://www.iiste.org/Journals/index.php/JBAH/article/view/5373>
- Rivaie, A. A., Isnaini, S., & Maryati.** (2013). Application of *Azolla pinnata* enhanced soil available P and rice yield. *Jurnal Tanah dan Iklim. Edisi Khusus Rawa*, 2013, 13–16.
- Rivaie, A. A.** (2014a). Kadar fosfor daun jarak pagar (*Jatropha curcas* L.) dan korelasinya dengan fosfor tanah tersedia dari beberapa metode ekstraksi. *Jurnal Littri*, 20(3), 151–157. <https://repository.pertanian.go.id/handle/123456789/1554>
- Rivaie, A. A.** (2014b). Influence of SP-36 and phosphate rock on changes in soil available P, leaf P content, and growth of Physic Nut (*Jatropha curcas* L.) in an Ultisol. *Journal of Tropical Soils*, 19(1), 9–15. <https://journal.unila.ac.id/index.php/tropicalsoil/article/view/195/194>
- Rivaie, A. A.** (2014c). Prospek pengembangan budidaya koro pedang (*Canavalia* sp.) mendukung kecukupan pangan dan gizi serta kesuburan tanah di Kepulauan Maluku. *Prosiding Seminar Regional Wilayah Sumatera. Pengembangan Teknologi Spesifik Lokasi Melalui Pemanfaatan Sumberdaya Lokal Menuju Pertanian Ramah Lingkungan*. Banda Aceh, 2–3 September 2014. ISBN 978–602–17249–1-0. pp 41–50.
- Rivaie, A. A.** (2014d). Integrasi Lasa (lada dan sapi) (model usahatani alternatif ramah lingkungan pasca tambang timah di Kepulauan Bangka Belitung). *Agros*, 16(1), 109–123.
- Rivaie, A. A.** (2014e). The effects of understory vegetation on P availability in *Pinus radiata* forest stands: A review. *Journal of Forestry Research*, 25(3), 489–500. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11676-014-0488-4>
- Rivaie, A. A., & Suwardih.** 2014. Potensi pengembangan model pertanian bio-industri berbasis kelapa sawit, sapi dan serai wangi

di Kepulauan Bangka Belitung: Suatu Gagasan. *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Inovasi Teknologi Pertanian Mendukung Percepatan Pembangunan Provinsi Lampung*. Bandar Lampung, 23 Oktober 2014. Buku 1. Penerbit Balai Pengkajian Teknologi Pertanian (BPTP) Lampung Kerjasama dengan Bakorluh Lampung, Balai Veteriner Lampung, Universitas Lampung, Politeknik Negeri Lampung. ISBN 978-979-3263-43-4.

- Rivaie, A. A.** (2015a). Changes in soil available phosphorus, leaf phosphorus content and yield of sword bean (*Canavalia ensiformis* (L.) DC.) by application of SP-36 and phosphate rock on acid upland soil of East Lampung. *Journal of Tropical Soils*, 20(1), 29–36. <http://dx.doi.org/10.5400/jts.2015.v20i1.29-36>
- Rivaie, A. A.** (2015b). Potensi penyediaan pangan dan konservasi lahan pulau-pulau kecil di Maluku: Peran agroforestri berbasis aren. *Jurnal Litbang Pertanian*, 21(1), 173–193.
- Rivaie, A. A., Silalahi, M., & Pasandaran, E.** (2016). Peluang perluasan areal pertanian pangan di Provinsi Lampung, dalam E. Pasandaran, R. Heriawan, dan M. Syakir (Eds.): Sumber daya lahan dan air: prospek pengembangan dan pengelolaan. Jakarta: IAARD Press. pp. 320–343.
- Rivaie, A. A.** (2016). Plant interference and trial designs to study it in a glasshouse: a review. *Journal of Forestry Research*, 27, 231–237. file:///C:/Users/Dell/Downloads/Plant_interference_and_trial_designs_to.pdf
- Rivaie, A. A., Kiswanto, & Pasandaran, E.** (2017). Inovasi pola tanam relay-intercropping jagung ubikayu di Lampung mengantisipasi dampak kekeringan. Dalam E. Pasandaran, M. Syakir, R. Heriawan, & M. P. Yufdy (Eds.). Memperkuat kemampuan wilayah menghadapi perubahan iklim. IAARD Press. ISBN 978-602-344-199-0. pp. 305–337.
- Rochayati, S., Setyorini, D., & Adiningsih, J. S.** (2001). Peranan uji tanah dalam meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk. Paper

presented in seminar “Teknologi untuk Meningkatkan Efisiensi Penggunaan Pupuk di Indonesia”. BPPT. Jakarta, 6 Mei 2002.

- Rochayati, S., Sutriadi, M. T., & Kasno, A. (2009). Pemanfaatan fosfat alam untuk lahan kering masam. Fosfat alam: pemanfaatan fosfat alam yang digunakan langsung sebagai pupuk sumber P. Balai Penelitian Tanah, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Departemen Pertanian. ISBN 978-602-8039-19-2. 141 hal. <https://repository.pertanian.go.id/server/api/core/bitstreams/39b147da-52bd-4116-8168-1e611f4454ca/content>
- Sabah, N. U., Tahir, M. A., Sarwar, G., Luqman, M., Aziz, A., Manzoor, M. Z., & Aftab, M. (2022). Biosolubilization of phosphate rock using organic amendments: an innovative approach for sustainable maize production in Aridisols - A review. *Sarhad Journal of Agriculture*, 38(2), 617–625. <https://dx.doi.org/10.17582/journal.sja/2022/38.2.617.625>
- Septiyana, Husnain, Widowati, L. R., Siregar, A., & Samsun, A. (2021). The use of soil ameliorants and fertilizers to increase the yields of rice and maize in ultisols Lampung, Indonesia. The 1st International Conference on Sustainable Tropical Land Management IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 648 012198.
- Singh, C. P. & Amberger, A. (1991). Solubilization and availability of phosphorus during decomposition of rock phosphate enriched straw and urine. *Biological Agriculture and Horticulture*, 7, 261–269. doi:10.1080/01448765.1991.9754553
- Slameto, & **Rivaie, A. A.** (2017). Keragaan penyuluhan mendukung usahatani padi sawah di wilayah Lampung. *Prosiding Seminar Nasional Pengembangan Teknologi Pertanian*. Politeknik Negeri Lampung, 7 September 2017. ISBN 978-602-70530-6-9. pp. 244–250. DOI: <http://dx.doi.org/10.25181/prosemnas.v0i0.730>
- Slameto, Mawardi, R., & **Rivaie, A. A.** (2019a). Analisis pendapat petani tentang alih fungsi lahan sawah di wilayah Lampung. *Prosiding Seminar Nasional Hasil Penelitian Pertanian 2018*.

Fakultas Pertanian, Universitas Gadjah Mada. ISSN 2442–7314. pp. 395–404.

- Slameto, Mawardi, R., & **Rivaie, A. A.** (2019b). Kebijakan kelembagaan perbenihan mendukung keberlanjutan usahatani padi di Propinsi Lampung. *Prosiding seminar nasional hasil penelitian sosial ekonomi pertanian. Peran sumberdaya dalam pembangunan pertanian berkelanjutan*. Departemen Sosial Ekonomi Pertanian. Fakultas Pertanian Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta 2018. ISSN: 2460–4828. pp. 184–193.
- Smalberger, S. A., Singh, U., Chien, S. H., Henao, J., & Wilkens, P. W. (2006). Development and validation of a phosphate rock decision support system. *Agronomy Journal*, 98(3), 471–483. <https://scihub.se/10.2134/agronj2005.0244>
- Sukarman, Mulyani, A., & Purwanto, S. (2018). Modifikasi metode evaluasi kesesuaian lahan berorientasi perubahan iklim. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 12(1), 1–11. <http://dx.doi.org/10.21082/jsdl.v12n1.2018.1-11>
- Sukarman, Yatno, E., Tafakresnanto, C., Estiningtyas, W., Kasno, A., Dariah, A., Mulyani, A., Hikmat, M., Suratman, Sosiawan, H., Susanti, E., Setiari Marwanto, S., Agus, F., Maswar, Suprihatin, A., Anda, M., **Rivaie, A. A.**, Gani, R. A., Yustika, R. D., Hati, D. P., Pratamaningsih, M. M., Kricella, P., Erwinda, Muslim, R. Q., Barus, P. A., Saidi, B. B., Waas, E. D., & Hatta, M. (2024). Tanah podsolik di Indonesia: karakteristik, potensi, kendala, dan pengelolaannya untuk pertanian (Sukarman, F. Agus, A. Suprihatin, **A. A. Rivaie**, & M. Anda, Eds.). Penerbit PT. Agro Indo Mandiri (AIMPRESS). 240 hal.
- Sulaeman, Y., Nursyamsi, D., Widowati, L. R., Husnain, & Sarwani, M. (2012). Phosphorus and potassium decision support system: bridging soil database and fertilizer application. *Proc. the International Workshop on Soil Information System-oriented Nutrient Management for Major Asian Crops*, 20–21 November,

2012 at Science City of Munoz, Nueva Ecija, Philippines. pp. 65–78.

- Tafakresnanto, C., Kasno, A., Susanti, Z., Karmawati, E., Adi, S. H., Hidayanto, M., Suratman, S., & **Rivaie, A. A.** (2024). Utilizing GIS-based spatial land resource analysis for subsidized fertilizer allocation in Jombang Regency, Indonesia. *Journal of Water and Land Development*, 63, 33–45. DOI: 10.24425/jwld.2024.151788. <https://journals.pan.pl/dlibra/publication/151788/edition/133149/content>
- Toha, H. M. (2007). Peningkatan produktivitas padi gogo melalui penerapan pengelolaan tanaman terpadu dengan introduksi varietas unggul. *Penelitian Pertanian Tanaman Pangan*, 26(3), 180–187.
- Van Kauwenbergh, S. J., Stewart, M., & Mikkelsen, R. (2013). World reserves of phosphate rock: A dynamic and unfolding story. *Better Crops*, 97(3), 18–20.
- Wahid, **Rivaie, A. A.**, & Maryam, N. (2013). Adaptasi varietas unggul baru padi sawah Seram Timur mendukung ketahanan pangan wilayah. *Agros*, 15(1), 160–165.
- Wahid, & **Rivaie, A. A.** (2014). Pertumbuhan dan produksi jagung (*Zea mays* L) yang diinokulasi VA Mikoriza pada tumpangsari dengan kacang tanah (*Arachis hypogaeae* L.). *Prosiding Seminar Regional Wilayah Sumatera. Pengembangan Teknologi Spesifik Lokasi Melalui Pemanfaatan Sumberdaya Lokal Menuju Pertanian Ramah Lingkungan*. Banda Aceh, 2–3 September 2014. ISBN 978-602-17249-1-0. pp. 31–40.
- Widiarta, I. N., Kiswanto, & **Rivaie, A. A.** (2020). Major rice pest development after increasing rice planting index and acceleration of planting time in Lampung Province. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 457 012064. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/457/1/012064>

- Yafizham. (2009). Respon tiga varietas kedelai terhadap aplikasi pupuk organik cair di tanah Ultisol. *Prosiding Semirata BKS PTN Wilayah Barat Bidang Ilmu Pertanian*, Serang Banten 13–16 April 2009. Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. ISBN 978-979-19929-0-9.
- Yusnaini, S., Niswati, A., Aini, S. N., Arif, M. A. S., Dewi, R. P., & **Rivaie, A. A.** (2021). Changes in soil respiration after application of in situ soil amendment and phosphate fertilizer under soybean cultivation at Ultisol South Lampung, Indonesia. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 724 012002. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/724/1/012002>
- Yusnaini, S., Aditya, D., Sekaringtyas, W., Novpriansyah, H., Dermiyati, & **Rivaie, A. A.** (2024). Effect of premium compost on soil carbon microbial biomass in pineapple plants on marginal land Central Lampung. *Journal of Tropical Soils*, 29(3), 135–141. DOI: 10.5400/jts.2024.v29i3.135–141. <https://journal.unila.ac.id/index.php/tropicalsoil/article/view/626>
- Zaynitdin, A. M. (2022). Study of the solubility of fertilizers obtained from low-grade phosphorites by heat treatment. *Novateur Publications*, 8(3), 58–63. <https://media.neliti.com/media/publications/437038-none-229f9025.pdf>
- Zoysa, A. K. N, Loganathan, P., & Hedley, M. J. (1998). Phosphate rock dissolution and transformation in the rhizosphere of tea (*Camellia sinensis* L.) compared with other plant species. *European Journal of Soil Science*, 49(3), 477–486. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.1998.4930477.x>

DAFTAR PUBLIKASI ILMIAH

Buku

1. Mahmud, Z., **Rivaie, A. A.**, & Allorerung, D. (2006). Petunjuk teknis budidaya jarak pagar (*Jatropha curcas* L.). Edisi-2. Pusat Penelitian dan Pengembangan Perkebunan, Badan Litbang Pertanian. Jakarta. ISBN 979-8451-32-5. 35 hal.
2. **Rivaie, A. A.**, Sarwani, M., Jamal E., Medionovianto, R. D., & Hendayana, R. (2008). Fasilitasi riset aksi (*Action Research Facility*). Wadah percobaan partisipatif petani. Balai Besar Pengkajian dan Pengembangan Teknologi Pertanian. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. ISBN 978-979-1415-21-7. 30 hal.
3. Ikrarwati, **Rivaie, A. A.**, Sastro, Y., Herawaty, E., Rokhmah, N. A., Maharani, W. S., Ramdhan, T., Astuti, D., Nurdin, A., Heriswanto, K., & Savitri, S. (2019). Ragam kekayaan sumber daya genetik DKI Jakarta: Deskripsi tanaman koleksi Kebun Bibit Wisata Agro Cibubur. Balai Pengkajian Teknologi Pertanian (BPTP) Jakarta. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. ISBN: 978-979-3628-50-9. 101 hal.
4. Sukarman, Yatno, E., Tafakresnanto, C., Estiningtyas, W., Kasno, A., Dariah, A., Mulyani, A., Hikmat, M., Suratman, Sosiawan, H., Susanti, E., Setiari Marwanto, S., Agus, F., Maswar, Suprihatin, A., Anda, M., **Rivaie, A. A.**, Gani, R. A., Yustika, R. D., Hati, D. P., Pratamaningsih, M. M., Kricella, P., Erwinda, Muslim, R. Q., Barus, P. A., Saidi, B. B., Waas, E. D., & Hatta, M. (2024). Tanah podsolik di Indonesia: karakteristik, potensi, kendala, dan pengelolaannya untuk pertanian (Sukarman, F. Agus, A. Suprihatin, **A. A. Rivaie**, & M. Anda, Eds.). Penerbit PT. Agro Indo Mandiri (AIMPRESS). 240 hal.

Bagian dari Buku

5. Alfons, J. B., Hutuely, L., **Rivaie, A. A.**, Procula, R. M., Sirappa, M., Pasireron, M., & Sutrisno, N. (2012). Membangun pulau mandiri pangan mendukung ketahanan pangan di Maluku. Membangun Kemampuan Inovasi Berbasis Potensi Wilayah. Penerbit IAARD Press. ISBN 978-602-9462-44-9.
6. **Rivaie, A. A. (2013)**. Potensi penyediaan pangan dan konservasi lahan pulau-pulau kecil di Maluku: peran agroforestri berbasis aren. Membangun Kemandirian Pangan Pulau-pulau Kecil dan Wilayah Perbatasan. Penerbit IAARD Press. ISBN 978-602-1520-41-3.
7. **Rivaie, A. A.**, & Pasandaran, E. (2014). Dukungan teknologi dan kelembagaan untuk memperkuat daya saing komoditi lada. Dalam: Haryono, Pasandaran, E., Suradisastra, K., Ariani, M., Sutrisno, S., Yufdi, M. P., & Hendriadi, A., editor. Memperkuat Daya Saing Produk Pertanian. ISBN 978-602-344-017-7. IAARD Press. pp. 341-359.
8. **Rivaie, A. A.**, & Pasandaran, E. (2015). Peran BPTP dalam penelitian berwawasan ekoregion. Dalam: Pasandaran, E., Nursyamsi, D., Suradisastra, K., Mardianto, S., & Haryono, editor. Pembangunan Pertanian Berbasis Ekoregion. Penerbit IAARD Press. ISBN 978-602-9462-44-9. pp. 263-277.
9. **Rivaie, A. A.**, Silalahi, M., & Pasandaran, E. (2016). Peluang perluasan areal pertanian pangan di Provinsi Lampung. Dalam: Pasandaran, E., Heriawan, R., & Syakir, M., editor. Sumber Daya Lahan dan Air: Prospek Pengembangan dan Pengelolaan. Jakarta. ISBN 978-602-344-157-0 IAARD Press. pp. 320-343.
10. **Rivaie, A. A.**, Kiswanto, & Pasandaran, E. (2017). Inovasi pola tanam relay-intercropping jagung ubikayu di Lampung mengantisipasi dampak kekeringan. Dalam: Pasandaran, E., Syakir, M., Heriawan, R., & Yufdy, M. P., editor. Memperkuat

Kemampuan Wilayah Menghadapi Perubahan Iklim. IAARD Press. ISBN 978-602-344-199-0. pp. 305-337.

11. Pujiharti, Y., & **Rivaie, A. A.** (2018). Dinamika lada rakyat dan upaya meningkatkan kesejahteraan petani. Dalam: Pasandaran, E., Syakir, M., & Yufdy, M. P., editor. Sinergi Inovasi Memperkuat Pertanian Rakyat Berbasis Tanaman Perkebunan dan Rempah-rempah. ISBN 978-602-344-240-9. IAARD Press. pp. 431-460.

Jurnal Internasional

12. **Rivaie, A. A.**, Loganathan, P., Graham, J. D., Tillman, R. W., Payn, T. W. (2008). Effect of phosphate rock and triple superphosphate on soil phosphorus fractions and their plant-availability and downward movement in two volcanic ash soils under *Pinus radiata* plantations in New Zealand. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 82, 75-88.
13. **Rivaie, A. A.** & Tillman, R. W. (2009). Growth response of second-rotation *Pinus radiata* on an Orthic Allophanic soil to P fertilizer and weed control. *Taiwan Journal of Forest Science*, 24(4), 243-256.
14. **Rivaie, A. A.**, & Tillman, R. W. (2009). Rhizosphere pH and phosphatase activity in orthic allophanic soil under *Pinus radiata* seedlings grown with broom and ryegrass. *Journal of Forestry Research*, 6(1), 37-52.
15. **Rivaie, A. A.**, & Tillman, R. W. (2009). Phosphorus fractions of fertiliser-derived P in an allophanic soil under *Pinus radiata* seedlings grown with broom and ryegrass. *Journal of Forestry Research*, 20, 229-236.
16. **Rivaie, A. A.**, & Tillman, R. W. (2010). Phosphorus fertilizer induced changes in the soil available P, the P nutrition and the growth of *Pinus radiata* seedlings grown in association with understory. *Journal of Forestry Research*, 21(2), 129-136.

17. **Rivaie, A. A., & Loganathan, P.** (2010). Phosphorus fertiliser source and weed control effects on growth of three-year-old second-rotation *Pinus radiata* on Orthic Pumice soil. *Southern Forests*, 72(2), 74–80.
18. **Rivaie, A. A.** (2011). Growth response of broom (*Cytisus scoparius*) growing with and without radiata pine (*Pinus radiata*) seedlings to different P levels in soils. *Journal of Forestry Research*, 22(4), 597–602.
19. **Rivaie, A. A., Isnaini, S.** (2013). Influence of flooding levels on changes in C, N and weight of rice straw in a paddy soil. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*, 3(5), 80–85.
20. Dahamarudin, L., & **Rivaie, A. A.** (2013). Germination capacity, growth and yield of three upland rice varieties increased following seed invigoration treatments. *International Research Journal of Agricultural Science and Soil Science*, 3(2), 43–50.
21. Rubiyo, & **Rivaie, A. A.** (2013). Diallel analysis of cocoa (*Theobroma cacao* L.) resistance to *Phytophthora palmivora* in Indonesia. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*, 3(3), 73–86.
22. **Rivaie, A. A.** (2014). Influence of SP-36 and phosphate rock on changes in soil available P, leaf P content, and growth of Physic Nut (*Jatropha curcas* L.) in an Ultisol. *Journal of Tropical Soils*, 19(1), 9–15.
23. **Rivaie, A. A.** (2014). The effects of understory vegetation on P availability in *Pinus radiata* forest stands: A review. *Journal of Forestry Research*, 25(3), 489–500.
24. **Rivaie, A. A.** (2015). Changes in soil available phosphorus, leaf phosphorus content and yield of sword bean (*Canavalia ensiformis* (L.) DC.) by application of SP-36 and phosphate rock on acid upland soil of East Lampung. *Journal of Tropical Soils*, 20(1), 29–36.

25. **Rivaie, A. A.** (2016). Plant interference and trial designs to study it in a glasshouse: a review. *Journal of Forestry Research*, 27, 231–237.
26. Heryani, N., Kartiwa, B., Sosiawan, H., Rejekiningrum, P., Adi, S. H., Apriyana, Y., Pramudia, A., Yufdy, M. P., Tafakresnanto, C., **Rivaie, A. A.**, Suratman, Dariah, A., Malik, A., Yusuf, & Setiani, C. (2022). Analysis of climate change impacts on agricultural water availability in Cimanuk Watershed, Indonesia. *Sustainability (Switzerland)*, 14(23), 16236.
27. Isnaini, S., Maryati, & **Rivaie, A. A.** (2023). Comparison of potassium quantity-intensity relationships in tropical paddy soil under tillage and no-tillage systems after fifteen growing seasons. *Plant, Soil and Environment*, 69(1), 1–9.
28. Kasno, A., **Rivaie, A. A.**, Tafakresnanto, C., Pratiwi, E., Karmawati, E., Siregar, A. F., Hatta, M., Sutriadi, M. T. (2024). Nitrogen dynamic and precise management to predict corn yield in tropical upland acid soils. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 10(4), 1843–1858.
29. Pratiwi, E., Lestari, P., Nugraha, Y., Hartatik, W., Susanti, Z., Subiksa, I. G. M., Kasno, A., Adrian, T. A., Fatma, Y. S., Nababan, A. F., & **Rivaie, A. A.** (2024). Application of indigenous zinc-solubilizing bacteria in biofertilizers to enhance zinc nutrition of rice grains in inceptisols paddy fields. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 10(4), 1775–1790.
30. Tafakresnanto, C., Kasno, A., Susanti, Z., Karmawati, E., Adi, S. H., Hidayanto, M., Suratman, S., & **Rivaie, A. A.** (2024). Utilizing GIS-based spatial land resource analysis for subsidized fertilizer allocation in Jombang Regency, Indonesia. *Journal of Water and Land Development*, 63, 33–45.
31. Yusnaini, S., Aditya, D., Sekaringtyas, W., Novpriansyah, H., Dermiyati, & **Rivaie, A. A.** (2024). Effect of premium compost

on soil carbon microbial biomass in pineapple plants on marginal land Central Lampung. *Journal of Tropical Soils*, 29(3), 135–141.

Jurnal Nasional

32. **Rivaie, A. A.**, Suratman, & Hobir. (1991). Pengaruh pupuk daun terhadap bibit kenanga (*Canangium odoratum*). *Buletin Tanaman Industri*, 2, 20–24.
33. **Rivaie, A. A.**, Asnawi, R. (1993). Pengaruh pengapuran dan pupuk fosfat terhadap sifat-sifat kimia tanah dan pertumbuhan vanili. *Buletin Ilmiah INSTIPER*, 4(1), 1–13.
34. **Rivaie, A. A.**, Kendriyanto, & Wahyuni, S. (1993). Pengaruh pupuk daun dan zat pengatur tumbuh terhadap nilam (*Pogostemon cablin*). *Buletin Tanaman Industri*, 5, 44–48.
35. **Rivaie, A. A.**, & Karmawati, E. (1993). Pengaruh beberapa pola tanam terhadap produksi kelapa dan padi gogo. *Buletin Tanaman Industri*, 6, 31–38.
36. **Rivaie, A. A.**, Karmawati, E., & Rusli. (2008). Posisi contoh daun untuk analisis status fosfor (P) pada bibit jarak pagar (*Jatropha curcas* L.) dan kadar P tersedia pada daerah perakarannya. *Jurnal Litro*, 14(4), 125–130.
37. Alfons, J. B., & **Rivaie, A. A.** (2011). Sagu mendukung ketahanan pangan dalam menghadapi dampak perubahan iklim. *Jurnal Perspektif*, 10(2), 81–91.
38. Wahid, **Rivaie, A. A.**, & Maryam, N. (2013). Adaptasi varietas unggul baru padi sawah Seram Timur mendukung ketahanan pangan wilayah. *Agros*, 15(1), 160–165.
39. **Rivaie, A. A.**, Isnaini, S., & Maryati. (2013). Application of *Azolla pinnata* enhanced soil available P and rice yield. *Jurnal Tanah dan Iklim. Edisi Khusus Rawa*, 13–16.

40. **Rivaie, A. A.** (2014). Kadar fosfor daun jarak pagar (*Jatropha curcas* L.) dan korelasinya dengan fosfor tanah tersedia dari beberapa metode ekstraksi. *Jurnal Littri*, 20(3), 151–157.
41. **Rivaie, A. A.** (2014). Integrasi Lasa (lada dan sapi) (model usahatani alternatif ramah lingkungan pasca tambang timah di Kepulauan Bangka Belitung). *Agros*, 16(1), 109–123.
42. **Rivaie, A. A.** (2015). Potensi penyediaan pangan dan konservasi lahan pulau-pulau kecil di Maluku: Peran agroforestri berbasis aren. *Jurnal Litbang Pertanian*, 21(1), 173–193.
43. Ansyor, A., Hidayat, Z., & **Rivaie, A. A.** (2019). Pengaruh socio-demographic terhadap sikap petani dan penyuluh dalam aktivitas bioindustri di Provinsi Kepulauan Bangka Belitung. *Buletin Pengkajian Pertanian Spesifik Lokasi*, 1(1), 11–20.
44. Asnawi, R., **Rivaie, A. A.**, Wibawa, W., Arief, R. W., Adriyani, F. Y., Slameto, & Jannah, E. M. (2020). Pengaruh pengelolaan faktor internal usahatani terhadap produksi kopi di Provinsi Lampung. *Jurnal Wacana Pertanian*, 16(1), 1–9.

Prosiding International

45. Endriani, Diptaningsari, D., Meithasari, D., & **Rivaie, A. A.** (2018). Optimization of productivity of three soybean varieties through fertilization in dryland acid soils in South Lampung. *Proceeding of international workshop and seminar. Innovation of Environmental-Friendly Agricultural Technology Supporting Sustainable Food Self-Sufficiency*. Surakarta, September 18th–20th, ISBN 978–602–344–252–2. pp. 648–658.
46. Widiarta, I. N., Kiswanto, & **Rivaie, A. A.** (2020). Major rice pest development after increasing rice planting index and acceleration of planting time in Lampung Province. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, The 3rd International Conference on Biosciences*, 8 August 2019, IPB International

Convention Centre, Bogor, Indonesia. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 457 012064.

47. Diptaningsari, D., & **Rivaie, A. A.** (2021). Comparison study of growth and yield of three soybean varieties on acid upland soil of South Lampung. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 648(1): 012066.
48. Endriani, **Rivaie, A. A.**, Barus, J., Meithasari, D., & Asnawi, R. (2021). Improving the quality of acid soils to increase soybean yields and farmer's incomes. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 648(1), 012059.
49. Niswati, A., Fajrianto, A. D., Hidayat, K. F., Yusnaini, S., & **Rivaie, A. A.** (2021). Changes in soil phosphorus availability and nutrient uptake by maize following the application of wastewater-acidulated phosphate rock. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 724(1), 012016.
50. Wardani, N., Meidaliantisyah, Hendra, J., & **Rivaie, A. A.** (2021). Improvement of robusta coffee performance with conservation and fertilizer treatment in Air Naningan District, Tanggamus Regency, Lampung. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 648(1), 012040.
51. Yusnaini, S., Niswati, A., Aini, S. N., Arif, M. A. S, Dewi, R. P., & **Rivaie, A. A.** (2021). Changes in soil respiration after application of in situ soil amendment and phosphate fertilizer under soybean cultivation at Ultisol South Lampung, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 724(1), 012002.
52. Pratiwi, E., Ilmi, N. S., **Rivaie, A. A.**, Adriany, T.A., & Nababan, A.F. (2023). Enhancing zinc uptake and grain yield of Ciherang and Inpari IR Nutri Zinc rice varieties using Zn-solubilizing bacteria. *E3S Web of Conferences* 467, 01025.

Prosiding Nasional

53. Darwis, S. N., & **Rivaie, A. A.** (1993). Teknologi budidaya tanaman industri pada lahan alang-alang. Dalam: Sukmana, S., Suwardjo, J., Adiningsih, S., Subagjo, H., Suhardjo, H., & Prawirasumantri, Y., editor. Pemanfaatan lahan alang-alang untuk usahatani berkelanjutan. *Prosiding Seminar Lahan Alang-alang*, Bogor 1 Desember 1992. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor. Badan Litbang Pertanian. pp. 125–135.
54. **Rivaie, A. A.**, Taher, S., & Karmawati, E. (1993). Prospek pengembangan budidaya tanaman industri dengan pengolahan tanah konservasi. *Prosiding Seminar Nasional IV Konservasi Tanah*. Universitas Lampung 4–5 Mei 1993. Bandar Lampung. pp. 156–163.
55. **Rivaie, A. A.**, & Karmawati, E. (1995). Pengaruh tanaman sela terhadap status hara daun kelapa di tanah podsolik Lampung. *Prosiding Seminar Hasil-hasil Penelitian Tanaman Industri selama 1991–1995*. Pusat Penelitian Tanaman Industri 20–23 Maret 1995. Bogor. pp. 182–187.
56. **Rivaie, A. A.**, & Sudiarto. (1995). Serapan unsur hara makro oleh tanaman Adas (*Foeniculum vulgare* Mill.). *Prosiding Seminar Nasional VIII Tanaman Obat Indonesia*. Universitas Indonesia, Jakarta 16–17 Maret 1995.
57. **Rivaie, A. A.**, & Suryadi, R. (1996). Serapan hara N, P, dan K oleh tanaman lempuyang (*Zingiber zerumbet* S.) pada tanah Latosol, Podsolik, dan Andosol. *Prosiding Seminar Nasional IX Tanaman Obat Indonesia*. Universitas Pancasila, Jakarta 27–28 Maret 1995.
58. Allorerung, D., Mahmud, Z., **Rivaie, A. A.**, Effendi, D. S., Mulyani, A. (2006). Peta kesesuaian lahan dan iklim jarak pagar (*Jatropha curcas* L.). Makalah pada Lokakarya Status Teknologi Budidaya Jarak Pagar. Jakarta. pp. 11–12.

59. Mahmud, Z., **Rivaie, A.A.**, & Allorerung, D. (2006). Kultur teknis jarak pagar (*Jatropha curcas* L.). Makalah pada Lokakarya Status Teknologi Budidaya Jarak Pagar (*Jatropha curcas* L.). Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Jakarta, 11–12 April 2006.
60. **Rivaie, A. A.**, Allorerung, D., Z. Mahmud, Z., Effendi, D. S. Sumanto, & Isa, F. (2006). Karakteristik fisik lingkungan daerah pertanaman jarak pagar (*Jatropha curcas* L.) di Cikeusik, Banten. Makalah disampaikan pada Lokakarya II Status Teknologi Tanaman Jarak Pagar. Hotel Pangrango, Bogor, 29 November 2006.
61. **Rivaie, A. A.** (2011). Potensi strategis hotong (*Setaria italica* (L) Beauv.) sebagai komponen ketahanan pangan di Maluku menghadapi dampak perubahan iklim. *Prosiding Seminar Nasional Inovasi Teknologi Pertanian Spesifik Lokasi. Percepatan Transfer Inovasi Teknologi Spesifik Lokasi untuk Pemberdayaan Petani Mendukung Ketahanan Pangan Nasional*. Bogor, 19–20 Nopember 2011. Buku 1. Penerbit Balai Besar Pengkajian dan Pengembangan Teknologi Pertanian. ISBN: 978–979–1415–74–3.
62. Mahu, H., & **Rivaie, A. A.** (2011). Persepsi masyarakat terhadap pemanfaatan ulat sagu di Maluku. *Prosiding Seminar Nasional Inovasi Teknologi Pertanian Spesifik Lokasi. Percepatan Transfer Inovasi Teknologi Spesifik Lokasi untuk Pemberdayaan Petani Mendukung Ketahanan Pangan Nasional*. Bogor, 19–20 Nopember 2011. Buku 3. Penerbit Balai Besar Pengkajian dan Pengembangan Teknologi Pertanian. ISBN: 978–979–1415–74–3.
63. Alfons, J. B., & **Rivaie, A. A.** (2012). Studi keragaman plasma nutfah ubi minor (*Dioscorea* spp.) di Maluku. *Prosiding Seminar dan Kongres Nasional Sumber Daya Genetik (SDG). Pelestarian dan Pemanfaatan Sumberdaya Genetik Secara Berkelanjutan untuk Meningkatkan Kesejahteraan Masyarakat*. Medan

12–14 Desember 2012. Penerbit Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Bioteknologi dan Sumberdaya Genetik Pertanian. ISBN: 0123456789.

64. Alfons, J. B., & **Rivaie, A. A.** (2012). Kajian keragaman plasma nutfah keladi (*Xanthosoma* spp. & *Colocasia* spp.) di beberapa Kabupaten di Provinsi Maluku. *Prosiding Seminar dan Kongres Nasional Sumber Daya Genetik (SDG). Pelestarian dan Pemanfaatan Sumberdaya Genetik Secara Berkelanjutan Untuk Meningkatkan Kesejahteraan Masyarakat*. Medan 12–14 2012. Penerbit Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Bioteknologi dan Sumberdaya Genetik Pertanian. ISBN: 0123456789.
65. Mahu, H., & **Rivaie, A. A.** (2012). Kajian potensi dan budidaya ulat sagu (*Rhynchophorus ferrugineus*) di sentra produksi Provinsi Maluku. *Prosiding Seminar Nasional Inovasi Pertanian Lahan Kering. Percepatan Penciptaan dan Penyebarluasan Inovasi Pertanian Lahan Kering Beriklim Kering Dalam Menghadapi Perubahan Iklim*. Kupang, 4–5 September 2012. Buku 1. Penerbit Balai Besar Pengkajian dan Pengembangan Teknologi Pertanian. ISBN: 978–979–1415–87–3.
66. **Rivaie, A. A.** (2012). Strategi pengembangan sagu (*Metroxylon* spp.) sebagai komponen ketahanan pangan di lahan kering Provinsi Maluku menghadapi dampak perubahan iklim. *Prosiding Seminar Nasional Inovasi Pertanian Lahan Kering. Percepatan Penciptaan dan Penyebarluasan Inovasi Pertanian Lahan Kering Beriklim Kering Dalam Menghadapi Perubahan Iklim*. Kupang, 4–5 September 2012. Buku 2. Penerbit Balai Besar Pengkajian dan Pengembangan Teknologi Pertanian. ISBN: 978–979–1415–87–3.
67. **Rivaie, A. A.** (2012). Potensi dan pengembangan aren (*Arenga pinnata* Merr.) sebagai komponen ketahanan pangan dan konservasi lahan berlereng di Maluku. *Prosiding Seminar Nasional Aren. Aren Untuk Pangan dan Alternatif Energi Terbarukan*. Balikpapan, 26–27 September 2012. Penerbit Pusat

Penelitian dan Pengembangan Perkebunan. ISBN: 978-979-8451-84-3.

68. Bansi, H., **Rivaie, A. A.**, & Matitaputy, P. R. (2013). Potensi lamtoro merah (*Acacia villosa*) sebagai sumber protein dan pakan antimetanogenik ramah lingkungan untuk ternak ruminansia. *Prosiding Ekspose dan Seminar Nasional Inovasi Pertanian Ramah Lingkungan. Akselerasi Inovasi Pertanian Ramah Lingkungan*. Makassar, 19–21 Juni 2013. Penerbit Balai Besar Pengkajian dan Pengembangan Teknologi Pertanian. ISBN: 978-979-96759-7-2.
69. **Rivaie, A. A.** (2013). Pentingnya sagu (*Metroxylon spp.*) dalam mendukung diversifikasi pangan menghadapi dampak perubahan iklim di Maluku. *Prosiding Seminar Nasional Akselerasi Pemanfaatan Teknologi Pertanian Spesifik Lokasi Mendukung Ketahanan Pangan dan Kesejahteraan Petani Nelayan*. Jayapura, 13 Juni 2013. Penerbit Balai Besar Pengkajian dan Pengembangan Teknologi Pertanian. ISBN 978-979-99881-6-4.
70. **Rivaie, A. A.**, & Nurhayati. (2013). Keragaan pertumbuhan dan hasil beberapa galur dan varietas kacang tanah di lahan kering Maluku Tengah. *Prosiding Seminar Nasional Akselerasi Pemanfaatan Teknologi Pertanian Spesifik Lokasi Mendukung Ketahanan Pangan dan Kesejahteraan Petani Nelayan*. Jayapura, 13 Juni 2013. Penerbit Balai Besar Pengkajian dan Pengembangan Teknologi Pertanian. ISBN 978-979-99881-6-4.
71. **Rivaie, A. A.** (2013). Kajian respon pertumbuhan dan hasil rimpang lempuyang gajah (*Zingiber zerumbet S.*) pada beberapa jenis tanah dan pupuk kandang. *Prosiding Ekspose dan Seminar Nasional Inovasi Pertanian Ramah Lingkungan. Akselerasi Inovasi Pertanian Ramah Lingkungan*. Makassar, 19–21 Juni 2013. Penerbit Balai Besar Pengkajian dan Pengembangan Teknologi Pertanian. ISBN: 978-979-96759-7-2.
72. **Rivaie, A. A.** (2013). Peranan tanaman koro pedang (*Canavalia sp.*) mendukung ketahanan pangan dan perbaikan kesuburan

tanah bekas tambang timah di Kepulauan Bangka Belitung. Prosiding Seminar Nasional Inovasi Teknologi Pertanian Ramah Lingkungan Spesifik Lokasi Mendukung Pembangunan Pertanian Berkelanjutan. Bengkulu, 9 Desember 2013. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian Kementerian Pertanian. ISBN: 978-602-9064-11-7. pp. 354-361.

73. **Rivaie, A. A.**, Yolanda, K., Ansyor, A., Rinawati, D. Y., Feriadi, & Muzammil. (2013). Potensi ketahanan pangan dan kekuatan ekonomi pulau kecil Bangka Belitung: Budidaya lada terpadu berbasis lingkungan. Membangun Kemandirian Pangan Pulau-pulau Kecil dan Wilayah Perbatasan. Penerbit IAARD Press. ISBN 978-602-1520-41-3.
74. Ansyor, A., & **Rivaie, A. A.** (2014). Efektivitas penggunaan media penyuluhan dalam pemanfaatan lahan pekarangan di Kabupaten Belitung Timur Provinsi Kepulauan Bangka Belitung. *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Inovasi Teknologi Pertanian Mendukung Percepatan Pembangunan Provinsi Lampung*. Bandar Lampung, 23 Oktober 2014. Buku 2. Penerbit Balai Pengkajian Teknologi Pertanian (BPTP) Lampung Kerjasama dengan Bakorluh Lampung, Balai Veteriner Lampung, Universitas Lampung, Politeknik Negeri Lampung. ISBN 978-979-3263-42-7 (no.jil.lengkap); ISBN 978-979-3263-43-4 (jil.1); ISBN 978-979-3263-44-1 (jil.2).
75. **Rivaie, A. A.** (2014). Prospek pengembangan budidaya koro pedang (*Canavalia* sp.) mendukung kecukupan pangan dan gizi serta kesuburan tanah di Kepulauan Maluku. *Prosiding Seminar Regional Agroinovasi Sumberdaya Lokal Ramah Lingkungan untuk Wilayah Sumatera*. Banda Aceh, 2-3 September 2014. Penerbit Balai Pengkajian Teknologi Pertanian. ISBN 978-602-17249-1-0.
76. **Rivaie, A. A.**, & Suwardih. (2014). Potensi pengembangan model pertanian bio-industri berbasis kelapa sawit, sapi dan serai wangi di Kepulauan Bangka Belitung: Suatu gagasan. *Prosiding Seminar*

Nasional Sains dan Inovasi Teknologi Pertanian Mendukung Percepatan Pembangunan Provinsi Lampung. Bandar Lampung, 23 Oktober 2014. Buku 1. Penerbit Balai Pengkajian Teknologi Pertanian (BPTP) Lampung Kerjasama dengan Bakorluh Lampung, Balai Veteriner Lampung, Universitas Lampung, Politeknik Negeri Lampung. ISBN 978-979-3263-43-4.

77. **Rivaie, A. A.**, Silalahi, M., Wijayanto, B., Kiswanto & Hendra, J. (2016). Peran penelitian pertanian dalam mendukung pengembangan teknologi pertanian berbasis sumber daya lokal. *Prosiding Seminar Nasional Pengembangan Teknologi Pertanian*. Politeknik Negeri Lampung, 8 September 2016. ISBN 978-602-70530-4-5.
78. Slameto, & **Rivaie, A. A.** (2017). Keragaan penyuluhan mendukung usahatani padi sawah di wilayah Lampung. *Prosiding Seminar Nasional Pengembangan Teknologi Pertanian*. Politeknik Negeri Lampung, 07 September 2017. ISBN 978-602-70530-6-9. pp. 244-250.
79. Arief, R. W., **Rivaie, A. A.**, & Asnawi, R. (2019). Analisis rendemen dan harga titik impas sirup glukosa dari beberapa varietas ubikayu. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Pascapanen 2019. Peranan Teknologi Pascapanen Menuju Industri 4.0*. Asosiasi Teknologi Pascapanen Indonesia. Bogor, 19 Januari 2019. pp. 58-65.
80. Slameto, Mawardi, R., & **Rivaie, A. A.** (2019). Analisis pendapat petani tentang alih fungsi lahan sawah di wilayah Lampung. *Prosiding Seminar Nasional Hasil Penelitian Pertanian 2018*. Fakultas Pertanian, Universitas Gadjah Mada. ISSN 2442-7314. pp. 395-404.
81. Slameto, Mawardi, R., & **Rivaie, A. A.** (2019). Kebijakan kelembagaan perbenihan mendukung keberlanjutan usahatani padi di Propinsi Lampung. *Prosiding seminar nasional hasil penelitian sosial ekonomi pertanian. Peran Sumberdaya dalam Pembangunan Pertanian Berkelanjutan*. Departemen Sosial

Ekonomi Pertanian. Fakultas Pertanian Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta 2018. ISSN: 2460–4828. pp. 184–193.

Paten

82. Formula dan proses pembuatan pupuk hayati majemuk berbentuk cair berbahan aktif konsorsium bakteri pelarut zinc. Terdaftar No. P00202415249
83. Formula pupuk hayati berbahan aktif bakteri pelarut zinc dan proses pembuatannya. Terdaftar No. P00202315010

Lisensi

84. Program Komputer. Aplikasi Web Monitoring Fase Pertumbuhan Padi Di Dataran Rendah Dengan Menggunakan Platform Google Earth Engine (FusionGEE - Rice Standing Crop) Versi 1.0. No. 000239646
85. Buku. Judul: Tanah Podsolik di Indonesia: Karakteristik, Potensi, Kendala, dan Pengelolaannya untuk Pertanian. No. 000911679

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

Data Pribadi

Nama	: Dr. Ir. A. Arivin Rivaie, M.Sc.
Tempat, Tanggal Lahir	: Tanjung Karang, 21 Januari 1964
Anak ke	: 5 dari 6 bersaudara
Jenis Kelamin	: Laki-laki
Nama Ayah Kandung	: H. Abdul Rachman Rifaie (Alm)
Nama Ibu Kandung	: Hj. Ratna Suriyati (Almh)
Nama Istri	: Sri Imawati, S.E.
Jumlah Anak	: 2 (dua)
Nama Anak	: 1. Arvina Utami, S.E. 2. A. Arvanza Rivaie, S.Si.
Nama Instansi	: Pusat Riset Tanaman Pangan, Organisasi Riset Pertanian dan Pangan, BRIN
Judul Orasi	: Akselerasi Inovasi Teknologi Fosfo-Kompos dalam Meningkatkan Produktivitas Lahan Kering Masam Mendukung Ketahanan Pangan Berkelanjutan
Ilmu	: Pertanian
Bidang	: Ilmu Tanah (<i>soil science</i>)
Kepakaran	: Kesuburan Tanah dan Nutrisi Tanaman

No. SK Pangkat : Nomor 26/K Tahun 2023, tanggal
Terakhir 8 November 2023

No. SK Peneliti Ahli : Nomor 33/M Tahun 2022, tanggal 23
Utama Agustus 2022

B. Pendidikan Formal

No.	Jenjang	Nama Sekolah/ PT/ Universitas	Tempat/Kota/ Negara	Tahun Lulus
1.	SD	Negeri 24	Tanjung Karang	1975
2.	SMP	Negeri 2	Bandar Lampung	1979
3.	SMA	Negeri 2	Bandar Lampung	1982
4.	S1	UNILA	Lampung	1987
5.	S2	Ghent University	Belgia	1998
6.	S3	Massey University	New Zealand	2005

C. Pendidikan Nonformal

No.	Nama Pelatihan/Pendidikan	Tempat/Kota/ Negara	Tahun
1.	Refresher Course in Soil Science & Physical Land Resources	Ghent	2006
2.	A training workshop in Financial and Economic Research Methods for Agricultural Research Managers	Manila	2007
3.	Communicating Science	Makassar	2007
4.	Technology Transfer for Sustainable Agriculture	Bogor	2011

No.	Nama Pelatihan/Pendidikan	Tempat/Kota/ Negara	Tahun
5.	Diklat Pelatihan Kepemimpinan Tingkat III	Bogor	2011
6.	A training in Management Development Program	Melbourne	2012

D. Jabatan Struktural

No.	Jabatan/Pekerjaan	Nama Instansi	Tahun
1.	Ka Seksi Kerjasama BBP2TP	Departemen Pertanian	2007–2010
2.	Ka BPTP Maluku	Kementerian Pertanian (Kementan)	2011–2013
3.	Ka BPTP Kep. Babel	Kementan	2013–2014
4.	Ka BPTP Lampung	Kementan	2014–2019
5.	Ka BPTP DKI Jakarta	Kementan	2019–2020
6.	Ka Balitklimat	Kementan	2020–2022

E. Jabatan Fungsional

No.	Jenjang Jabatan	TMT Jabatan
1.	Asisten Peneliti Muda	1 Januari 1993 (Kementan)
2.	Ajun Peneliti Muda	1 Desember 1993 (Kementan)
3.	Ajun Peneliti Madya	1 April 1996 (Kementan)
4.	Peneliti Muda	1 Oktober 2005 (Kementan)
5.	Peneliti Madya IV/a	1 Agustus 2008 (Kementan)
6.	Peneliti Madya IV/b	1 Oktober 2012 (Kementan)

7.	Peneliti Utama	1 Maret 2015 (Kementan)
8.	Peneliti Ahli Utama	27 Juli 2021 (Kementan)
		24 Agustus 2022 (BRIN)

F. Penugasan Khusus Nasional/Internasional

No.	Jabatan/Pekerjaan	Pemberi Tugas	Tahun
1.	Seminar of workshop fellowship program, FEALAC's Inter-regional workshop on Clean Fuels and Vehicle Technologies, Bangkok, 28–29 June 2006	DELRI (GoI)	2006
2.	Workshop fellowship program, ASEAN Secretariat, Tech-Summit 2006, New Delhi, 6–7 November 2006, presented the progress of Indonesia in research and development of biofuels (<i>Jatropha curcas</i>)	The ASEAN Secretariat	2006

G. Keikutsertaan dalam Kegiatan Ilmiah

No.	Nama Kegiatan	Peran/Tugas	Penyelenggara (Kota, Negara)	Tahun
-----	---------------	-------------	------------------------------	-------

1.	FEALAC's Inter-regional workshop on Clean Fuels and Vehicle Technologies	Pemakalah	Thailand (Bangkok)	2006
2.	Workshop fellowship for alumni of M.Sc. programmes	Pemakalah	Belgium (Ghent)	2006

H. Keterlibatan dalam Pengelolaan Jurnal Ilmiah

No.	Nama Jurnal	Penerbit	Peran/Tugas	Tahun
1.	Jurnal Agrotek Tropika	FP UNILA	Reviewer	2025
2.	Sains Tanah Journal	FP UNS	Reviewer	2025

I. Karya Tulis Ilmiah

No.	Kualifikasi Penulis	Jumlah
1.	Penulis Tunggal	16
2.	Bersama Penulis Lainnya	65
	Total	81

No.	Kualifikasi Bahasa	Jumlah
1.	Bahasa Indonesia	52
2.	Bahasa Inggris	29
	Total	81

J. Pembinaan Kader Ilmiah

Pejabat Fungsional Peneliti

No.	Nama	Instansi	Peran/Tugas	Tahun
1.	Pembimbing SDM Iptek jenjang fungsional di bawahnya dalam penulisan KTI Jurnal Internasional	BRIN	Pembimbing dan Corresponding Author	2023-sekarang

K. Organisasi Profesi Ilmiah

No.	Jabatan	Nama Organisasi	Tahun
1.	Anggota	Perhimpunan Agronomi Indonesia (PERAGI)	2016–sekarang
2.	Anggota	Himpunan Ilmu Tanah Indonesia (HITI)	2018–sekarang
3.	Anggota	Perhimpunan Periset Indonesia (PPI)	2019–sekarang

L. Tanda Penghargaan

No	Nama Penghargaan	Pemberi Penghargaan	Tahun
1.	Mahasiswa Teladan Tingkat Fakultas Pertanian UNILA 1987	Depdikbud	1987
2.	Wisudawan Terbaik I UNILA Th 1987	Universitas Lampung (UNILA)	1987
3.	Lulusan Terbaik Pertama Latihan Prajabatan TK. III Deptan	Kepala PPMKP Ciawi, Deptan	1991

No	Nama Penghargaan	Pemberi Penghargaan	Tahun
4.	Satyalancana Karya Satya XX Tahun	Presiden RI	2016
5.	Satyalancana Karya Satya XXX Tahun	Presiden RI	2023

Indonesia memiliki potensi lahan kering masam seluas 7,36 juta ha untuk dimanfaatkan sebagai lahan pertanian tanaman pangan. Namun, lahan kering masam memiliki beberapa kendala, seperti pH rendah, fosfor (P) tersedia sangat rendah, dan kadar unsur Al, Fe, Mn yang tinggi sampai meracun.

Orasi ini menawarkan fosfo-kompos sebagai pupuk organik berbasis fosfat alam untuk menjawab kendala pengelolaan lahan masam kering. Pupuk ini dapat meningkatkan produktivitas tanah dan tanaman dengan sangat signifikan, mengurangi biaya pupuk P, dan ramah lingkungan. Tantangan pengembangan fosfo-kompos meliputi terbatasnya sumber fosfat alam dan pengetahuan petani. Dukungan kebijakan, sosialisasi, dan inovasi kelembagaan penting agar teknologi ini mendukung ketahanan pangan secara berkelanjutan.

