

Pangan fungsional Berbasis Ubi Kayu Kaya Beta Karoten

Penulis: Enny Sudarmonowati • N. Sri Hartati
Wahyuni • Hartati • Siti Kurniawati
Ahmad Fathoni • Rikno Harmoko
Editor: Enny Sudarmonowati • N. Sri Hartati

Pangan Fungsional Berbasis
Ubi Kayu
Kaya Beta Karoten

Dilarang memproduksi atau memperbanyak sebagian atau seluruh buku ini dalam bentuk atau cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

© Hak cipta dilindung oleh Undang-Undang Nomor 28 tahun 2014

All Right Reserved

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Pangan Fungsional Berbasis Ubi Kayu Kaya Beta Karoten

Penulis: Enny Sudarmonowati • N. Sri Hartati
Wahyuni • Hartati • Siti Kurniawati
Ahmad Fathoni • Rikno Harmoko
Editor: Enny Sudarmonowati • N. Sri Hartati

LIPI Press

Buku ini tidak diperjualbelikan.

© 2020 Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI)
Pusat Penelitian Bioteknologi

Katalog dalam Terbitan (KDT)
Pangan Fungsional Berbasis Ubi Kayu Kaya Beta Karoten/Enny Sudarmonowati N. dan Sri Hartati (Ed.)-Jakarta: LIPI Press, 2020.

xviii hlm. + 193 hlm.; 14,8 × 21 cm

ISBN 978-602-496-171-8 (cetak)
978-602-496-172-5 (e-book)

1. Ubi kayu
2. Pangan fungsional
3. Beta karoten

641.336 82

Copy editor : M. Sidik Nugraha
Proofreader : Noviasuti Putri Indrasari
Penata isi : Siti Qomariyah, Meita Safitri, dan Dhevi E. I. R. Mahelingga
Desainer sampul : Dhevi E. I. R. Mahelingga

Cetakan pertama : Desember 2020



Diterbitkan oleh:
LIPI Press, anggota Ikapi
Gedung PDDI LIPI, Lantai 6
Jln. Jend. Gatot Subroto 10, Jakarta 12710
Telp.: (021) 573 3465
e-mail: press@mail.lipi.go.id
website: lipipress.lipi.go.id

 LIPI Press
 @lipi_press
 @lipi.press

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Daftar Isi



Daftar Gambar	vii
Daftar Tabel	xi
Pengantar Penerbit.....	xiii
Prakata.....	xv
Kata Pengantar	xvii
BAB I Pemanfaatan Ubi Kayu Kaya Beta Karoten untuk Pangan Fungsional	1
BAB II Beta Karoten, Senyawa Karotenoid Tanaman, dan Variasinya di Ubi Kayu Dibandingkan Umbi Lain.....	15
BAB III Sumber dan Penyediaan Bibit Ubi Kayu Kaya Beta Karoten	39
BAB IV Perbaikan Genetik Ubi Kayu untuk Meningkatkan Kadar Beta Karoten	67
BAB V Bioaktivitas dan Bioaksesibilitas Beta Karoten serta Karotenoid Lain pada Tubuh Manusia	111
Bab VI Stabilitas Kandungan Beta Karoten dan Ragam Pangan Fungsional Berbahan Ubi Kayu dan Umbi Lain.....	123
Bab VII Rekomendasi untuk Implementasi.....	137

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Ucapan Terima Kasih.....	145
Daftar Pustaka.....	149
Daftar Singkatan.....	173
Glosarium.....	175
Indeks.....	183
Biografi Penulis	189

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Daftar Gambar



Gambar 1.1	Kontribusi PDB Industri Makanan dan Minuman terhadap Industri Nonmigas 2017	7
Gambar 1.2	Peta Pengembangan Penelitian Ubi Kayu Kaya Nutrisi	12
Gambar 1.3	Konsep Pengembangan Ubi Kayu Kaya Beta Karoten sebagai Pangan Fungsional	13
Gambar 2.1	Jenis Plastid dan Struktur Penyimpanan Terkait Akumulasi Karotenoid.....	19
Gambar 2.2	Skema Tahapan Jalur Biosintesis Karotenoid secara Umum (Hampir Seluruh Spesies Tanaman)	22
Gambar 2.3	Pengaruh Cahaya terhadap Pertumbuhan Normal Wortel dan Ekspresi Gen Terkait Biosintesis Karotenoid	28
Gambar 2.4	Sintesis Beta Karoten dari Kondensasi <i>Enol-ether</i>	35
Gambar 2.5	Sintesis Beta Karoten Menggunakan Proses Kondensasi Wittig	35
Gambar 2.6	Pendapatan pasar beta karoten secara global meningkat sebesar 3,5% (2018–2027).....	37
Gambar 3.1	Variasi warna umbi ubi kayu dipengaruhi kandungan karotenoid	41
Gambar 3.2	Frekuensi Distribusi 1.789 Genotip Ubi Kayu terhadap Kandungan Total Karotenoid	43

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Gambar 3.3	Variasi Warna Ubi Jalar	47
Gambar 3.4	Tiga Teknik <i>Grafting</i> Ubi Kayu.....	57
Gambar 3.5	Perbanyak Bibit Ubi Kayu Tanpa dan Melalui Induksi Tunas Majemuk	60
Gambar 3.6	Pembentukan Somatik Embriogenik Genotip Ubi Kuning.	63
Gambar 3.7	Induksi Kalus Embriogenik Somatik Sekunder (ESS) Mentega 2 yang Terbentuk pada Media Perlakuan.....	63
Gambar 3.8	<i>Plantlet</i> Carvita 25 Asal Varian Somaklonal.....	64
Gambar 3.9	Morfologi Varietas Carvita 25 Asal Varian Somaklonal Somatik.....	64
Gambar 3.10	Panen Ubi Kayu Carvita 25 dan Manggu di Lahan Kampus .. Universitas Boyolali di Kabupaten Boyolali.....	66
Gambar 4.1	Pemuliaan Tanaman secara Konvensional dan Bioteknologi	71
Gambar 4.2	Varietas Ubi Kayu Kaya Beta Karoten Adira 1 Hasil Persilangan	72
Gambar 4.3	Kultur ubi kayu ubi kayu kaya beta karoten hasil induksi mutasi menggunakan sinar gama.	74
Gambar 4.4	Profil Tegakan Tanaman dan Umbi Varietas Ubi Kayu Kaya Beta Karoten Carvita 25 Hasil Induksi Varian Somaklonal	79
Gambar 4.5	Umbi Ubi Kayu Hasil Transformasi Genetik dengan Overekspresi Gen <i>DSX/PS</i>	84
Gambar 4.6	Tahapan penelitian perbaikan genetik ubi kayu kaya beta karoten melalui teknologi DNA (rekayasa genetika)	85
Gambar 4.7	Teknik Transformasi Genetik Tanaman.....	92
Gambar 4.8	Jalur Biosintesis Karotenoid.....	94
Gambar 4.9	A) <i>Methylerythritol 4-phosphate pathway</i> (MEP). B) Pohon filogenetik dari sekuens asam amino <i>DXS</i> ubi kayu dibandingkan wortel (<i>Daucus carota</i>), kentang (<i>Solanum tuberosum</i>), dan <i>Arabidopsis thaliana</i> (kiri). Perbandingan struktur gen <i>DXS</i> ubi kayu dibandingkan wortel, kentang, dan <i>Arabidopsis</i> (kanan).	97
Gambar 4.10	Pohon Filogenetik dan Struktur Gen <i>PSY</i>	99
Gambar 4.11	Pohon Filogenetik dan Struktur Gen (A) <i>LCYB</i> dan (B) <i>LCYE</i>	102

Gambar 4.12	Pohon Filogenetik dan Struktur Gen <i>BCH1</i>	105
Gambar 4.13	Jalur Biosintesis ABA dan Hubungannya dengan Ekspresi Gen	107
Gambar 5.1	Struktur Kimia Beta Karoten (A) dan Molekul Vitamin A atau Retinol dan Senyawa Isomernya (B)	115
Gambar 5.2	Mekanisme Bioaksi Beta Karoten sebagai Pendorong Ion Hydrogen untuk Mendeaktivasi Radikal Bebas dan Penyerap Radikal Bebas	116
Gambar 5.3	Struktur Misel Gabungan yang Berisi Kompleks Fosfolipid dan Produk Digesti Lipid	119
Gambar 5.4	Diagram Jalur Penyerapan dan Pengangkutan Karotenoid pada Tubuh Manusia	122
Gambar 6.1	Produk Mi Sayur Berbasis Mocaf Kaya Beta Karoten oleh UMKM Mekar Sari Boyolali, Mitra Binaan Puslit Bioteknologi LIPI	128
Gambar 6.2	Data Hasil Uji Pasar Produk Mi Sayur Berbahan Mocaf Kaya Beta Karoten dari 50 Responden dengan Latar Belakang Beragam	129
Gambar 6.3	Uji Rasa dan Penerimaan Konsumen Terbatas Produk Mi Mocaf Kaya Beta Karoten Bersama Pelajar dan Masyarakat	130
Gambar 6.4	Produk Kue Kering dari Bahan Baku Tepung yang Berbeda-beda	131
Gambar 6.5	Hasil evaluasi sensori menunjukkan pengaruh komposisi konsentrasi mocaf dan sorgum pada tingkat kesukaan secara keseluruhan (penampilan, aroma, dan rasa).	131
Gambar 6.6	Beberapa Produk Berbasis Mocaf Kaya Beta Karoten yang Dikembangkan Mitra Binaan Puslit Bioteknologi LIPI, UMKM Mekar Sari.	133
Gambar 6.7	Produk Olahan Berbasis Non-Ubi Kayu Produksi Mitra Binaan Puslit Bioteknologi LIPI (UMKM Mekar Sari Boyolali).....	134

Daftar Tabel



Tabel 1.1	Capaian Kinerja Industri Makanan dan Minuman Selama 2015–2017	8
Tabel 2.1	Kandungan Beta Karoten pada Beberapa Jenis Umbi, Sayur, dan Buah-buahan	18
Tabel 2.2	Identitas Senyawa Berdasarkan Karakteristik Spektroskopik pada Tanaman Ubi Kayu Hasil Penelitian Carvalho dkk.	21
Tabel 2.3	Kandungan Beta Karoten pada Berbagai Jenis Ubi Kayu di Beberapa Lembaga Riset	32
Tabel 2.4	Variasi kandungan beta karoten pada berbagai ubi kayu menggunakan beberapa metode pengukuran.	32
Tabel 3.1	Jenis Ubi Kayu Kaya Beta Karoten/Karotenoid dari Lembaga Riset di Berbagai Negara.....	44
Tabel 3.2	Variasi Kandungan Beta Karoten pada Varietas Ubi Jalar Komersial di Beberapa Negara	48
Tabel 3.3	Koleksi dan Pengembangan Varietas Ubi Jalar Kaya Beta Karoten di Beberapa Lembaga Riset di Berbagai Negara.....	49
Tabel 3.4	Potensi Produksi Stek Beberapa Varietas Ubi Kayu Nasional pada Kepadatan Populasi Berbeda yang Dikeluarkan oleh Kementerian Pertanian	55
Tabel 3.5	Potensi Produksi Stek pada Beberapa Jenis Ubi Kayu Kuning Koleksi LIPI yang Ditanam di Daerah Muara, Bogor	55

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Tabel 3.6	Pengaruh Teknik <i>Grafting</i> terhadap Pertumbuhan dan Daya Hasil Ubi Kayu Kayu	57
Tabel 4.1	Beberapa Jenis Ubi Kayu dan Umbi Lain Hasil Perbaikan Genetik dengan Berbagai Teknik Pemuliaan Tanaman.....	69
Tabel 5.1	Besaran Asupan per Hari dan Dosis Tertinggi Vitamin A....	114
Tabel 6.1	Komposisi Gizi Mi Sayur Mocaf Kaya Beta Karoten dengan Mi Kering Lain Berbahan Tepung Terigu.....	128
Tabel 6.2	Profil Kandungan Proksimat pada Produk Kue Kering Berbahan Mocaf Kaya Beta Karoten	132
Tabel 7.1	Program dan Rencana Aksi Pengembangan Ubi kayu sebagai Pangan Fungsional Kaya Beta Karoten	141

Pengantar Penerbit



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

Sebagai salah satu upaya penjaminan mutu publikasi ilmiah, penerbitan buku ini telah melalui proses *peer-review*. Buku ini mendeskripsikan informasi dan hasil-hasil riset terkait ubi kayu dengan kandungan beta karoten untuk aplikasinya sebagai pangan fungsional secara komprehensif, mulai dari biodiversitas tanaman, aspek biologi molekuler, perakitan bibit ubi kayu unggul secara konvensional hingga rekayasa genetika, dan aspek pemanfaatannya sebagai bahan baku industri, khususnya pangan fungsional. Selain itu, buku ini juga membahas kontribusi pada akselerasi pemanfaatan ubi kayu yang memiliki kadar nutrisi unggul, khususnya beta karoten secara lebih luas, baik di bidang agribisnis ubi kayu maupun industri berbasis ubi kayu.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Buku ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi peneliti bidang tanaman/pertanian terkait budi daya dan teknologi molekuler, akademisi dan pengajar bidang tanaman, praktisi bidang industri pangan, khususnya yang berbasis tepung dan industri agribisnis ubi kayu, serta komunitas/masyarakat pemerhati ubi kayu.

LIPI Press

Prakata



Puji syukur kami sampaikan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas selesainya penulisan buku *Pangan Fungsional Berbasis Ubi Kayu Kaya Beta Karoten* yang merupakan buku kedua terkait ubi kayu yang dihasilkan tim penulis.

Buku ini disusun berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan oleh tim penulis terkait ubi kayu sebagai pangan fungsional dibandingkan umbi-umbian lain serta penelitian yang dilakukan peneliti lain di negara lain. Di dalamnya, kami membahas aspek-aspek terkait pangan fungsional berbasis ubi kayu beta karoten sebagai prekursor vitamin A. Pembahasan mencakup jenis, ketersediaan, dan kestabilannya; mekanisme menghasilkan tanaman ubi kayu kaya beta karoten dan perbanyakannya; dan produk olahan berbasis *modified cassava flour* (mocaf) kaya beta karoten; serta upaya produksi massal bersama mitra.

Kami menyadari terdapat kekurangan dalam buku ini sehingga kami mengharapkan kritik dan saran perbaikan. Semoga buku ini dapat memberikan manfaat bagi akademisi dan peneliti lainnya, mitra atau industri, masyarakat serta pengambil kebijakan.

Jakarta, Januari 2020

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Kata Pengantar



Walaupun ubi kayu bukan jenis asli Indonesia, perannya sangat penting bagi masyarakat yang tinggal di lahan marginal karena kekurangan air atau musim kering lebih lama dengan curah hujan rendah. Komoditas ini dikenal hanya sebagai sumber karbohidrat, umumnya dikonsumsi oleh masyarakat menengah ke bawah, kurang bernilai tambah, dan dianggap remeh bagi kesehatan manusia. Seiring dengan berjalannya waktu dan tren saat ini, dengan semakin banyaknya manusia terjangkit penyakit pada usia muda, manusia mulai mempertimbangkan pangan yang dapat mencegah terjangkit penyakit atau pangan yang dapat dikonsumsi penderita penyakit tertentu. Indeks Glikemik (GI) ubi kayu tergolong rendah sehingga disarankan dikonsumsi oleh penderita diabetes, obesitas, dan penderita autisme. Selain itu, berkat perkembangan teknologi, ubi kayu dengan kadar beta karoten lebih tinggi daripada kisaran normal berhasil diciptakan. Beta karoten adalah prekursor vitamin A. Tim peneliti di Pusat Penelitian Bioteknologi LIPI berhasil mengembangkan ubi kayu kaya beta karoten yang berperan dalam pencegahan penyakit sebagai pangan fungsional. Dengan penambahan kandungan nutrisi di ubi kayu, komoditas unggul ini dapat dijadikan pangan fungsional untuk mence-

Buku ini tidak diperjualbelikan.

gah defisiensi mikro mineral yang banyak dijumpai di masyarakat yang tinggal di daerah marginal.

Buku ini terdiri dari tujuh bab yang mengupas: 1) pemanfaatan ubi kayu kaya beta karoten untuk pangan fungsional; 2) beta karoten, senyawa karotenoid tanaman dan variasinya di ubi kayu dan umbi lainnya; 3) sumber dan penyediaan bibit ubi kayu kaya beta karoten; 4) perbaikan genetik ubi kayu untuk meningkatkan kadar beta karoten; 5) bioaktivitas dan bioaksesibilitas beta karoten serta karotenoid lain pada tubuh manusia; 6) stabilitas kandungan beta karoten dan ragam pangan fungsional berbahan ubi kayu dan umbi lain; serta 7) Rekomendasi untuk Implementasi. Topik-topik tersebut sangat baik untuk dibaca peneliti lain, akademisi, masyarakat, dan para pihak lain. Beta karoten yang merupakan prekursor vitamin A yang umumnya dicirikan dengan warna kuning atau oranye tidak banyak diketahui orang. Oleh karena itu, buku ini dapat dijadikan acuan tentang beta karoten serta edukasi terkait beta karoten serta cara pengolahan produk agar kandungannya tidak menurun.

Saya mengucapkan selamat kepada para penulis buku ini dan kita bersama-sama mengawal tindak lanjut untuk merealisasikan rekomendasinya sehingga ubi kayu beta karoten tinggi ini dapat ditanam oleh petani Indonesia di banyak lokasi dan produknya banyak dijumpai di pasar dan dikonsumsi masyarakat untuk mencegah defisiensi vitamin A.

Jakarta, Januari 2020

Dr. Puspita Lisdiyanti M.Agr.Chem.
Kepala Pusat Penelitian Bioteknologi LIPI

BABI

Pemanfaatan Ubi Kayu Kaya Beta Karoten untuk Pangan Fungsional



Belakangan ini, pangan fungsional menjadi *trending topic* yang muncul dan dibahas, terutama terkait *stunting* yang menjadi masalah di Indonesia untuk diatasi pemerintah. Agar tidak mengalami masalah kesehatan sehingga harus berobat ke dokter, dengan biaya pengobatan besar, lebih baik melakukan pencegahan yang diperlukan oleh tubuh sehingga terhindar dari penyakit. Sumber pangan ini termasuk golongan pangan fungsional yang sebagian sudah dikonsumsi oleh leluhur tanpa mengetahui istilah dan kandungannya secara ilmiah. Banyak flora di Indonesia berpotensi menjadi pangan fungsional. Oleh karena itu, perlu terus digali, diteliti, dan disosialisasikan ke masyarakat untuk dapat dimanfaatkan.

Tanaman pangan sumber karbohidrat yang dikenal juga sebagai *roots and tuber crops* berpotensi untuk dikembangkan sebagai pangan

Buku ini tidak diperjualbelikan.

fungsional karena kandungan fitokimia dan manfaatnya untuk kesehatan. Chandrasekara dan Kumar (2016) mengulas bahwa beberapa jenis umbi, yaitu kentang, ubi jalar, ubi kayu, dan yam memiliki kandungan nutrisi yang sangat baik untuk pengembangan pangan fungsional yang meliputi protein, lemak, karbohidrat, serat, vitamin, dan senyawa bioaktif lain. Sebagai sumber bahan pangan dan bahan baku industri, ubi kayu memiliki peranan strategis terkait dengan upaya penyediaan bahan pangan karbohidrat nonberas, penganekaragaman konsumsi pangan lokal, substitusi gandum/terigu, pengembangan industri pengolahan hasil, dan agroindustri. Tanaman ini merupakan tanaman asli dari Amerika Selatan, tepatnya Brasil, yang tumbuh liar di hutan. Ubi kayu dibawa ke Indonesia oleh bangsa Portugis sekitar abad ke-16 ke Maluku yang lalu menyebar ke daerah lain sebelum masuk ke Pulau Jawa. Penyebarannya tergolong lambat karena ubi kayu dianggap rendah nutrisi dan masih ada sumber karbohidrat lain yang masih tersedia. Ubi kayu baru diperkenalkan pada tahun 1852 ke salah satu kabupaten di Jawa, walaupun hingga tahun 1875 masih rendah penggunaannya (Creutzberg & Laanen, 1987). Pada awal abad ke-20, ubi kayu mulai ditanam lebih luas. Hal ini sejalan dengan peningkatan jumlah penduduk di Indonesia yang memerlukan ketersediaan pangan lebih banyak, terutama pada masa paceklik atau musim kemarau panjang. Selain itu, ubi kayu dianggap komoditas yang dapat sewaktu-waktu dipanen setelah umur enam bulan untuk memenuhi kebutuhan pangan sehari-hari atau dijual untuk menambah pendapatan keluarga.

Konotasi negatif yang identik dengan ubi kayu adalah kemiskinan sehingga orang yang memakan ubi kayu dianggap orang miskin dan terbelakang. Dewasa ini, pemerintah telah menggaungkan untuk memberikan jamuan makan dengan ragam kuliner tradisional di pertemuan di instansi pemerintah sehingga pemanfaatan ubi kayu dalam kuliner Indonesia semakin disukai. Untuk mengubah persepsi masyarakat terhadap citra ubi kayu, kreasi makanan berbasis ubi kayu men-

jadi makanan kekinian yang memiliki rasa, bentuk, dan penampilan yang menarik menjadi tantangan besar karena sebagian besar masyarakat masih menganggapnya kurang lezat atau enak dibandingkan pangan berbasis beras atau sumber karbohidrat lain. Thailand merupakan negara di Asia yang mampu mengolah ubi kayu menjadi makanan penutup atau camilan yang enak walaupun jenis olahan yang mirip sudah dilakukan dan dimakan oleh masyarakat kita pada masa lampau, misalnya *ande-ande lumut* di Jawa yang sama dengan yang sekarang gencar dipasarkan Thailand. Bertambahnya kreasi kuliner berbasis ubi kayu diharapkan semakin meningkatkan citra ubi kayu sehingga bisa menjadi sumber pangan yang disukai.

Walaupun ubi kayu bersama tanaman pangan berumbi lain, seperti ubi jalar, sama-sama bukan asli Indonesia, pengembangannya di hampir seluruh pelosok Indonesia relatif cepat karena sebaran adaptasi sangat luas dan dapat ditanam di lahan marginal dan lahan kering. Hal ini berpotensi untuk menjadi bahan pangan yang ketersediaannya terjamin sepanjang tahun. Berdasarkan data dari Pusat Data dan Informasi (Pusdatin) Kementerian Pertanian (2019), produktivitas ubi kayu bahkan lebih tinggi dibandingkan padi, jagung dan kedelai dari tahun 1993 hingga 2018, sedangkan asupan pupuk dan sarana produksi lain lebih rendah dibandingkan ketiga komoditas fokus pemerintah tersebut. Oleh karena itu, pengembangan lebih lanjut dan konservasinya perlu terus dilakukan secara multisektoral, multidisiplin, dan terintegrasi.

Pemanfaatan plasma nutfah ubi kayu secara optimal dan berkelanjutan selaras dengan program ketahanan dan kedaulatan pangan yang memiliki cakupan aksesibilitas dan kualitas pangan. Dewasa ini, kualitas pangan semakin diperhatikan karena berkaitan erat dengan kualitas kesehatan. Selain bermanfaat sebagai sumber energi, pangan juga memiliki aspek fungsional yang kualitasnya berdampak pada kesehatan. Karena pengetahuan masyarakat tentang pentingnya pola hidup sehat terus meningkat, tuntutan terhadap kualitas bahan pangan

pun berubah: tidak hanya mengenyangkan, tetapi harus memiliki nilai gizi yang baik dan fungsi fisiologis tertentu untuk tubuh.

A. Definisi Pangan Fungsional dan Potensi Ubi Kayu sebagai Pangan Fungsional

Karena semakin peduli terhadap kesehatan, masyarakat semakin hati-hati dalam menyantap makanan sehari-hari. Prinsip lebih baik menyantap pangan sehat sehingga terhindar dari penyakit karena asupan mineral dan vitamin mencukupi terus menjadi tren gaya hidup dewasa ini sehingga semakin banyak restoran atau toko makanan yang menyediakan produk khusus pangan fungsional. Pangan fungsional yang banyak dijumpai dalam kehidupan sehari-hari, antara lain sayuran dan buah-buahan yang berwarna, serta pangan lain yang mengandung indeks glikemik rendah atau mengandung vitamin dan mineral tertentu.

Pemenuhan gizi yang dapat dipenuhi dari bahan pangan fungsional sangat diperlukan pada segala rentang usia mulai janin sampai bayi (1.000 hari kehidupan), remaja, dewasa, dan lanjut usia (lansia). Dengan demikian, jenis asupan pangan fungsional dapat digolongkan berdasarkan tiga klaster pengguna tersebut, yaitu bayi–remaja, dewasa, dan lansia. Gizi yang tepat pada usia remaja sangat penting mengingat remaja sedang mengalami tumbuh kembang yang pesat. Tumbuh kembang yang optimal pada masa 1.000 hari kehidupan dan remaja merupakan landasan yang kuat untuk menjadi orang dewasa yang produktif.

Definisi pangan fungsional ada beberapa, antara lain sebagai makanan yang bermanfaat untuk kesehatan selain memiliki zat gizi dan nutrisi. Pangan fungsional adalah makanan (bukan kapsul, pil, atau tepung) yang berasal dari bahan alami yang dikonsumsi sebagai bagian dari diet harian dan memiliki fungsi tertentu bila dicerna, serta membantu mempercepat proses tertentu dalam tubuh, seperti meningkatkan mekanisme pertahanan secara biologis, mencegah peny-

kit tertentu, membantu proses penyembuhan dari penyakit spesifik, mengendalikan kondisi fisik dan mental, dan menghambat proses penuaan (Goldberg, 1994). Pangan fungsional harus memenuhi persyaratan sensori, nutrisi, dan fisiologis sehingga memberikan manfaat bagi kesehatan yang diperoleh dari zat-zat gizi yang terkandung di dalamnya (Astawan, 2011). Fungsi utama pangan fungsional adalah untuk mencegah terbentuknya radikal bebas yang akan berdampak pada kesehatan. Bahan makanan yang berfungsi sebagai pangan fungsional dapat diperoleh dari sumber bahan pangannya sendiri yang telah memiliki komponen bioaktif pangan fungsional ataupun melalui proses pengolahan menjadi bahan pangan fungsional. Komponen bioaktif pangan fungsional pada umumnya berupa protein, serat, vitamin, dan bahan antioksidan.

Bahan pangan berkhasiat antioksidan merupakan bagian dari pangan fungsional yang memiliki arti penting bagi kesehatan manusia. Kelompok pangan yang kaya akan antioksidan merupakan pangan bernilai tinggi dan banyak dikonsumsi, utamanya oleh populasi masyarakat yang menyadari pentingnya hidup sehat, beraktivitas tinggi, ingin awet muda, atau menyembuhkan penyakit degeneratif tertentu. Pangan fungsional antioksidan dapat bersumber dari vitamin, baik vitamin yang larut lemak (vitamin A dan E) maupun vitamin yang larut air (vitamin C), serta senyawa fitokimia berupa senyawa fenolik, tanin, dan flavonoid (Rahmadi & Yusuf, 2018).

Salah satu senyawa antioksidan yang memiliki aktivitas sebagai pangan fungsional adalah senyawa karotenoid. Karotenoid memiliki struktur dasar yang terdiri atas delapan unit isoprena yang saling berhubungan dan dua gugus metal yang terdekat dari pusat molekul yang berada di posisi 1,6, sedangkan gugus metal yang lain berada di posisi 1,5 (McGilvery & Goldstein, 1996). Jenis karotenoid yang sudah dikenal adalah alfa karoten, beta karoten, dan gama karoten, xantofil, kriptoksantin, likopen, zeaksantin, serta beberapa turunan senyawanya. Provitamin A yang paling potensial adalah beta karoten yang ekui-

valen dengan dua vitamin A. Sayuran dan buah-buahan berwarna hijau atau kuning biasanya banyak mengandung karoten (Bartley & Scolnik, 1995; Lancaster dkk., 1997). Ada hubungan langsung antara derajat kehijauan sayuran dan kadar karoten. Karoten terdapat dalam semua bagian tanaman yang berwarna hijau dan sebagian besar yang berwarna kuning. Semakin hijau daun tersebut, semakin tinggi kadar karotennya. Beta karoten adalah zat yang akan diubah menjadi vitamin A dalam tubuh. Zat ini juga tergolong antioksidan dan berguna untuk melawan radikal bebas yang berasal dari zat-zat beracun. Senyawa karotenoid berfungsi sebagai antioksidan, serta dapat menurunkan risiko kanker, penyakit jantung, dan gangguan penglihatan pada usia lanjut.

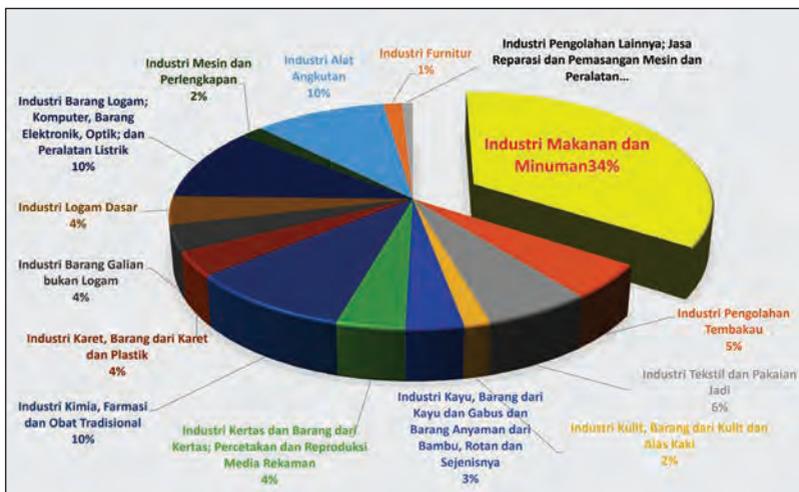
Beberapa jenis umbi-umbian sumber karbohidrat, seperti ubi jalar, ubi kayu, kentang, dan talas mengandung beta karoten yang dapat dikembangkan sebagai pangan fungsional. Kisaran kadar beta karoten umbi bervariasi, di antaranya pada ubi jalar adalah 9,499–200 ug/g (Wahyuni dkk., 2017), pada kentang adalah 41–131 ug/g (Brithaupt, Bamedi, & Wirt, 2002), ubi kayu 1,37–23,0 ug/g (Oliveira dkk., 2010; Hartati dkk., 2012; Shánchez dkk., 2006), dan pada talas $2,703 \pm 0,225$ – $2,480 \pm 0,205$ mg/100g (Temesgen dkk., 2016). Ubi jalar yang berwarna oranye secara umum memiliki beta karoten yang lebih tinggi daripada ubi kayu walaupun bervariasi antara genotip satu dengan lainnya, seperti umbi ungu dan umbi kuning yang berbeda dengan ubi jalar putih. Walaupun kadar beta karoten ubi kayu lebih rendah daripada ubi jalar, tanaman ini memiliki keunggulan dibandingkan tanaman umbi lain, yaitu dalam hal produksi, serta dapat ditanam di lahan kering dengan input minimum berupa pupuk, bahan pengendali hama dan penyakit tanaman, walaupun hasilnya lebih rendah bila ditanam di lahan yang ideal.

B. Produksi Pangan Olahan: Hilirisasi Hasil Penelitian untuk Pemanfaatan dan Peningkatan Nilai Ekonomi

Di Indonesia, industri makanan dan minuman menjadi salah satu sektor terbesar yang memberikan kontribusi secara konsisten dan nyata terhadap produk domestik bruto (PDB) industri nonmigas, yaitu sekitar 34,95% (Gambar 1.1).

Gambar 1.1 memperlihatkan pentingnya peran industri makanan terhadap perekonomian nasional. Hal ini juga dapat dilihat dari tingkat pertumbuhan industri makanan dan minuman di Indonesia pada periode 2015–2017 yang terus mengalami peningkatan cukup nyata dibandingkan pertumbuhan industri nonmigas lainnya (Tabel 1.1).

Potensi dan peran strategis sektor industri makanan ini harus didukung oleh pemerintah dalam menjaga dan menjamin ketersediaan bahan baku yang diperlukan agar dapat berproduksi secara berkelanjutan (Kementerian Perindustrian, 2017). Salah satu upaya yang dapat dilakukan adalah terus mendorong proses hilirisasi hasil



Sumber: Kemenperin (2018)

Gambar 1.1 Kontribusi PDB Industri Makanan dan Minuman terhadap Industri Nonmigas 2017

penelitian yang telah menciptakan produk-produk inovasi bahan baku unggul agar dapat dimanfaatkan oleh industri/masyarakat, dan konsumen.

Tabel 1.1 Capaian Kinerja Industri Makanan dan Minuman Selama 2015–2017

Uraian	Tahun		
	2015	2016	2017
Pertumbuhan industri makanan dan minuman	7,54	8,33	9,23
Pertumbuhan industri nonmigas	5,04	4,43	4,84
Pertumbuhan ekonomi	4,88	5,03	5,07

Sumber: Kemenperin (2018)

Saat ini, industri makanan seperti pangan olahan berbasis ubi kayu, menunjukkan prospek yang sangat menjanjikan. Ubi kayu telah dimanfaatkan sebagai komoditas pangan maupun industri sejak lama. Meskipun demikian, posisi ubi kayu sebagai bahan pangan di Indonesia masih dipandang sebagai makanan yang kurang berkelas dan berkualitas. Dengan inovasi proses pengolahan ubi kayu menjadi mocaf dan mocaf kaya beta karoten, serta produk turunannya, fleksibilitas pemanfaatan dan nilai ekonominya akan meningkat. Produk inovasi mocaf kaya beta karoten yang dikembangkan oleh Pusat Penelitian Bioteknologi LIPI sudah dikenalkan kepada masyarakat, terutama ke UMKM pangan olahan di beberapa daerah, seperti Subang, Jawa Barat dan Boyolali, Jawa Tengah. Melalui kegiatan diseminasi dan hilirisasi hasil penelitian, Pusat Penelitian Bioteknologi LIPI telah berhasil melakukan transfer teknologi pembuatan mocaf kaya beta karoten dan juga produk olahannya. Produk ini mendapatkan respons yang baik dari masyarakat, baik produk mocaf maupun produk olahannya. Tidak hanya inovasi proses pembuatan mocaf kaya beta karoten, bibit unggul ubi kayu hasil penelitian Pusat Penelitian (Puslit) Bioteknologi LIPI juga telah didiseminasi dan dihilirisasi untuk mendukung penyediaan bahan baku mocaf.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

C. Penelitian Ubi Kayu Bergizi Tinggi, Khususnya Mikronutrien Termasuk Beta Karoten: Peta Jalan

Penelitian mengenai sumber daya hayati ubi kayu di Puslit Bioteknologi LIPI dilakukan secara menyeluruh yang meliputi koleksi, perbanyakan bibit, analisis molekuler hingga pengolahan pascapanen sebagaimana diuraikan dalam buku *Biodiversitas, Perakitan Klon Unggul, dan Pemanfaatan Bioresources Ubi Kayu untuk Mendukung Ketahanan Pangan* (Sudarmonowati dkk., 2018). Berkaitan dengan pentingnya ubi kayu dan potensi pengembangannya sebagai pangan fungsional berdasarkan kadar beta karoten yang dimiliki ubi kayu, penelitian mengenai aspek beta karoten telah pula dilakukan pada berbagai aspek, mulai dari karakteristik tanaman, budi daya, pascapanen hingga pemuliaan tanaman (Gambar 1.2). Pada buku ini, dibahas secara lebih mendalam mengenai pemanfaatan ubi kayu sebagai pangan fungsional mengandung beta karoten tinggi, potensi dan kendala pemanfaatannya serta strategi pemasyarakatannya. Pengembangan ubi kayu sebagai pangan fungsional memerlukan beberapa aspek kajian yang meliputi identifikasi potensi kadar beta karoten ubi kayu, ketersediaan bahan baku yang dapat didukung melalui penyediaan bibit dan perbaikan mutu bibit ubi kayu sebagai penghasil beta karoten tinggi, bioaktivitas beta karoten di tubuh manusia, serta pemanfaatan dan formulasi produk pangan fungsional menggunakan ubi kayu kaya beta karoten sebagai bahan baku (Gambar 1.2).

Karena ubi kayu yang mengandung nutrisi lebih tinggi, khususnya beta karoten, mungkin dihasilkan seiring dengan perkembangan teknologi, ketersediaan bibit untuk dapat dimanfaatkan pengguna secara luas merupakan aspek penting untuk dibahas. Teknologi untuk menghasilkan ubi kayu unggul antara lain yang mengandung beta karoten tinggi mencakup teknik konvensional berupa penyilangan dan seleksi, induksi mutasi baik secara kimiawi maupun secara radiasi dengan sinar gama, hingga penggunaan marka molekuler dan rekayasa genetika. Walaupun belum semua teknologi tersebut digunakan

Buku ini tidak diperjualbelikan.

untuk memperbaiki sifat ubi kayu terkait beta karoten, teknik yang sama dapat diterapkan untuk beta karoten dengan beberapa modifikasi bila diperlukan. Karena beta karoten belum banyak dikenal khalayak, aspek terkait bioaktivitas sekaligus kandungan di ubi kayu dan beberapa tanaman umbi lainnya, serta stabilitas kandungan beta karoten hingga menjadi berbagai produk, perlu dipublikasikan. Produk pangan berbasis tepung ubi kayu sudah banyak beredar di pasar, bahkan produk dengan label khusus yang bermanfaat untuk kesehatan seperti indeks glikemik rendah, sudah dapat ditemui di toko tertentu walaupun masih perlu ditingkatkan produk yang menggunakan mocaf kaya beta karoten. Permintaan pasar sudah semakin meningkat dan selaras dengan maraknya usaha mikro, kecil, dan menengah (UMKM) atau perusahaan rintisan yang menggarap produk berbasis ubi kayu.

Tidak banyak yang mengenal beta karoten dan senyawa karotenoid, serta variasinya di ubi kayu dan umbi-umbian lain karena tergolong mikronutrisi. Meskipun tidak diperlukan oleh tubuh dalam jumlah banyak, mikronutrien sangat menentukan kesehatan manusia.

Untuk mendukung potensi ubi kayu sebagai pangan fungsional, diperlukan bahan baku yang mencukupi. Dengan demikian, penyediaan bibit ubi kayu kaya beta karoten, serta perbaikan mutu tanaman (pemuliaan) untuk memperoleh tanaman dengan produktivitas dan kualitas nutrisi yang unggul sangat diperlukan. Koleksi sumber daya hayati jenis ubi kayu kaya beta karoten sangat diperlukan pada tahapan *pre-breeding* untuk menyeleksi sumber daya genetik yang diperlukan sebagai material genetik pada tahapan *breeding*. Perbanyak tanaman umbi-umbian tersebut dapat menggunakan stek atau umbi secara konvensional atau menggunakan teknologi *in vitro* seperti kultur jaringan menggunakan kultur pucuk, tunas aksiler, dan embrio. Teknologi yang lebih masif, seperti menginduksi embriogenesis somatik, juga banyak dilakukan terhadap ubi kayu dan jenis lain, seperti

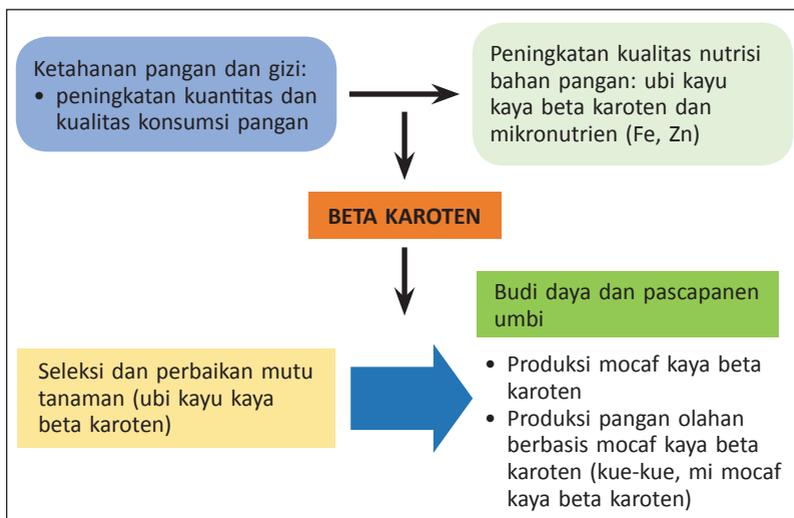
talas, ubi jalar, dan kentang. Kultur protoplas juga sudah digunakan walaupun implementasinya belum banyak karena *planlet* yang dapat diaklimatisasi yang dihasilkan masih sedikit.

Pemuliaan ubi kayu kaya beta karoten dapat dilakukan secara konvensional, induksi mutasi secara fisik maupun kimiawi maupun melalui aplikasi bioteknologi, yaitu rekayasa genetik (Sudarmonowati dkk., 2018). Bibit tanaman yang mengandung beta karoten tinggi harus diperoleh dari pembiakan vegetatif untuk menjamin kandungan yang relatif sama dengan tetuanya. Pengembangan ubi kayu kaya nutrisi meliputi aspek perbaikan mutu tanaman untuk peningkatan kualitas mutu nutrisi, budi daya, serta pengolahan pascapanen. Bibit tanaman unggul dengan sifat khusus tersebut dapat diperoleh dengan cara kultur jaringan dan radiasi sinar gama yang dikombinasikan dengan seleksi. Perbanyak bibit perlu melibatkan petani sehingga dapat diseminasikan lebih luas, tetapi tetap perlu terdata.

Pada dasarnya, beta karoten yang ada pada ubi kayu bermanfaat bagi kesehatan, baik dalam bentuk ubi kayu segar maupun hasil olahannya. Bioaktivitas dan bioaksesibilitas beta karoten sangat penting diketahui karena walaupun tersedia banyak di tanaman, saat dikonsumsi manusia tidak dapat maksimal tersedia. Selain menekankan pada aspek nutrisi dan fisiologis senyawa bahan aktif pangan untuk menunjang kesehatan, pengembangan produk pangan fungsional juga memerlukan aspek kestabilan nutrisi atau bahan aktif agar awet dan manfaatnya tetap terjaga serta sensori yang baik agar mudah dinikmati dan banyak diminati. Penganekaragaman pangan memerlukan bahan baku antara atau bahan baku setengah jadi berupa tepung. Beta karoten merupakan senyawa yang sensitif terhadap cahaya dan suhu tinggi. Oleh karena itu, pengolahan ubi kayu kaya beta karoten menjadi bahan jadi maupun setengah jadi perlu mempertimbangkan aspek proteksi aktivitas beta karoten.

Prospek pengolahan bahan pangan fungsional menjadi industri pangan fungsional yang lebih besar akan sangat mendukung keta-

hanan pangan dan meningkatkan taraf kesehatan. Selain pengembangan pangan fungsional menjadi industri, aspek bioaktivitas dan takaran (dosis) yang sesuai yang bermanfaat bagi kesehatan, khususnya yang memiliki efek fisiologis menyembuhkan suatu penyakit, perlu dikaji lebih mendalam agar tepat sasaran dan mencegah efek samping yang tidak diinginkan. Kandungan beta karoten di dalam produk olahan akan berubah tergantung pada cara pengolahannya. Cara pengolahan dan contoh produk yang mengandung beta karoten dalam takaran yang diperlukan tubuh manusia sangat penting untuk diketahui agar kandungannya tidak hilang saat diolah. Upaya mendorong ubi kayu menjadi salah satu bahan pangan yang berpotensi sebagai pangan fungsional perlu memperhatikan empat aspek utama, yaitu pengetahuan mengenai potensi dan manfaatnya, ketersediaan bahan baku untuk produksi, pemanfaatan dan formulasi produk, serta aspek pengujian produk pangan fungsional (Gambar 1.3).



Sumber: Lab GMMJBT (2018)

Gambar 1.2 Peta Pengembangan Penelitian Ubi Kayu Kaya Nutrisi



Sumber: Lab GMMJBT (2018)

Gambar 1.3 Konsep Pengembangan Ubi Kayu Kaya Beta Karoten sebagai Pangan Fungsional

Keseluruhan aspek tersebut diuraikan secara lebih terperinci pada lima bab selanjutnya dari buku ini. Aspek-aspek itu adalah 1) beta karoten, senyawa karotenoid tanaman, dan variasinya di ubi kayu dan umbi lain; 2) sumber dan penyediaan bibit ubi kayu kaya beta karoten; 3) perbaikan genetik ubi kayu untuk meningkatkan kadar beta karoten; 4) bioaktivitas dan bioaksesibilitas beta karoten, serta karotenoid lain pada tubuh manusia; serta 5) stabilitas kandungan beta karoten dan ragam pangan fungsional berbahan ubi kayu dan umbi lain.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

BAB II

Beta Karoten, Senyawa Karotenoid Tanaman, dan Variasinya di Ubi Kayu Dibandingkan Umbi Lain



Sebagian besar karotenoid adalah senyawa terpenoid, yang memiliki 40 atom karbon (C_{40}), atau turunannya dengan atom karbon lebih pendek ($C_{<40}$, apokarotenoid). Umumnya, karotenoid memiliki cincin enam di setiap ujung rantai poliprenoid, kecuali likopen (tanpa cincin ujung) dan tergolong dalam kelas hidrokarbon yang berperan pada berbagai proses biologis tanaman, seperti fotosintesis, fotomorfogenesis, fotoproteksi, pertumbuhan, dan perkembangan tanaman. Jenis karotenoid yang telah banyak dikenal adalah alfa karoten, beta karoten, gama karoten, xantofil, kriptoksantin, likopen, zeaksantin serta beberapa senyawa turunannya. Jenis beta karoten paling potensial sebagai provitamin A ekuivalen dengan dua vitamin A.

Bab ini membahas lebih terperinci mengenai senyawa karotenoid, terkait jalur biosintesis, faktor yang memengaruhi dan tempat akumulasinya, serta beragam variasi jenis dan kandungannya pada tanaman, khususnya ubi kayu. Seperti pigmen alami lainnya, senyawa karotenoid sangat menarik perhatian para ahli kimia organik pada abad ke-19 dan pada tahun 1817 senyawa beta karoten berhasil diisolasi dan pigmen warna yang terdapat di daun pada musim gugur diketahui sebagai xantofil pada tahun 1837 (Isler, 1971).

A. Senyawa Karotenoid dan Distribusinya pada Beberapa Jenis Tanaman

Karotenoid adalah metabolit sekunder tanaman (Hannoufa & Hossain, 2012) dan merupakan kelompok beragam pigmen yang tersebar luas di alam (Yuan dkk., 2015), banyak ditemukan pada tanaman, jamur, ganggang, dan bakteri (Zinati dkk., 2017), dengan intensitas warna bervariasi dari warna kuning, oranye hingga merah. Karotenoid termasuk keluarga isoprenoid C_{40} (Stange & Flores, 2012) dengan lebih dari 600 struktur yang telah teridentifikasi pada tanaman tingkat tinggi (Carvalho dkk., 2016), bersifat *liposoluble* atau larut dalam lemak (Bartley & Scolnik, 1995; Stange & Flores, 2012; Simpson dkk., 2018) dengan fungsi ganda, yaitu fungsi fisiologis dan nutrisi (Niu dkk., 2017).

Menurut McGilvery dan Goldstein (1996), karotenoid memiliki struktur dasar yang terdiri atas delapan unit isoprena yang saling berhubungan dan dua gugus metal yang terdekat dari pusat molekul berada pada posisi 1,6, sedangkan gugus metal yang lain berada pada posisi 1,5. Karotenoid sangat diperlukan bagi tanaman (Sun dkk., 2018) karena senyawa karoten terlibat dalam berbagai fungsi fisiologis penting. Karotenoid dapat menyerap sinar matahari yang kemudian diubah menjadi energi untuk proses fotosintesis. Di daun, senyawa karotenoid terintegrasi dalam metabolisme kompleks pemanenan cahaya dan pusat reaksi fotosintesis untuk mentransfer energi dan mediasi fotoproteksi.



Secara umum, menurut Carvalho dkk. (2016), fungsi penting karotenoid pada tanaman meliputi:

1. memanen cahaya selama proses fotosintesis berlangsung,
2. memberi warna pada bunga dan buah-buahan sehingga menjadi daya tarik serangga untuk hinggap dan terjadinya penyerbukan serta penyebaran benih,
3. menstabilkan membran lipid melalui sifat antioksidan,
4. menyediakan produk sampingan seperti asam absisat (ABA), *strigolactones*, *beta-cyclocitral* yang berperan sebagai molekul sinyal dalam mengatur fungsi fisiologis pada keadaan cekaman abiotik,
5. memodulasi proses perkembangan tanaman, dan
6. merespons terhadap lingkungan tanaman.

Menurut Nisar dkk. (2015), keberadaan kandungan senyawa karotenoid pada beberapa jenis buah, sayur, dan bunga secara visual dapat diketahui, misalnya beta karoten pada wortel dan ubi jalar, likopen pada tomat dan melon, capsantin dan capsorubin pada cabe merah, serta lutein pada bunga gemitir. Kandungan karotenoid, khususnya jenis beta karoten, berlimpah atau banyak terdapat pada beberapa jaringan tanaman yang dapat secara langsung dikonsumsi seperti pada buah labu (*Cucurbita pepo*), umbi ubi jalar (*Ipomoea batatas*), wortel (*Daucus carota*), daun kale (*Brassica oleracea*), buah mangga (*Mangifera indica*), dan beberapa jenis buah melon berdaging oranye (*Cucurmis melo*), serta jenis sayur dan buah-buahan lain (Tabel 2.1).

Menurut Sandmann, Römer, dan Fraser (2006), akumulasi karotenoid banyak terdapat di daun, bunga, dan buah. Pada ubi kayu, karotenoid terdapat di daun dan umbi (Ceballos dkk., 2017). Fungsi utama karotenoid dalam jaringan hijau adalah untuk melindungi organel fotosintesis dari cahaya berlebih (Sandmann dkk., 2006) sehingga kelimpahannya sangat berperan dalam fungsi fotosintesis dan

sebagai antioksidan (Stahl & Sies, 2003). Akumulasi karotenoid ditentukan oleh laju biosintesis dan degradasi yang terjadi selanjutnya dalam plastid (Schaub dkk., 2018).

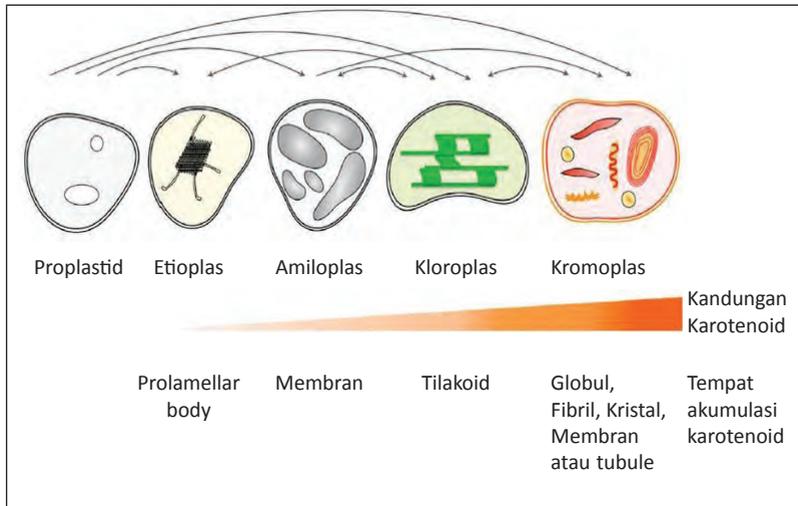
Tabel 2.1 Kandungan Beta Karoten pada Beberapa Jenis Umbi, Sayur, dan Buah-buahan

Jenis Tanaman	β-karoten/100 g
Kale	9.226 µg
Kentang	8.509 µg
Wortel	8.285 µg
Bayam	5.626 µg
Labu kuning	3.100 µg
Aprikot	1.094 µg
Tomat	449 µg
Mangga	445 µg
Semangka	303 µg
Pepaya	276 µg
Jeruk	71 µg

Sumber: USDA National Nutrient Database (2019)

Pada organisme fotosintetik, senyawa karotenoid disintesis pada semua plastid yang banyak ditemukan pada tanaman. Plastid terdiri atas berbagai jenis, seperti proplastid, etioplas, amiloplas, kloroplas, dan kromoplas (Jarvis & Lopez-Juez, 2013). Jenis plastid memiliki perbedaan terkait kapasitasnya dalam menyintesis dan menyimpan akumulasi senyawa karotenoid (Gambar 2.1). Jenis plastid juga berperan penting dalam mengatur aktivitas karotenogenik, stabilitas karotenoid, dan keanekaragaman pigmen (Sun dkk., 2018).

Menurut Sun dkk. (2018), proplastid merupakan nenek moyang atau jenis tertua dari semua jenis plastid lain dan tidak dianggap sebagai plastid karotenogenik. Etioplas merupakan plastid yang berkembang pada fase gelap sebelum benih tanaman tumbuh atau muncul dari tanah untuk berfotosintesis. Fitur yang paling khas dari etioplas adalah pembentukan *prolamellar bodies* (PLB), yang terdiri dari kisi parakristalin besar yang saling menghubungkan antara tu-



Sumber: Modifikasi dari Sun dkk. (2018)

Gambar 2.1 Jenis Plastid dan Struktur Penyimpanan Terkait Akumulasi Karotenoid.

bulus dan kedua prekursor klorofil dan karotenoid (Kowalewska dkk., 2016). Etioplas pada benih yang pernah diisolasi hanya mendapat senyawa karotenoid dalam jumlah terbatas (von Lintig dkk., 1997; Welsch dkk., 2000).

Amiloplas merupakan plastid potensial dan mempunyai nilai agronomi dan ekonomi yang penting karena sangat banyak terdapat pada organ penyimpanan pati, seperti pada biji gandum, padi, jagung serta pada kentang dan umbi ubi kayu (Sun dkk., 2018). Amiloplas juga menyintesis dan menyimpan senyawa karotenoid, terutama dari jenis xantofil dengan tingkat akumulasi yang rendah. Hal tersebut diduga karena beberapa faktor yang membatasi biosintesis dan akumulasi karotenoid pada amiloplas, seperti kapasitas biosintesis, struktur ultra dari plastid, dan informasi tentang metabolisme.

Menurut Bartley & Scolnik (1995), pigmen karotenoid ditemukan menempel dalam membran kloroplas dan kromoplas. Menurut Cunningham & Gantt (1998), karotenoid terlokalisasi dan terakumu-

Buku ini tidak diperjualbelikan.

lasi dalam membran tilakoid dari kloroplas. Sementara itu, dalam pembahasan Sun dkk. (2018), kromoplas merupakan plastid utama tempat sintesis terjadi dan penyimpanan senyawa karotenoid sehingga memberikan aneka warna pada bunga, buah, dan umbi akar tanaman. Karotenoid yang tersimpan dalam bentuk struktur kristal pada kromoplas lebih stabil karena terlindung dari cahaya (Vishnevetsky, Ovadis, & Vainstein, 1999). Kloroplas dan kromoplas merupakan jenis plastid yang sangat berbeda dalam penyimpanan dan akumulasi hasil akhir dari senyawa karotenoid (Cazzonelli & Pogson, 2010). Contohnya, pada tanaman tembakau yang mengekspresikan *CrtO*, gen beta karoten ketolase, di dalam plastid kloroplas menghasilkan hanya sedikit jumlah senyawa karotenoid jenis astaksantin, tetapi pada kromoplas menghasilkan karotenoid total dengan jumlah yang meningkat 170% dan sebagian besarnya merupakan jenis astaksantin (Mann dkk., 2000).

Variasi jenis dan intensitas warna pada tanaman terkait dengan identitas atau jenis senyawa karotenoid yang dikandungnya dan plastid tempat karotenoid tersebut terkumpul dan disimpan. Untuk mengetahui jenis senyawa karotenoid yang berada pada umbi ubi kayu terkait intensitas warnanya, Carvalho dkk. (2016) dalam penelitiannya melakukan penelusuran terhadap beberapa jenis umbi ubi kayu dengan intensitas warna yang bervariasi, di antaranya ubi kayu berwarna umbi putih, kuning pucat, kuning, kuning kuat, dan merah muda. Setiap jenis senyawa karotenoid dapat teridentifikasi profilnya secara spesifik menggunakan alat *High Performance Liquid Chromatography* (HPLC) dengan sistem deteksi *diode array detector* (DAD) atau disingkat HPLC-DAD, dengan karakteristik spektroskopik yang berbeda. Pada ubi kayu, setidaknya terdapat 16 jenis senyawa karotenoid yang dapat teridentifikasi dari jenis *landrace* Cas64 sebagai profil referensi atau acuan (Tabel 2.2).

Tabel 2.2 Identitas Senyawa Berdasarkan Karakteristik Spektroskopik pada Tanaman Ubi Kayu Hasil Penelitian Carvalho dkk.

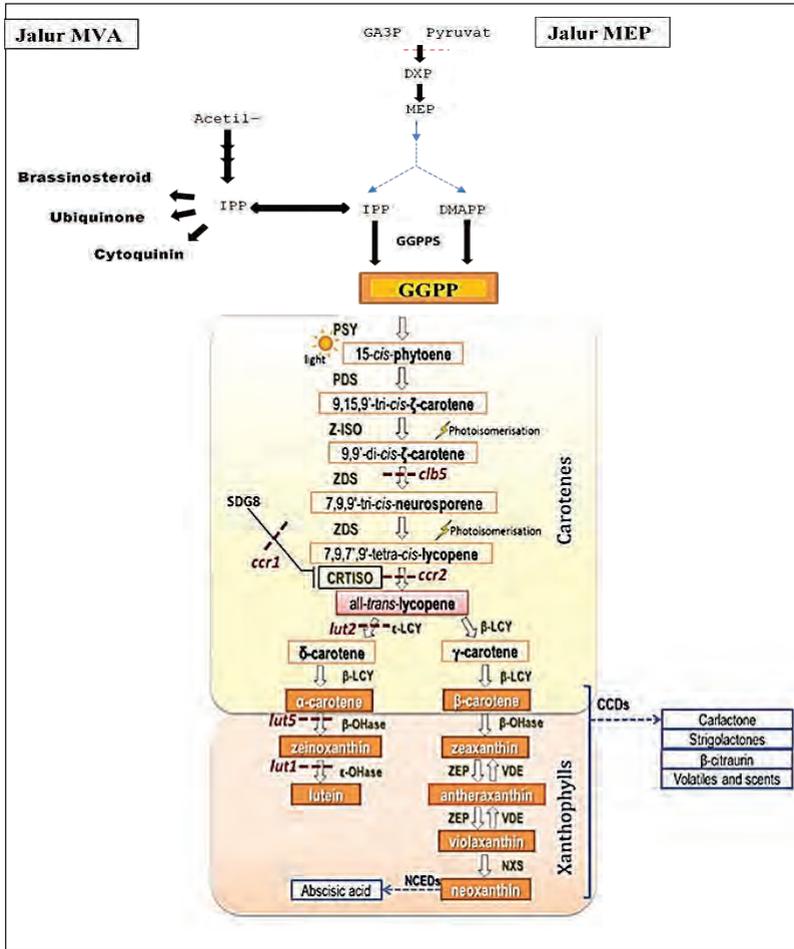
Peak #	Waktu Retensi (menit)	Karotenoid	Nama Senyawa Karotenoid	λ_{max1} (I)	λ_{max2} (II)	λ_{max3} (III)	Persentase (% III/II)
01	4,8	01	Neoksantin	416	440	470	80
02	4,9	02	Violaksantin	418	443	472	74
03	5,0	03	Zeaksantin	423	442	471	40
04	5,3	04	<i>Crocetin</i>	399	422	448	61
05	7,9	05	Lutein	422	445	473	60
06	8,0	06	Antheroksantin	425	445	474	15
07	17,2	07	Likopen	446	473	504	98
08	18,5	08	Betakriptoksantin	422	442	470	92
09	24,1	09	α -Zeakaroten	402	422	448	22
10	25,7	10	<i>Neurosporene</i>	418	442	470	71
11	28	11	Zeta karoten	399	423	449	92
12	34,5	12	Beta zeakaroten	399	423	449	69
13	41,6	13	<i>All trans</i> beta karoten	424	446	479	10
13	41,6	14	<i>Phytofluen1</i>	349	388	388	79
14	43,02	15	<i>9-cis</i> -beta karoten	431	445	472	78
14	43,02	16	<i>Phytofluen2</i>	349	388	447	78
15	45,7	17	<i>13-cis</i> -beta karoten	424	466	473	19
15	45,7	18	<i>Phytofluen3</i>	279	341	447	19
16	52,3	19	<i>Phytoene</i>	275	286	299	12

Sumber: Carvalho dkk. (2016)

B. Biosintesis Beta Karoten pada Tanaman (Khususnya Umbi-umbian)

Karotenoid dan apokarotenoid terlibat dalam berbagai tahap siklus hidup tanaman. Epigenetik mempunyai peran penting dalam mekanisme pengaturan karotenogenesis (Hannoufa & Hossain, 2012). Karakteristik karotenoid sangat menarik sehingga penelitian untuk meningkatkan biosintesis banyak dilakukan. Pengetahuan dasar terhadap reaksi dan enzim terkait biosintesis karotenoid serta jalur pemasok prekursor *prenyl pyrophosphates* dan katabolisme karoten penting untuk diketahui dan dipahami lebih lanjut.

Secara umum, jalur biosintesis karotenoid terbagi menjadi dua tahapan: *pertama*, pembentukan prekursor karotenoid dari dua jalur pemasok, yaitu jalur asam mevalonat (MVA) dan jalur *methylethritol 4-phosphate* (MEP); *kedua*, sintesis karoten dan xantofil (Gambar 2.2).



Sumber: Modifikasi Nissar dkk. (2015)

Gambar 2.2 Skema Tahapan Jalur Biosintesis Karotenoid secara Umum (Hampir Seluruh Spesies Tanaman)

1. Sintesis Prekursor Karotenoid

Biosintesis karotenoid berasal dari dua isomer isoprena, yaitu *isopentenyl diphosphate* (IPP) dan isomer aliliknya, yaitu *dimethylallyl diphosphate* (DMAPP). Terdapat dua jalur dalam memproduksi IPP

pada tanaman, yaitu jalur asam mevalonat (MVA) pada sitosol dan jalur *methylerythritol 4-phosphate* (MEP) pada plastid yang umumnya adalah kloroplas. IPP dan DMAPP yang digunakan untuk biosintesis karotenoid pada tanaman berasal dari jalur MEP. Substrat awal untuk pembentukan IPP pada jalur MEP adalah *glyceraldehyde 3-phosphate* (GA3P) dan pyruvate yang kemudian diubah menjadi *deoxy-D-xylulose 5-phosphate* (DXP) oleh enzim *DXP synthase* (DXS) dan kemudian menjadi MEP setelah penataan dan pengurangan molekul DXP oleh enzim *DXP reductoisomerase* (DXR). DXS dan DXR merupakan enzim penting dalam regulasi fluks karotenoid.

Pembentukan IPP dari jalur MVA berasal dari perubahan Asetil-CoA ke 3-hidroksi-3-metil *glutaryl* CoA (HMG-CoA) yang dikatalisis oleh HMG-CoA sintase. Kemudian, HMG-CoA diubah ke dalam komponen C6, *mevalonic Acid* (MVA), di mana MVA adalah prekursor pertama pada jalur biosintesis terpenoid. Selanjutnya, MVA diubah ke bentuk IPP oleh rangkaian reaksi, termasuk fosforilasi oleh *MVA kinase*, diikuti oleh dekarboksilasi. IPP dari jalur MVA diperlukan untuk sterol sitoplasma, seperti jenis *brassinosteroid*, *cytoquinin*, dan *ubiquinone*.

Selanjutnya, tiga molekul IPP berkondensasi dengan DMAPP akan menghasilkan prekursor biosintesis karotenoid (GGPP) oleh *GGPP synthase* (GGPPS). GGPPS merupakan perantara utama dalam sintesis isoprenoid plastidik (Stage & Flores, 2012). Menurut Sandmann dkk. (2006), sebelum masuk ke jalur biosintesis karotenoid, terdapat beberapa langkah di reaksi awal, yaitu pembentukan *1-deoxy-xylulose-5-phosphate synthase* oleh DXS dari prekursor *prenyl pyrophosphates*. Namun, *prenyl pyrophosphates* dan *geranylgeranyl pyrophosphate* (GGPP) tidak hanya sebagai prekursor pada jalur karotenoid, tetapi juga berperan pada banyak proses sintesis senyawa terpenoid lainnya pada tanaman. Kelompok GGPP mewakili hubungan antara jalur biosintesis karotenoid dan terpenoid dan bertanggung jawab terhadap regulasi antarjalur melalui kompetisi GGPP. Semua enzim dari jalur MEP berada di stroma (Stage & Flores, 2012).

2. Jalur Utama Biosintesis Karoten dan Xantofil

Biosintesis Senyawa Karoten

Jalur karotenoid dimulai dengan kondensasi dua molekul GGPP melalui perantara *phytoene synthase* (PSY) dengan bantuan cahaya menjadi *phytoene* dalam bentuk 15-*cis* isomer, kemudian *phytoene* berubah menjadi beberapa turunan dari senyawa karotenoid, setidaknya, melibatkan 13 enzim pada jalur biosintesis karotenoid. *Phytoene* diubah menjadi likopen dalam bentuk *all-trans*-likopen melalui serangkaian desaturasi dan isomerisasi oleh *phytoene desaturase* (PDS), zeta karoten *isomerase* (Z-ISO), zeta karoten *desaturase* (ZDS) serta karotenoid *isomerase* (CRTISO). Untuk menjadi bentuk isomer *all-trans* pada likopen, tanaman tingkat tinggi membutuhkan enzim spesifik isomerase, yaitu karotenoid isomerase (CRTISO). Enzim tersebut mampu mengisomerisasi ikatan *cis* pada posisi 7, 9 dan 7', 9' sehingga mengubah bentuk tetra-*cis*-likopen menjadi *all-trans*-likopen.

Menurut Yu dkk. (2011), aktivitas isomerase CRTISO tergantung pada motif ikatan *flavin adenine dinucleotide* (FAD), yang terikat pada bentuk reduksi dari kofaktor (FADred), untuk mengatalisasi suatu reaksi tanpa perubahan reaksi redoks. Sebaliknya, enzim desaturasi membutuhkan kofaktor aktif redoks yang mengatalisasi transfer elektron bersih. Ini sangat menarik karena aktivitas CRTISO tergantung pada berkurangnya ikatan flavin dan tampaknya lebih dekat dengan enzim isomerisasi pada bakteri, yaitu CrtY atau CrtB (bakteri likopen *cyclase*) daripada dugaan asalnya, yaitu CrtI. Menurut Isaacson dkk. (2004), CRTISO bukan satu-satunya enzim isomerisasi karotenoid pada tanaman. CRTISO dan Z-ISO (enzim isomerisasi) memiliki peran berbeda dalam isomerisasi karoten meskipun aktivitas dari kedua enzim ini sebagian dapat digantikan dengan fotoisomerisasi pada bagian hulu dari bentuk *cis*-karoten menjadi *all-trans*-likopen dalam jaringan fotosintesis.

Proses selanjutnya adalah transformasi bentuk *all-trans*-likopen menjadi senyawa karotenoid lain melalui proses siklisasi. *All-trans*-

likopen pada tanaman merupakan substrat yang disukai untuk proses siklilasi. Siklilasi adalah proses pembentukan cincin *cyclohexane* pada salah satu atau kedua ujung senyawa likopen dengan cincin beta (*beta ring*) dan/atau cincin epsilon (*epsilon-ring*). Siklilasi likopen merupakan langkah penting dalam metabolisme karotenoid sehingga menghasilkan keanekaragaman karotenoid.

Penambahan cincin dikatalisis oleh dua enzim, yaitu enzim likopen-beta-*cyclase* (beta-LCY) dan likopen-epsilon-*cyclase* (epsilon-LCY). Enzim beta-LCY mengatalisis siklilasi pada kedua ujung likopen dengan penambahan *beta ring* menjadi senyawa karotenoid dengan cabang beta-beta menghasilkan beta karoten, sedangkan epsilon-LCY hanya menyiklilasi pada satu ujung likopen dengan penambahan *epsilon-ring* membentuk monosiklik beta karoten (epsilon, gama karoten). Karotenoid dengan dua *epsilon-ring* tidak umum di sebagian besar tanaman dan ganggang (Goodwin, 1980) sehingga ujung likopen lainnya merupakan kombinasi dari katalisis beta-LCY menjadi kombinasi *beta ring* dan *epsilon-ring* menghasilkan karotenoid dengan cabang b, epsilon yang terdiri dari alfa karoten dan turunannya.

Likopen yang telah disiklilasi oleh beta-LCY dan epsilon-LCY atau beta-LCY menghasilkan alfa karoten dan beta karoten. Selanjutnya, karoten ini dihidroksilasi untuk menghasilkan xantofil yang merupakan pigmen karotenoid penting dalam fotosintesis tanaman.

Faktor utama yang memengaruhi perbedaan produksi karotenoid pada beberapa spesies tanaman adalah regulasi transkripsi gen yang mengode *phytoene synthase* (PSY), yaitu enzim penentu pada jalur pertama dan utama biosintesis karotenoid (Sandmann dkk., 2006; Maass dkk., 2009; Rodríguez-Villalón dkk., 2009). Secara transkripsi, induksi gen PSY merupakan bentuk respons terhadap berbagai faktor, seperti perkembangan tanaman, pembentukan asam absisat (ABA), cekaman abiotik, di antaranya cahaya tinggi, salinitas, kekeringan,

suhu, pengaturan cahaya dan regulasi balik pasca-transkripsi (Cazzonelli & Pogson, 2010).

Gen-gen karotenogenik dikodekan dalam genom inti dan protein pascatranslasi, kemudian disintesis pada plastid. Informasi lebih lanjut gen-gen yang terlibat dalam biosintesis karotenoid untuk peningkatan kandungan senyawa karotenoid akan dijelaskan pada bab selanjutnya terkait perbaikan genetik untuk meningkatkan kadar beta karoten pada ubi kayu.

Dengan kemajuan teknologi bioinformatika dan komputasi biologi, Zinati dkk. (2017) melakukan studi *in silico* untuk faktor transkripsi, fitur regulasi, dan prediksi promotor terkait sifat karotenoid pada tanaman jagung menggunakan perangkat lunak Genomatix, PlantPAN, PlantCARE, PlantTFDB dan IGDE6. Hasil analisis menunjukkan bahwa promotor GRMZM2G300348_T01 pada gen *PSY1* memiliki motif beragam yang berperan merespons cekaman lingkungan. Terdapat dua faktor transkripsi dari keluarga HB yang terekspresi saat cekaman lingkungan. Diduga faktor-faktor transkripsi tersebut berperan sebagai pengatur penting ekspresi gen *PSY1*. Informasi faktor transkripsi akan berkontribusi pada rekayasa metabolik yang bertujuan meningkatkan biosintesis karotenoid.

Arango dkk. (2010) melaporkan stimulus cekaman abiotik seperti kekeringan dan salinitas pada ubi kayu berkontribusi terhadap perbedaan transkrip gen *PSY1* dan *PSY2*, namun tidak dengan *PSY3*. Cekaman abiotik menyebabkan peningkatan sintesis asam absisat (ABA) yang dihasilkan melalui pembelahan prekursor xantofil. Untuk mengatasi peningkatan permintaan xantofil, jagung dan padi mengandung salinan gen ketiga yang diinduksi stres, yang mengkode untuk *phytoene synthase (PSY)*, yang mengatalisis jalur pertama reaksi karotenoid.

Pada ubi kayu, Welsch dkk. (2010) menemukan adanya polimorfisme alel *conserved region* gen *PSY2* yang mampu meningkatkan fluks karbon melalui karotenogenesis sehingga mengarah ke akumulasi

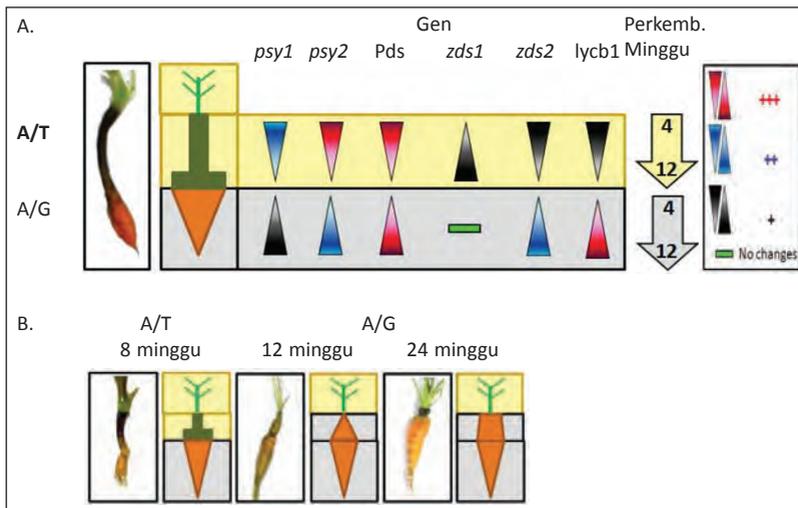
karotenoid provitamin A umbi berwarna kuning. Polimorfisme satu basa nukleotida hanya terdapat pada kultivar yang berumbi kuning, bersegregasi dengan warna umbi generasi F1 hasil persilangan dan *selfing* F1. Perubahan asam amino karena adanya polimorfisme gen *PSY2* tersebut menyebabkan peningkatan aktivitas katalitis *in vitro* dan mampu meningkatkan produksi karotenoid pada *yeast* rekombinan dan sel *Escherichia coli*. Ubi kayu yang mengekspresikan transgen *PSY* secara berlebihan menghasilkan umbi berwarna kuning dan karotenoid tinggi. Polimorfisme Alel *PSY* dapat menjadi sarana untuk meningkatkan kandungan provitamin A pada umbi ubi kayu melalui pemuliaan dan modifikasi genetik.

Selain *PSY*, kelimpahan transkrip LYCbeta dan HYbeta diduga juga berperan terhadap peningkatan kadar likopen dan total beta karoten ubi kayu (Carvalho dkk., 2016). Namun, sayangnya menurut Welsch dkk. (2010), tidak ada korelasi antara warna umbi dan ekspresi gen-gen utama dalam biosintesis karotenoid.

C. Faktor Lingkungan yang Memengaruhi Akumulasi Kandungan Karotenoid pada Tanaman

Cahaya merupakan stimulus yang mengaktifkan berbagai gen tanaman yang berpartisipasi pada proses fotosintesis dan fotomorfogenesis. Karotenoid diperlukan selama proses fotosintesis berlangsung pada tanaman dan alga sehingga gen yang terkait secara langsung dalam biosintesis karotenoid tanaman juga diatur oleh cahaya. Contoh pada tanaman wortel, cahaya sangat berperan terhadap pertumbuhan normal wortel, seperti ditunjukkan dalam penelitian Stange dan Flores (2012). Menurut mereka, cahaya berperan dalam pembentukan morfologi normal wortel sehingga memengaruhi perkembangannya dan penghambatan bersifat reversibel sehingga dapat kembali berubah pada kondisi gelap serta memengaruhi ekspresi gen karotenogenik (Gambar 2.3).

Penelitian terkait mekanisme regulasi karotenogenesis karena pengaruh cahaya dan gelap dipelajari pada empat genotipe kalus jeruk oleh Gao dkk. (2011). Hasilnya menyatakan bahwa cahaya putih dari perlakuan lampu LED berpengaruh terhadap ekspresi beberapa gen karotenogenesis, tetapi tidak selalu menghasilkan perubahan kandungan karotenoid secara signifikan. Perlakuan intensitas cahaya juga dipelajari oleh Zhang dkk. (2015) pada tanaman jeruk. Perlakuan 100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ cahaya biru dari lampu LED efektif meningkatkan kandungan karotenoid (*beta-cryptoxanthin*) pada kultur *in vitro* jeruk satsuma mandarin selama empat minggu, dan perlakuan cahaya biru dari lampu LED 50 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ efektif meningkatkan *all-trans*-violaksantin dan 9-*cis*-violaksantin pada jeruk *valencia orange*. Ekspresi gen *CitPSY*, *CitPDS*, *CitZDS*, *CitCYb2*, dan *CitHYb* meningkat secara simultan pada produksi beta, *beta-xanthophyll*.



Ket : +++ : level ekspresi gen tinggi, ++ : level ekspresi gen sedang, + : level ekspresi gen rendah

▲ : ekspresi meningkat selama masa perkembangan
▼ : ekspresi menurun selama masa perkembangan

Sumber: Stange & Flores (2012)

Gambar 2.3 Pengaruh Cahaya terhadap Pertumbuhan Normal Wortel dan Ekspresi Gen Terkait Biosintesis Karotenoid

Berbeda dengan penelitian Tuan dkk. (2013) yang menggunakan perlakuan panjang gelombang cahaya dari jenis warna cahaya lampu LED, yaitu putih, biru, dan merah pada kecambah gandum *tartary buckwheat* (*Fagopyrum tataricum* Gaertn.). Ekspresi sebagian besar gen biosintesis karotenoid menunjukkan tingkat yang lebih tinggi pada kecambah yang mendapat perlakuan penyinaran lampu LED putih pada delapan hari setelah perkecambahan dibandingkan perlakuan cahaya lampu LED biru dan merah. Karotenoid dominan yang terdapat pada kecambah gandum *tartary buckwheat* adalah lutein dan beta karoten. Akumulasi total karotenoid tertinggi terdapat pada kecambah yang tumbuh pada perlakuan sinar lampu putih ($1.282,63 \mu\text{g g}^{-1}$ berat kering). Kandungan tersebut relatif lebih tinggi dibandingkan kecambah yang ditanam pada perlakuan sinar lampu biru dan merah (masing-masing $940,86$ dan $985,54 \mu\text{g g}^{-1}$). Hasil penelitian tersebut dapat bermanfaat sebagai salah satu strategi yang efektif untuk memaksimalkan produksi karotenoid dan metabolit sekunder penting lainnya dalam kecambah gandum ataupun dapat diujicobakan pada tanaman lain, seperti ubi kayu, dengan menggunakan teknologi lampu LED.

D. Variasi Kadar Beta Karoten Ubi Kayu

Umumnya, tanaman pangan umbi-umbian menghasilkan pati tinggi, tetapi rendah kandungan protein dan zat gizi mikro, seperti besi, seng, dan provitamin A (beta karoten). Sebagian besar genotip ubi kayu berumbi kuning mempunyai kandungan senyawa karotenoid, tetapi sangat jarang ditemukan; populasi yang terbesar adalah berumbi putih (Welsch dkk., 2010). Warna parenkim umbi ubi kayu terkait erat dengan kandungan karotenoid (Ceballos dkk., 2017). Penelitian untuk mengetahui kandungan beta karoten yang terdapat pada ubi kayu telah lama dilakukan. Moorthy dkk. (1990) melaporkan variasi kandungan beta karoten ubi kayu dari jumlah 654 klon, hanya 21 klon yang mempunyai daging umbi berwarna kuning. Dua puluh satu klon

ubi kayu tersebut mempunyai kisaran kandungan beta karoten mulai dari 0,04 hingga 0,79 mg per 100 g porsi konsumsi. Delapan klon mempunyai kandungan di atas 0,25 mg dan selebihnya mempunyai kandungan beta karoten di bawah 0,25 mg. Beberapa genotip ubi kayu di dataran Amazonia juga telah diidentifikasi. Salah satunya adalah kultivar asli, yaitu *Amarelinha do Amapá* yang memiliki kandungan karotenoid tinggi, seperti alfa karoten, beta karoten, *cis*- dan *trans* beta karoten yang setara dengan 27 mg/100 g (Nassar dkk., 2009) kandungan tersebut 50 kali lipat lebih tinggi daripada kandungan kultivar berumbi putih lain yang telah dianalisis. Demikian pula beberapa genotip di Indonesia, di antaranya genotip Adira1, Carvita25, dan Mentega2 memiliki kisaran senyawa karotenoid sebesar 18–26 ppm (Hartati dkk., 2012). Kandungan karotenoid sebesar 27 mg/100 g merupakan empat kali lipat lebih besar daripada kebutuhan nutrisi harian manusia dan melebihi dari tanaman sumber beta karoten lain, seperti ubi jalar (Nassar, Fernandes dkk., 2009).

Selain beta karoten, ubi kayu juga mengandung sejumlah kecil jenis karotenoid lain, yaitu likopen, xantofil, lutein, dan beta kriptoksantin yang bermanfaat untuk kesehatan (Moresco dkk., 2005). Beberapa laporan menyebutkan ada beberapa jenis karotenoid yang ditemukan di ubi kayu, di antaranya alfa karoten dan turunannya, seperti lutein, serta beta karoten dalam bentuk *trans*, yaitu 15- *cis* beta karoten, 13-*cis* beta karoten, 9-*cis* beta karoten, dan turunannya, seperti beta kriptoksantin, anteroksantin, dan violaxantin. Namun, dari semua jenis tersebut, hanya alfa dan beta karoten serta kriptoksantin yang berfungsi sebagai prekursor vitamin A.

Ceballos dkk., (2017) melakukan studi kuantifikasi senyawa karotenoid pada ubi kayu. Informasi awal terkait senyawa karotenoid pada ubi kayu terbatas hanya pada perbedaan intensitas pigmentasi parenkim umbi dan kadar karotenoid total (*total carotenoid content* /TCC) menggunakan spektrofotometer. Analisis menggunakan HPLC dilakukan untuk mengetahui lebih spesifik jenis atau identitas dari

senyawa karotenoid. Pengembangan kultivar ubi kayu dengan kandungan beta karoten minimal sebesar 15 µg/g untuk membantu pencegahan kekurangan provitamin A pada masyarakat yang konsumsinya hanya mengandalkan komoditas ubi kayu. Menurut Maziya-Dixon, Alamo, dan Dixon. (2016), kisaran kandungan karotenoid pada genotip ubi kayu sangat penting diketahui untuk meningkatkan nutrisi dalam program pemuliaan tanaman.

Kadar beta karoten ubi kayu sangat bervariasi pada berbagai jenis ubi kayu koleksi Puslit Bioteknologi LIPI dan koleksi ubi kayu di lembaga riset lain (Tabel 2.3). Variasi nilai kandungan senyawa karotenoid, khususnya jenis beta karoten, yang telah diketahui dari hasil berbagai penelitian terlampir pada Tabel 2.4. Dibandingkan umbi talas, variasi kandungan karotenoid, terutama beta karoten pada ubi kayu relatif lebih rendah. Hal ini dapat dilihat dari hasil penelitian Englberger dkk., (2008) yang menganalisis konsentrasi kandungan karotenoid 34 kultivar talas bervariasi dari 50 hingga 4.486 µg/100 g.

Untuk mengetahui kandungan beta karoten pada umbi segar ubi kayu atau bahan makanan berbasis ubi kayu, spektrofotometri masih merupakan teknik yang umum untuk analisis beta karoten dalam bentuk produk komersial. Schierle dkk. (2004) melaporkan prosedur spektrofotometri untuk penentuan beta karoten total dalam aditif makanan dengan beragam rasio *cis-/trans-* menggunakan panjang gelombang isobestik. Namun, metode spektrofotometri tidak dapat membedakannya antara *all-trans* beta karoten dan bentuk *cis-* isomer dari beta karoten, yang mungkin terbentuk selama pengolahan.

Analisis spektrofotometri tidak dapat menentukan beta karoten dalam bentuk karotenoid lain, seperti alfa karoten, lutein, atau likopen. Secara umum, beta karoten dan senyawa karotenoid lainnya telah dipelajari secara intensif dengan kromatografi cair (*Liquid Chromatography/LC*), dan prosedurnya telah dilaporkan dapat memisahkan bentuk isomer dari beta karoten dan bentuk *all-trans* beta karoten serta bentuk karotenoid lain dari bahan makanan.

Tabel 2.3 Kandungan Beta Karoten pada Berbagai Jenis Ubi Kayu di Beberapa Lembaga Riset

Negara Asal	Lembaga	Genotip/ Varian	Kandungan Beta Karoten/Total Karotenoid	Penggu- naan	Referensi
Indonesia	Balitkabi	Beta 1, Beta 2	70–140 µg/g	Pangan	Balitkabi (2015)
India	CTCRI	KS-7, ST 141, ST 1416, ST 1434, ST 1449, ST 146, ST 149, SV 317, SV 322	75–155 / 5,9– 13,6 µg/g	Pangan	Vimala dkk. (2011)
Bangladesh	TCRC- BARI	Kamalasundari	4.500 µg/100g	Pangan	Islam dkk. (2016)
China	Xuzhou Sweet Potato Research Center	Jl)3314, Jl 03468, Nanzi 8, S01009, Sushu No. 8, Xushu 22-5 Xushu 23, Yanshu No. 5, 1172, 200730	0,6–31 mg/Kg	Pangan	Wu dkk. (2008)

Tabel 2.4 Variasi kandungan beta karoten pada berbagai ubi kayu menggunakan beberapa metode pengukuran.

Jenis Ubi Kayu	Klon /Genotip	Jenis Beta Karoten	Nilai	Satuan	Metode Pengukuran	Referensi
<i>Manihot esculenta</i> Crantz	CI-461 CE-314	beta karoten	0,4–7,9	µg/g		Moorthy dkk. (1990)
<i>Manihot esculenta</i>	Adira 1, Timtim 29	beta karoten	33–39	Ug/g	colorimetric	Hartati dkk. (2003)
<i>Manihot esculenta</i> hybrid <i>M. esculenta</i> <i>X M. oligantha</i>	UnB-400 ICB-300	 Trans beta karoten	27,4 20	 Ug/g	 colorimetric	 Nasar (2007)

Jenis Ubi Kayu	Klon /Genotip	Jenis Beta Karoten	Nilai	Satuan	Metode Pengukuran	Referensi
	878 - Cachimbo I		4,13 ± 0,04			
	991 - IM 222 – Juba		7,66 ± 0,45			
	1140 - IM 217		5,84 ± 0,83			
	949 - Pretinha II		4,44 ± 0,14			
	61 – Crueira		4,66 ± 0,37			
<i>Manihot esculenta</i> Crantz	1711 – Arari	beta karoten	3,25 ± 0,03	Ug/g	HPLC	Oliviera dkk. (2010)
	1700 – Varejão		4,16 ± 0,23			
	893 - Imari III		6,05 ± 0,14			
	1138 - IM 147		4,34 ± 0,55			
	1704 - IM 936 – Caniço		3,11 ± 0,03			
	1705 – Juriti		3,17 ± 0,53			
	1785 - Flor do Brasil		1,37 ± 0,01			
	Adira1		14,0 ± 2,0 ^{ab}			
Adira4	6,5 ± 2,5 ^b					
FEC25	21,0 ± 0,0 ^{ab}					
<i>M. esculenta</i>	Mentega1	beta karoten	18,0 ± 0,0 ^{ab}	Ug/g	colorimetric	Hartati dkk. (2012)
	Mentega2		18,0 ± 0,0 ^{ab}			
	Roti		10,5 ± 8,5 ^{ab}			
	Ubi Kuning		18,0 ± 6,0 ^{ab}			

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Jenis Ubi Kayu	Klon /Genotip	Jenis Beta Karoten	Nilai	Satuan	Metode Pengukuran	Referensi
M. <i>esculenta</i>	Lombok1		10,45			
	Lombok2	beta karoten	11,8	Ug/g	colorimetric	Hartati dkk. (2014)
	Nangka		14,9–28			
M. <i>esculenta</i>		beta karoten	6	Ug/g	HPLC	Sánchez dkk. (2014)

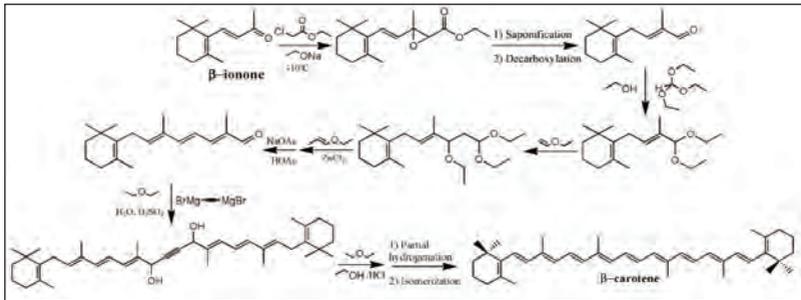
E. Produksi Beta Karoten Sintetis

Selain secara alami terdapat di alam pada tanaman, alga, dan organisme fotosintesis lainnya, beta karoten juga dapat diperoleh dan diproduksi secara sintetis. Produksi beta karoten sintetis telah dilakukan sejak tahun 1954 oleh Roche dan sejak tahun 1960 oleh BASF (Ribeiro, Barreto, & Coelho, 2011). Produksi beta karoten sintetis menggunakan prekursor beta-ionon yang secara alami diperoleh dari minyak serai (*Cymbopogon citratus*) atau terpentin pinus (*Pinus caribea*), tetapi saat ini beta-ionon dibuat dari aseton atau butadiena (Isler, 1971; Britton, Liaaen-Jensen, & Pfander, 1996).

Roche memproduksi beta karoten sintetis secara industri dengan menggunakan prinsip sintesis C19+C2+C19. Seperti halnya dalam memproduksi vitamin A, rantai poliena dibuat dari *coupling* Grignard, eliminasi dan reaksi hidrogenesis parsial. Selain itu, sintesis yang baru dan efektif dari *polyenic aldehyde* telah dikembangkan dalam bentuk kondensasi *enol-ether* dan pertama kali telah dikerjakan dalam skala besar untuk produksi aldehida C₁₉ (8-[2',6',6'-trimethyl-cyclohex-1'-enyl]-2,6-dimethyl-octa-2,4,6-trien-1-al). Kondensasi *enol-ether* tersebut memungkinkan secara bertahap dan pemanjangan aldehida terkonjugasi spesifik setiap kali oleh dua atom karbon seperti yang terdapat pada Gambar 2.4 (Isler, 1971; Britton dkk., 1996). Selain itu, BASF menggunakan kondensasi Wittig untuk memproduksi beta karoten dengan menggunakan garam forfonium yang sebelumnya

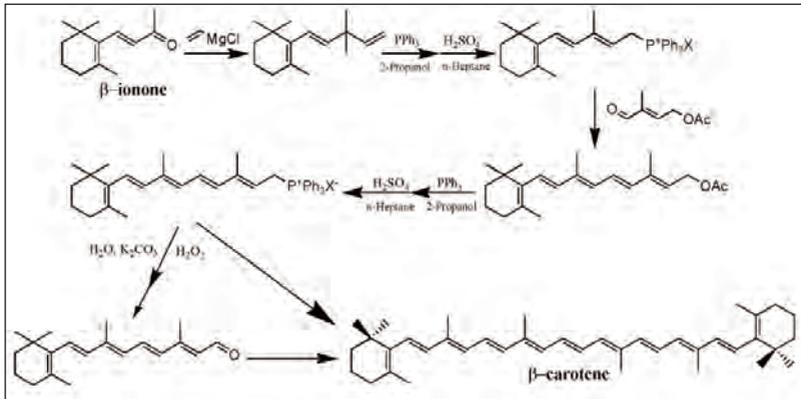
diderivatisasi oleh *triphenylphosphine* bereaksi dengan aldehida menghasilkan ikatan rangkap dan pemanjangan rantai poliena. Reaksi terjadi antara retina dan garam *retinyltriphenylphosphonium* membutuhkan daur ulang *triphenylphosphine oxide* karena rendahnya biodegradasi. Proses pemulihan terdiri dari tiga tahap, yaitu destilasi, klorinasi dengan *phosgene*, dan dehalogenisasi dengan aluminium. (Gambar 2.5).

Perbedaan produksi beta karoten sintetis antara Roche dan BASF terlihat dari hasil produksi, di mana Roche dapat menghasilkan beta



Sumber: Ribeiro dkk. (2011)

Gambar 2.4 Sintesis Beta Karoten dari Kondensasi Enol-ether



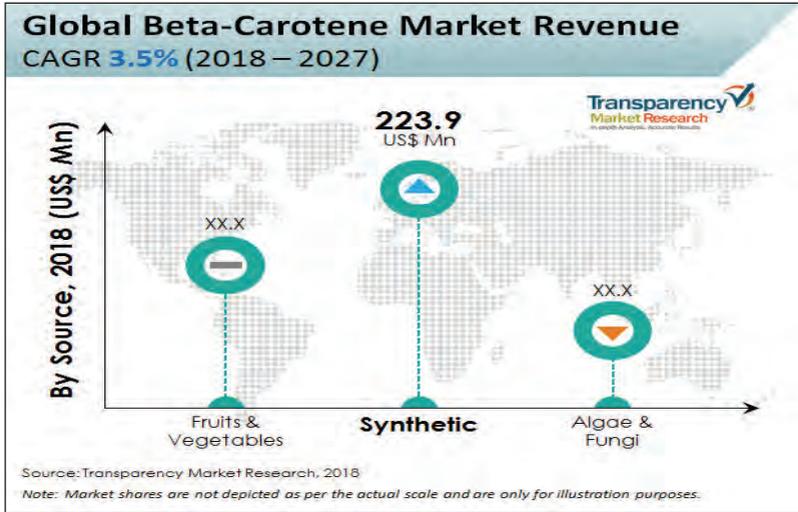
Sumber: Ribeiro dkk. (2011)

Gambar 2.5 Sintesis Beta Karoten Menggunakan Proses Kondensasi Wittig.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

karoten sebanyak 60%, sedangkan BASF dengan proses yang digunakannya mampu memproduksi sebesar 85% (Isler, 1971; Paust, 1994; Britton dkk., 1996). Pada umumnya, beta karoten yang berasal dari tanaman secara alami diperoleh dengan konsentrasi yang kecil, seperti alfa karoten, gama karoten, dan beberapa xantofil (Ishida & Chapman, 2009). Namun, eksplorasi dan perbaikan tanaman sumber beta karoten terus dilakukan

Mayoritas beta karoten yang dikomersialisasikan di dunia adalah melalui sintesis kimia dari beta-ionon (Raja, Hemaiswarays, & Rengasamy, 2007). Berdasarkan data laporan Transparency Market Research (2018), ilustrasi perkiraan pertumbuhan permintaan pasar beta karoten terus bertumbuh selama periode perkiraan 2018–2027, dan permintaan sumber beta karoten sintesis masih jauh lebih tinggi daripada sumber alami, seperti buah, sayur, dan bahkan menurun untuk sumber alga dan fungi (Gambar 2.6). Oleh karena itu, diharapkan akan banyak peluncuran produk-produk baru dengan bahan-bahan alami yang disukai dan digunakan dalam berbagai industri pengolahan, khususnya pengolahan makanan. Pasar karotenoid diproyeksikan tumbuh dari 1,5 miliar dolar AS pada 2019 menjadi 2 miliar dolar AS pada 2026. Hal ini disebabkan oleh peningkatan penggunaan karotenoid alami sebagai pewarna makanan dan inovasi dalam teknologi yang digunakan untuk ekstraksi karotenoid.



Keterangan: pembagian pasar tidak digambarkan sesuai skala sebenarnya dan hanya untuk tujuan ilustrasi.

Sumber: Transparency Market Research (2018)

Gambar 2.6 Pendapatan pasar beta karoten secara global meningkat sebesar 3,5% (2018–2027).

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

BAB III

Sumber dan Penyediaan Bibit Ubi Kayu Kaya Beta Karoten



Selama ini, ubi kayu yang umum dibudidayakan adalah ubi kayu berumbi putih, baik untuk pangan, pakan, maupun produk turunannya, terutama untuk tepung tapioka atau gaplek. Namun, dalam 20 tahun terakhir, ada perubahan paradigma tentang ubi kayu sebagai sumber pangan sehat bergizi sehingga penelitian terkait dengan ubi kayu berumbi kuning sebagai sumber dan kaya beta karoten serta pengembangan plasma nutfah dengan proses biofortifikasi sangat intens dilakukan (Ceballos dkk., 2017; Ayetigbo, dkk., 2018).

Ketertarikan untuk menanam ubi kayu berumbi kuning juga semakin meningkat seiring dengan pemahaman yang semakin baik tentang manfaat beta karoten pada umbi untuk kesehatan dan per-

Buku ini tidak diperjualbelikan.

mintaan untuk industri yang memanfaatkan ubi kayu dengan kandungan beta karoten yang lebih baik. Untuk itu, diperlukan koleksi dan identifikasi plasma nutfah ubi kayu berumbi kuning yang memiliki kandungan beta karoten lebih tinggi sebagai sumber dan penyediaan bibit untuk tujuan produksi ataupun perbaikan genetik tanaman. Bibit ubi kayu berumbi kuning yang baik digunakan untuk pangan fungsional adalah yang kandungan beta karotennya di atas nilai acuan label gizi (ALG) 10,8 ppm atau $\mu\text{g/g}$ karena dianggap sebagai sumber pangan berbeta karoten, atau di atas 21,6 ppm karena termasuk kaya beta karoten. Bibit dengan kandungan beta karoten di atas 10,8 ppm dapat digunakan sebagai sumber penyediaan bibit ubi kayu untuk pertanaman maupun pengembangan lebih lanjut lewat pemuliaan tanaman.

A. Ubi Kayu Kaya Beta Karoten Koleksi LIPI dan Lembaga Riset Lain

Ubi kayu berumbi kuning merupakan varietas atau genotip lokal ubi kayu yang secara alami memiliki kandungan karotenoid ataupun varietas berumbi kuning yang dikembangkan melalui proses biofortifikasi, yaitu proses peningkatan kandungan nutrisi tanaman pangan melalui proses pemuliaan, baik dengan teknik modern bioteknologi maupun praktik agronomi melalui persilangan (Saltzman dkk., 2013). Karotenoid berkontribusi terhadap variasi warna daging umbi pada ubi kayu. Variasi kandungan beta karoten pada ubi kayu berumbi kuning, umumnya, dalam bentuk *trans* beta karoten, mulai dari 1–100 $\mu\text{g/g}$ per berat basah.

Variasi kandungan beta karoten atau karotenoid ini menimbulkan variasi warna sehingga daging umbi bervariasi dari kuning tua ke oranye muda (Gambar 3.1). Namun, variasi warna ini tidak menggambarkan kuantitas beta karoten dalam daging umbi ubi kayu. Artinya, walaupun memiliki warna yang sama, belum tentu jumlah kandungan beta karotennya sama pula (Chavez dkk., 2000, 2005). Karakter warna

umbi bersifat stabil dan lebih dipengaruhi genotip/genetik daripada lingkungan tumbuh. Variasi warna umbi ubi kayu sangat tergantung pada ekspresi beberapa gen yang terkait dengan karotenoid, baik yang dominan penuh maupun sebagian (Ceballos dkk., 2017).

Awalnya, ubi kayu dari jenis berumbi kuning berasal dari daerah Amazon di Amerika Selatan, seperti Brasil, Kolombia, dan Peru. Ubi kayu berumbi kuning, seperti halnya yang berumbi putih, kemudian menyebar ke negara-negara lain, terutama negara beriklim tropis di Asia dan Afrika, baik pada periode kolonialisasi Eropa maupun melalui kerja sama dengan lembaga riset ubi kayu dunia, salah satunya dengan Centro Internacional de Agricultura Tropical/The International Center for Tropical Agriculture (CIAT) di Kolombia. Kolombia bukan penghasil ubi kayu terbesar di dunia. Namun, lembaga riset yang bermarkas di negaranya, yaitu CIAT, memiliki koleksi ubi kayu yang sangat lengkap di dunia dan secara aktif mengembangkan varietas baru dan menyebarkannya ke negara lain. Sebagai contoh, CIAT telah mengirimkan 53 elite bibit ubi kayu yang sebagiannya berumbi kuning untuk pengembangan ubi kayu di Filipina (Mariscal, Bergantin, & Troyo, 2001).



Keterangan: A) Variasi Warna Umbi Berdasarkan Daftar Deskriptor Ubi Kayu; B) Variasi Warna Umbi Ubi Kayu dari Genotip Lokal Indonesia

Sumber: Fukuda dkk. (2010); Angraini dkk. (2009)

Gambar 3.1 Variasi warna umbi ubi kayu dipengaruhi kandungan karotenoid

Banyak lembaga riset ubi kayu atau bank gen yang secara aktif mengoleksi ubi kayu yang ada di dunia. CIAT di Kolombia mengonservasi 6.155 aksesi ubi kayu yang berasal dari 22 negara, di mana 5.690 berasal dari ubi kayu spesies *Manihot esculenta* dan 465 berasal dari kerabat liarnya, dan semuanya selain di lapang juga dikoleksi dalam bentuk *in vitro*. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária/ The Brazilian Agricultural Research Corporation (Embrapa) di Brasil memiliki jumlah koleksi sebesar 4.000 aksesi ubi kayu. The International Institute of Tropical Agriculture (IITA)_di Nigeria mengoleksi dan memelihara 2.544 nomor koleksi yang berasal dari 28 negara.

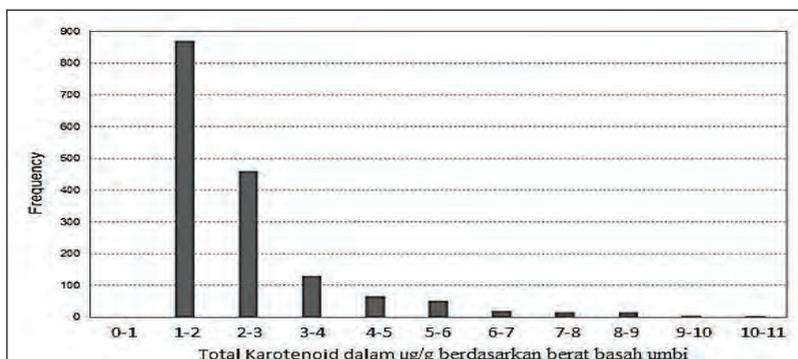
Dari koleksi ubi kayu CIAT yang sangat beragam tersebut, 37% berasal dari Kolombia, 24% berasal dari Brasil, 21% berasal dari negara-negara di Amerika Selatan, 7% dari Amerika Tengah dan Karibia, serta 7% dari Asia. Sementara plasma nutfah ubi kayu yang berasal dari Afrika dikonservasi di bank gen di Nigeria. Beberapa ubi kayu berumbi kuning yang dimiliki CIAT, di antaranya CE-373, CE-314, CE-303, CE-358, CE-352, CE-356, CE-350, CE-4, CE-117, CE-175, CE-169, CE-93, CE-554, CE-499, CE-562, CE-51, CE-560, CE-618, CE-451, CE-461, dan CE-507 (Rajendran dkk., 1993). Namun, informasi plasma nutfah berumbi kuning secara spesifik, terutama jumlah koleksi dan kandungan beta karotennya, baru terbatas pada plasma nutfah ubi kayu yang telah dipublikasi atau dieksploitasi lebih intensif.

Studi yang komprehensif tentang kandungan beta karoten pada ubi kayu berumbi kuning telah dilakukan menggunakan 1.789 nomor koleksi ubi kayu yang diseleksi dari 2.457 ubi kayu dalam penelitian. Dari penelitian ini, diperoleh informasi tentang kandungan karotenoid ubi kayu yang bervariasi dari 1,02–10,40 µg/g berdasarkan berat basah umbi menggunakan pengukuran berdasarkan spektrofotometri atau HPLC (Ceballos dkk., 2017).

Hasil analisis distribusi frekuensi kandungan karotenoid pada 1.789 genotip ubi kayu menunjukkan bahwa sebagian besar ubi kayu (lebih dari 850 genotip) memiliki kandungan karotenoid sekitar 1–2 $\mu\text{g/g}$, lalu diikuti oleh kandungan karotenoid 2–3 $\mu\text{g/g}$. Sementara itu, genotip yang memiliki karotenoid 10–11 $\mu\text{g/g}$ sangat terbatas, tidak lebih dari 10 genotip, seperti tampak dalam Gambar 3.2 (Ceballos dkk., 2017). Ini membuka peluang pengembangan dan perbaikan ubi kayu kaya beta karoten melalui aplikasi bioteknologi yang akan dibahas lebih lanjut di Bab IV.

Tabel 3.1 menyajikan status keberadaan ubi kayu berumbi kuning di beberapa lembaga riset yang ada di dunia, termasuk Indonesia. Ubi kayu berumbi kuning tersebut dimanfaatkan untuk pangan, pakan, industri pati, *biofuel*, dan pembuatan tepung mocaf kaya beta karoten. Di antara sifat yang ingin dikembangkan adalah tinggi beta karoten, tinggi *dry matter content* (DMC) dan pati, dan tinggi daya hasil. Secara umum, kandungan beta karotennya berada pada *range* hingga 1–11 ppm atau $\mu\text{g/g}$.

Indonesia melalui LIPI telah mengidentifikasi beberapa ubi kayu berumbi kuning, di antaranya Mentega 1, Mentega 2, Carvita 25, Adira 1, Lombok 1, Bokor, Nangka, dan Mentega Cibanon dengan kan-



Sumber: Ceballos dkk. (2017)

Gambar 3.2 Frekuensi Distribusi 1.789 Genotip Ubi Kayu terhadap Kandungan Total Karotenoid

dungan beta karoten yang bervariasi. Carvita 25 dan Mentega 2 merupakan jenis ubi kayu dengan kandungan beta karoten cukup tinggi. Carvita 25 dikembangkan melalui induksi varian somaklonal dari induk Adira 4. Sementara itu, Adira 1 merupakan varietas ubi kayu nasional yang telah dirilis oleh Kementerian Pertanian Republik Indonesia. Jenis plasma nutfah yang menjadi sumber atau kaya beta karoten merupakan salah sumber pangan yang memiliki manfaat besar, tidak hanya untuk kesehatan, tetapi juga bermanfaat untuk pengembangan pangan fungsional berbasis nutrisi beta karoten, salah satunya untuk mendukung industri mocaf yang berfungsi sebagai sumber atau kaya beta karoten.

Tabel 3.1 Jenis Ubi Kayu Kaya Beta Karoten/Karotenoid dari Lembaga Riset di Berbagai Negara

Negara Asal	Lembaga	Genotip/Varietas	Kandungan Beta Karoten/ Total Karotenoid	Penggunaan	Referensi
Amerika					
Kolombia	CIAT-CGIAR	CE- 373, CE-314, CE-303, CE-358, CE-352, CE-356, CE-350, CE-4, CE-117, CE-175, CE-169, CE-93, CE-554, CE-499, CE-562, CE-51, CE-560, CE-618, CE-451, CE-461, CE-507	65–670 IU		Rajendran dkk. (1993)
Brasil	Embrapa	1456 – Vermelhinha; 1153 – Klainasik; 1668 – Cacau amarelo; 1692 – Dendê; 1721 – Aipim cacau; Híbrido 14-08 and, Híbrido 14-11, 61- Crueira, 878-Cachimbo I, 893 Imari III, 949 Pretinha II, 991 - IM 222 Juba, 1138 - IM 147, 1140 - IM 217, 1700 Varejão,	1,99–8,11 µg/g/2,64-14,15 µg/g	Pangan	Carvalho dkk. (2012); Oliveira dkk. (2010)

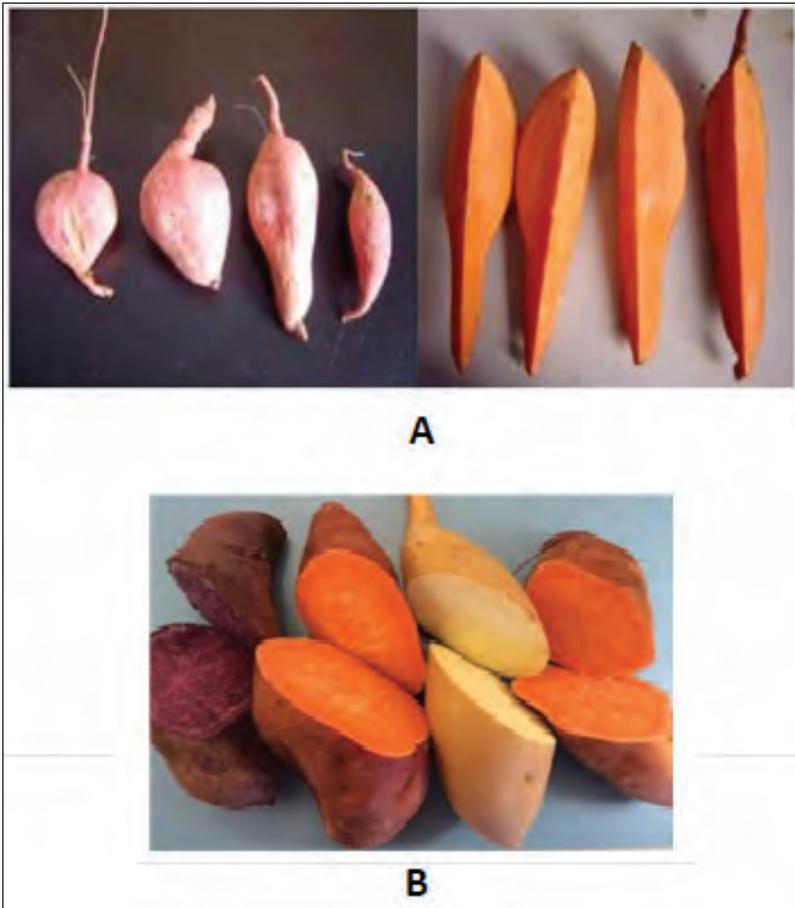
Buku ini tidak diperjualbelikan.

Negara Asal	Lembaga	Genotip/Varietas	Kandungan Beta Karoten/ Total Karotenoid	Penggunaan	Referensi
		1704 - IM 936 Caniço, 1705 Juriti, 1711 Arari, 1785 Flor do Brasil 1783, 1757 Anajazinha, 1752 Flor do Brasil1, 1740 Najacaiá, dan 1751 Bonita			
Amerika	USDA	GM905 (dari CIAT)		Pangan	La Franco dkk. (2013)
Asia					
Indonesia	LIPI	Adira 1, Mentega 1, Mentega 2, Carvita 25, Lombok 1, Bokor, Nangka, Budin Kuning, Budin Mentega, Mentega Cibanon	11–26 µg/g	Pangan, pati, tepung, mocaf	Hartati dkk. (2012); Anggaini dkk. (2009)
	Balitkabi	Adira 1		Pangan, pati	
India	CTCRI	Sree Visakhm, NTA, Ambakkadan, Kaliyan, Kandhari padarppan; Narukku I,II,III; Kalikalan		Pangan	Vimala dkk. (2009)
China Selatan	CATAS	SC9, SC 10		Pati, biofuel	Gu dkk. (2013)
Afrika					
Nigeria	IITA	95/0379, 98/2132, 00/0028, 00/0093, 01/1172, 01/1181, 01/1206, 01/1231, 01/1296, 01/1380, 01/1404, 01/1417, 01/1423, 01/1551, 01/1560, 01/1635, 01/1659, 99/2987, 99/7578, Z97/0474, TMS1011412, TMS1011368, TMS1011371, TMS1070593 and TME419	Karotenoid 1,34–7,3 µg/g	Tepung	Maziya-Dixon dkk. (2005); Olaiya dkk. (2016)

Negara Asal	Lembaga	Genotip/Varietas	Kandungan Beta Karoten/ Total Karotenoid	Penggunaan	Referensi
Nigeria	NCRI	UMUCASS 36, 37, 38, and 98/2132	8,34 µg/g	Tepung, Gari, Tepung, Fufu, bubur	Ukenye dkk. (2013); Omodamiro dkk. (2012)
Nigeria	Harvest Plus	TMS 01/1371, 01/1412, 01/1368, 07/0593, 07/0539, 07/0220	7–11 µg/g	Pangan	Ilona dkk. (2017)
Nigeria	NCRI	NR 07/0427, 07/0432, 07/0326, 07/0506, 07/0497, 07/0499	0,528–3,876 µg/g	Tepung, pati, roti, cake, keripik, krim Salad	Aniedu, dan Omodamiro (2012)
Nigeria	NCRI	NR11/0063, NR11/0123 and NR11/0140	8,72–10,47 µg/g	Tepung, pati, pangan	Edoh dkk. (2016)

Selain ubi kayu, studi yang komprehensif tentang kandungan beta karoten dari umbi lain sudah dilakukan terlebih dahulu pada ubi jalar. Ubi jalar merupakan salah satu sumber pangan yang sangat kaya beta karoten, terutama ubi jalar berwarna oranye tua (Gambar 3.3). Banyak laporan terdahulu yang menyebutkan nilai kandungan beta karoten pada ubi jalar, di antaranya Tumuhimbise, Namutebi, dan Muyonga (2009), yang menyebutkan hingga 276,98 µg/g. Sebelumnya, Takahata, Noda, dan Nagata (1993) telah menganalisis 22 varietas ubi jalar dari berbagai negara dan menemukan bahwa ubi jalar komersial yang berwarna kuning hingga oranye tua mengandung beta karoten yang bervariasi dari 11–266 mg/g. Jaarsveld dkk. (2006) melaporkan varietas Resisto mengandung beta karoten sebesar 203 mg/g.

Almeida-Muradian dan Penteadó (1992) menyebutkan kandungan beta karoten kultivar ubi jalar dari Brasil yang bervariasi 0,1–218 mg/g. K'osambo dkk. (1998) mengevaluasi kandungan beta karoten 17 kultivar yang bervariasi 1–80 mg/g. Dari 32 kultivar yang dianalisis,



Keterangan: A) Variasi Ubi Jalar Berwarna Oranye dari China B) Variasi Warna pada Ubi Jalar secara Umum

Sumber: Wu dkk. (2008); Cindy (2016)

Gambar 3.3 Variasi Warna Ubi Jalar

Hagenimana dkk. (1999) memperoleh variasi beta karoten 1–63 mg/g. Huang, Tanudjaja, dan Lum (1999) melaporkan pada koleksi ubi jalar di China, variasi beta karotennya 67–131 mg/g untuk 7 ubi jalar berumbi oranye (Gambar 3.3), 6 mg/g pada 7 pada ubi jalar kuning/putih, dan 1–5 mg/g pada ubi jalar ungu. Karotenoid yang ada pada ubi jalar adalah *trans* beta karoten dan hanya 1% 13-*cis*-beta karoten (Jaarsveld dkk., 2006).

Banyak jenis ubi jalar yang telah dikoleksi dan dikembangkan oleh berbagai lembaga riset. Banyak juga yang sudah dilepas menjadi varietas nasional dan dimanfaatkan sebagai sumber pro vitamin A. Tabel 3.2 menunjukkan beberapa varietas ubi jalar kaya beta karoten yang telah dilepas di beberapa negara (Takahata dkk., 1993). Amerika termasuk salah satu negara yang telah melepas cukup banyak varietas ubi jalar kaya beta karoten. Varietas-varietas ini memiliki kandungan kaya beta karoten 1,1 mg/100 g hingga 26,5 mg/100 g atau dari 11 µg/g hingga 265 µg/g.

Beberapa varietas ubi jalar yang ditemui di Amerika dengan kandungan beta karoten yang tinggi adalah SPV-61, Resisto, L-2-116, L-489, Caromex, Red Jewel, dan Heart Gold. Selain ubi jalar yang sudah dilepas menjadi varietas, lembaga riset lain di dunia, termasuk Indonesia, India, Bangladesh, dan China (Tabel 3.3), juga melakukan koleksi ubi jalar berwarna kuning hingga oranye untuk mengembangkan varietas baru. Indonesia, misalnya, mengembangkan varietas ubi jalar kaya beta karoten yang diberi nama Beta 1 dan Beta 2 dan sudah dilepas menjadi varietas nasional (Balitkabi, 2015).

Tabel 3.2 Variasi Kandungan Beta Karoten pada Varietas Ubi Jalar Komersial di Beberapa Negara

Kultivar	Negara	Beta Karoten (µg/g)
SPV-61	Amerika	265
Resisto	Amerika	203
UC 700	Venezuela	189
Benihayato	Jepang	187
L-2-116	Amerika	185
L-4-88	Amerika	185
Santo Amaro	Brasil	155
Caromex	Amerika	149
Red Jewel	Amerika	138
Benihayato mutan	Jepang	117
Heart Gold	Amerika	99
SPV-67	Amerika	98
AIP 587	Papua Nugini	98

Kultivar	Negara	Beta Karoten ($\mu\text{g/g}$)
AIP 326	Papua Nugini	80
Kyukei 114	Jepang	75
Unit 1 Puerto Riko	Amerika	69
Georgia Jet	Amerika	69
W-36	Amerika	55
Okinawa	Jepang	23
SPV-43	Amerika	13
P1208886	Amerika	11

Sumber: Takahata dkk. (1993)

Tabel 3.3 Koleksi dan Pengembangan Varietas Ubi Jalar Kaya Beta Karoten di Beberapa Lembaga Riset di Berbagai Negara

Negara Asal	Lembaga	Genotip/Varian	Kandungan Beta Karoten/ Total Karotenoid	Penggunaan	Referensi
Indonesia	Balitkabi	Beta 1, Beta 2	70–140 $\mu\text{g/g}$	Pangan	Balitkabi (2015)
India	CTCRI	KS-7, ST 141, ST 1416, ST 1434, ST 1449, ST 146, ST 149, SV 317, SV 322	75–155 / 5,9–13,6 $\mu\text{g/g}$	Pangan	Vimala, Nam-bisan, dan Hariprakash (2011)
Bangladesh	TCRC-BARI	Kamalasundari	45 $\mu\text{g/g}$	Pangan	Islam dkk. (2016)
China	Xuzhou Sweet Potato Research Center	Jl)3314, Jl 03468, Nanzi 8, S01009, Sushu No. 8, Xushu 22-5 Xushu 23, Yanshu No. 5, 1172, 200730	0,6–231 $\mu\text{g/g}$	Pangan	Wu dkk. (2008)

B. Sumber Bibit Ubi Kayu Kaya Beta Karoten

Untuk menghasilkan ubi kayu unggul atau umbi unggul lainnya, diperlukan ketersediaan sumber bibit dari plasma nutfah yang terse-

leksi dengan karakter yang diinginkan. Konsep dasar untuk pemuliaan adalah menghasilkan generasi atau varian jenis baru yang memiliki keunggulan dan performa lebih baik daripada generasi terdahulu. Dalam program pemuliaan ubi kayu atau umbi lokal berumbi kuning, perlu dilakukan seleksi dan kuantifikasi untuk mengukur konsentrasi karotenoid atau beta karoten untuk memungkinkan pemulia menyeleksi dan membuat pilihan berdasarkan konsentrasi karotenoid/beta karoten. Hal ini perlu didukung oleh metode penentuan beta karoten yang akurat. Plasma nutfah tinggi beta karoten yang telah diseleksi, seperti yang terdapat pada bank gen yang ada di beberapa negara, dapat digunakan secara langsung sebagai sumber untuk memperbanyak bibit.

Pemuliaan atau pengembangan sumber bibit dapat dilakukan dengan teknik konvensional melalui proses persilangan dengan tetua unggul atau dengan rekayasa bioteknologi. Teknik konvensional melalui persilangan untuk memproduksi bibit ubi kayu kaya karoten atau beta karoten merupakan salah satu metode biofortifikasi ubi kayu yang dilakukan dengan cara menyilangkan beberapa ubi kayu yang mengandung beta karoten tinggi sehingga diperoleh benih atau biji dari genotip baru dengan karakter yang unik dan lebih unggul. Kemudian, benih-benih hasil persilangan ditanam lagi, lalu dievaluasi kandungan beta karotennya. Benih terbaik diseleksi sebagai sumber bibit baru kaya beta karoten atau disilangkan kembali untuk menambahkan beberapa karakter unggul lainnya, seperti daya hasil tinggi, kandungan pati tinggi, atau karakter lain yang sesuai dengan preferensi konsumen, seperti *dry matter content* (DMC) yang tinggi dan potensi sianogenik yang rendah, terutama pada konsumen yang mengonsumsi ubi kayu dengan cara direbus. Ubi kayu yang secara alami mengandung karoten memiliki kelebihan lain selain keunggulan nutrisi karoten, umumnya yang berbeta karoten tinggi memiliki potensi daya simpan yang lebih baik. Kandungan karoten yang tinggi dapat meningkatkan daya simpan ubi kayu karena adanya molekul beta ionon



yang diperoleh dari proses katabolisme beta karoten (Ceballos dkk., 2017).

CIAT melakukan banyak persilangan untuk menghasilkan sumber bibit baru ubi kayu beta karoten yang kemudian disebarakan ke seluruh dunia (Talsma, 2014), termasuk ke Nigeria. International Institute of Tropical Agriculture (IITA) di Nigeria mendapatkan material ubi kayu beta karoten dari CIAT Kolombia yang kemudian dikembangkan untuk merakit varietas baru di Nigeria. Varietas ubi kayu kuning yang dimiliki Nigeria sebelumnya memiliki kandungan beta karoten dengan kisaran 6 $\mu\text{g/g}$ per berat basah. Lewat program Harvest Plus, Nigeria telah mengembangkan dan merilis varietas baru TMS 01/1371, 01/1412, 01/1368, 07/0593, 07/0539, 07/0220 yang memiliki kisaran beta karoten 7–11 ppm atau $\mu\text{g/g}$. Saat ini tengah dilakukan pemuliaan untuk meningkatkan beta karoten hingga 15 $\mu\text{g/g}$ per berat basah. (Talsma, 2014; Njoku dkk., 2011; Ilona dkk., 2017).

Sebelumnya, Carvalho dkk. (2013) meneliti potensi kandungan karoten pada plasma nutfah ubi kayu di Brasil dan korelasinya terhadap kandungan protein. Carvalho menyebutkan bahwa ubi kayu yang tinggi karotenoid juga memiliki kandungan protein yang tinggi sehingga peningkatan kandungan protein ubi kayu dapat dilakukan melalui seleksi klon ubi kayu yang tinggi karoten. Karakter ubi kayu tinggi beta karoten dan protein sangat penting untuk pemuliaan. Namun, selain dua karakter tadi, pengembangan varietas ubi kayu untuk konsumsi langsung harus diikuti dengan parameter disukai oleh konsumen ubi kayu. Preferensi konsumen dipengaruhi oleh *dry matter content* (DMC) karena memengaruhi tekstur ubi kayu, terutama untuk ubi kayu yang disajikan dengan cara direbus sehingga parameter kandungan DMC juga perlu dipertimbangkan untuk pemuliaan. Sementara itu, untuk industri perlu tambahan karakter tinggi pati atau daya hasil tinggi.

Ubi kayu asal Indonesia yang dapat dikembangkan sebagai sumber perbanyakkan bibit ubi kayu berbета karoten adalah varietas Nasional Adira 1, varietas Carvita 25, genotip Mentega 2, Bokor, atau Nangka. Selain karena kandungan beta karoten yang lebih baik, juga karena daya hasil yang cukup tinggi (rata-rata di atas 25 ton/ha). Sementara itu, hampir semua jenis ubi jalar yang dikenal memiliki kandungan beta karoten di atas acuan label gizi 21,6 ppm atau $\mu\text{g/g}$ (Tabel 3.2 dan 3.3) sehingga dapat digunakan sebagai sumber untuk perbanyakkan bibit ubi jalar kaya beta karoten. Beta-1 dan Beta-2 merupakan varietas nasional ubi jalar yang dapat digunakan sebagai sumber untuk perbanyakkan bibit. Selain karena kaya akan kandungan beta karoten (70–140 ppm), varietas ini juga memiliki potensi daya hasil umbi yang cukup tinggi (35 t/ha), dan umur panen genjah, yaitu 4–4,5 bulan (Balitkabi, 2015).

C. Penyediaan Bibit Ubi Kayu Kaya Beta Karoten

1. Penyediaan Bibit Secara Konvensional

a. Stek Biasa

Umumnya, ubi kayu diperbanyak menggunakan stek batang karena lebih mudah dan karakternya relatif seragam. Perbanyakkan dengan biji kurang disukai karena turunannya cenderung memiliki tingkat heterozigositas yang tinggi dan beragam dibandingkan induk atau stek asalnya. Umur panen ubi kayu umumnya 8–12 bulan sehingga untuk produksi dan penyediaan bibit stek yang cukup dan berkualitas baik, diperlukan strategi budi daya ubi kayu yang berkelanjutan dan bertujuan khusus untuk produksi bibit. Ada empat hal yang perlu dipertimbangkan dalam produksi stek. *Pertama*, penanaman secara berkala dengan waktu yang tepat sehingga bibit stek sudah memiliki umur yang cukup saat dibutuhkan. *Kedua*, sumber bibit harus bebas penyakit dan mendapat asupan nutrisi. *Ketiga*, pemupukan yang cukup untuk memaksimalkan pertumbuhannya sehingga kualitas batang yang dihasilkan lebih baik. *Keempat*, stek ubi kayu mudah

kering dan tidak bisa disimpan dalam jangka waktu yang lama. Oleh karena itu, untuk menjaga kualitas stek, stek perlu dipelihara dalam bentuk pertanaman dan tinggal dipotong-potong saat dibutuhkan. Di Afrika, penyediaan bibit ubi kayu dari jenis ubi kayu tinggi beta karoten dilakukan dengan melibatkan petani. Bibit-bibit ini tidak dijual. Namun, jika ada petani yang membutuhkan bibit, petani yang menanam lebih awal dapat menyediakan sumber bibit untuk petani yang menanam lebih akhir (Ilona dkk., 2017).

Untuk penyediaan bibit, lahan yang digunakan untuk produksi stek perlu diolah terlebih dahulu dengan dibersihkan dari tanaman lain, lalu dibajak sehingga lebih gembur, baru dilanjutkan dengan penanaman stek ubi kayu. Setelah stek ditanam, dibuat bedengan atau guludan. Ada beberapa hal yang perlu diperhatikan untuk persiapan stek, di antaranya pertumbuhan tunas stek dipengaruhi oleh genotip atau varietas ubi kayu, umur tanaman, penyimpanan stek, dan lingkungan tumbuh. Oleh karena itu, stek yang dipersiapkan harus berumur cukup, yaitu berumur 8–12 bulan dengan diameter lebih kurang 2 cm dan umur seragam. Umur yang terlalu muda kurang baik untuk sumber bibit dan akan memengaruhi kualitas stek. Stek yang muda akan cepat kering saat ditanam. Selain itu, jumlah stek yang dihasilkan dari batang muda juga masih sedikit (3–4 stek). Sementara itu, pada umur ubi kayu di atas 12 bulan setelah tanam, kualitas stek menurun karena stek terlalu tua, dengan diameter stek >3 cm. Diameter stek yang terlalu besar, akan mempercepat transpirasi sehingga lebih cepat kering. Tanaman ubi kayu yang ideal digunakan sebagai sumber bibit adalah ubi kayu dengan diameter batang 2–3 cm dan tinggi minimal di atas 1 m.

Stek diambil dari bagian tengah batang ubi kayu, kemudian dipotong-potong dengan ukuran 20–25 cm. Namun, potongan dengan ukuran lebih kecil dengan 2–3 mata tunas (stek mini) juga memungkinkan untuk dilakukan. Sebaiknya, batang yang digunakan untuk sumber stek tidak disimpan lebih dari 30 hari karena akan cepat

mengering. Stek ukuran normal dapat langsung ditancapkan ke tanah untuk penanaman, sementara stek mini ditanam dengan posisi tidur. Stek ditanam di lapangan dengan jarak tanam $100 \times 80 \text{ cm}^2$ (12.500 stek), $100 \times 75 \text{ cm}^2$ (13.350 stek), atau jarak rapat $80 \times 50 \text{ cm}^2$ (25.000 stek per hektar), dan $50 \times 50 \text{ cm}^2$ (40.000 stek per hektar). Pemupukan dapat menggunakan pupuk kandang saat pembuatan guludan (5–10 t/ha), lalu pupuk dasar (100 kg Urea, 100 kg SP36, 50 kg KCl per ha) diberikan 1 bulan setelah tanam dengan ditugalkan pada jarak 10–15 cm dari pangkal batang. Karena ubi kayu tidak dapat berkompetisi dengan gulma di awal pertumbuhannya, pada periode antara 5–10 minggu setelah tanam perlu dilakukan pendangiran dan pembersihan lahan. Jika gulma tidak dikendalikan selama periode kritis tersebut, produktivitas ubi kayu dapat menurun hingga 75% dibandingkan kondisi bebas gulma. Pengendalian gulma dilakukan pada 2 tahap, yaitu pada umur 4–5 minggu setelah tanam dan 8 minggu setelah tanam.

Produksi stek sangat tergantung pada varietas atau genotip ubi kayu serta jarak tanam yang digunakan. Pada varietas yang mempunyai batang yang tinggi, jumlah stek yang dihasilkan akan lebih banyak dibandingkan varietas berbatang pendek. Demikian pula jika ubi kayu ditanam rapat (di bawah $80 \times 80 \text{ cm}$), jumlah bibit yang dihasilkan akan lebih banyak dibandingkan apabila ditanam pada jarak tanam yang normal (Tabel 3.5). Sebaiknya, bibit/stek yang sudah dipanen segera ditempatkan secara tegak dalam posisi terbalik di tempat yang teduh dan terlindung dari panas matahari secara langsung sebelum dipotong-potong agar batang ubi kayu tidak kering. Penundaan penanaman stek 2–4 minggu dari saat stek dipanen akan menurunkan kualitas bibit karena air dalam stek sudah berkurang dan hal ini akan berdampak pada terganggunya daya tumbuh maupun vigor tanaman.

Tabel 3.4 menggambarkan potensi produksi bibit dari berbagai varietas nasional yang telah dilepas oleh Kementerian Pertanian

Republik Indonesia. Dari tabel tersebut terlihat bahwa Malang (MLG) 0311 memiliki potensi produksi bibit yang cukup besar dibandingkan varietas ubi kayu yang lain. Sementara itu, Tabel 3.5 menyajikan potensi produksi bibit ubi kayu dari berbagai jenis ubi berumbi kuning yang dimiliki oleh Puslit Bioteknologi LIPI di daerah Muara. Kontrol Adira 4 yang digunakan sebagai pembanding menunjukkan bahwa produksi bibit Adira 4 lebih rendah dibandingkan yang telah dipublikasi Kementerian Pertanian RI. Selain jenis ubi kayu yang digunakan, kesuburan/pemilihan lahan produksi bibit merupakan salah satu faktor yang memengaruhi jumlah produksi bibit. Kemungkinan, jika ubi kayu Adira 4 dan ubi kayu berumbi kuning lain koleksi LIPI ditanam dilahan yang sama dengan lahan penanaman ubi kayu varietas nasional yang dikeluarkan oleh Kementerian Pertanian, produksi stek ubi kayu bisa lebih tinggi.

Tabel 3.4 Potensi Produksi Stek Beberapa Varietas Ubi Kayu Nasional pada Kepadatan Populasi Berbeda yang Dikeluarkan oleh Kementerian Pertanian

Populasi Tanaman/ Ha	Produksi stek/bibit per hektar pada beberapa varietas nasional					
	UJ-5	MLG 0311	Adira -4	Malang-6	Malang-4	Rata-rata
12.500	91.203	123.148	81.944	120.37	104.629	104.259
25.000	183.333	231.944	178.703	218.981	201.851	202.963
40.000	332.870	388.425	278.240	410.648	365.74	355.185

Tabel 3.5 Potensi Produksi Stek pada Beberapa Jenis Ubi Kayu Kuning Koleksi LIPI yang Ditanam di Daerah Muara, Bogor

Produksi Stek pada Beberapa Jenis Ubi Kayu	Populasi Tanaman/ha		
	12.500	25.000	40.000
Kontrol Adira 4	53.250	106.500	170.400
Mentega 2	58.500	117.000	187,200
Carvita 25	33.750	67.500	108,000
Adira 1	45.500	91.000	145.600

b. Sambung Mukibat/*Grafting*

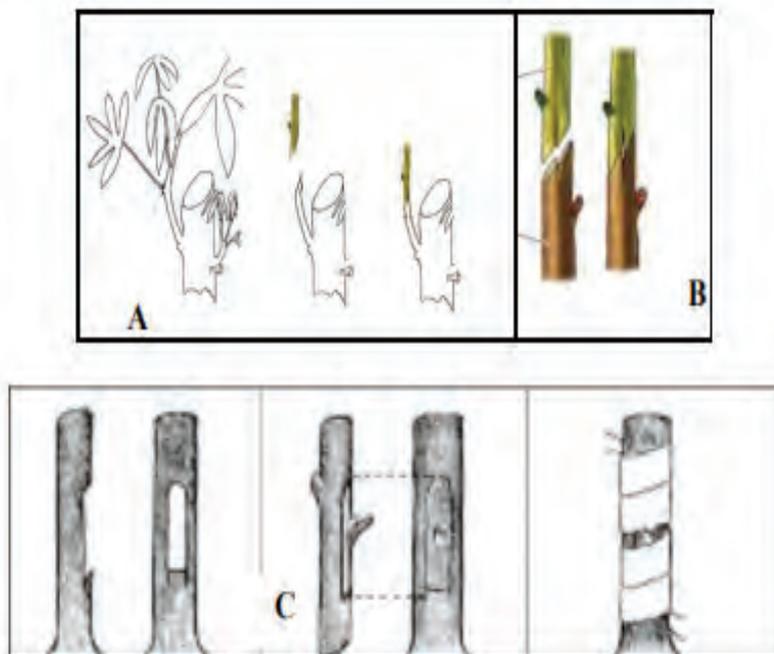
Penyediaan bibit ubi kayu juga dapat dilakukan dengan sambung mukibat atau teknik *grafting*. Biasanya, cara ini ditujukan untuk mengubah vigor atau performa dan meningkatkan produksi ubi kayu. Ubi kayu hasil *grafting* ini dilaporkan dapat mencapai produksi hingga 100 ton per hektar. Teknik Mukibat ini memungkinkan daya hasil per pohon hingga 30 kg umbi, sementara ubi kayu biasa tanpa *grafting* lebih kurang 5–10 kg (Guritno dkk., 1984). Penyediaan bibit dilakukan dengan menyambungkan dua jenis ubi kayu, biasanya bagian bawah atau *rootstock* adalah ubi kayu yang produksinya tinggi dengan bagian atas atau *scion*. Penerapan teknik ini akan sangat menguntungkan petani-petani kecil dengan luas lahan di bawah satu hektar.

Efisiensi *grafting* merupakan salah satu faktor paling penting untuk menilai keberhasilan produksi bibit dengan *grafting* ubi kayu. Teknik ini telah dilakukan untuk memproduksi bibit Adira 1 dan Mentega 2 yang berumbi kuning dengan kandungan beta karoten yang cukup tinggi (Hartati & Hartati, 2016). Ada tiga metode *grafting* yang digunakan untuk produksi bibit ini, yaitu *grafting* pucuk, *grafting* tunas, dan *grafting* batang (Gambar 3.4). Namun, yang paling tinggi tingkat keberhasilan penyambungannya adalah teknik *grafting* pucuk (98,3%), lalu diikuti dengan *grafting* batang (71,6), dan tunas (48,3%). Metode *grafting* pucuk juga lebih mudah dibandingkan metode lain. Teknik *grafting* yang memberi pengaruh paling besar untuk pertumbuhan umbi adalah *grafting* pucuk. Pengamatan daya sintas ubi kayu hasil *grafting* di lapang juga menunjukkan daya sintas ubi kayu hasil *grafting* pucuk lebih tinggi (91,6%) dibandingkan daya sintas *grafting* batang (81,8%) dan tunas (65,27%). Tingkat keberhasilan *grafting* pucuk yang lebih tinggi dibandingkan *grafting* batang dan *grafting* tunas disebabkan bagian yang disambungkan, yaitu *scion* dan *rootstock* ubi kayu masih muda. Ini memengaruhi kecepatan dan kemampuan ubi kayu untuk menempel dan menutup perlukaan lebih cepat. *Grafting* meningkatkan perolehan jumlah umbi dan daya hasil ubi

kayu. Dari tiga teknik *grafting* yang digunakan, *grafting* pucuk memberikan perolehan jumlah umbi dan daya hasil yang cukup besar dibandingkan *grafting* batang dan *grafting* tunas (Tabel 3.6).

Tabel 3.6 Pengaruh Teknik *Grafting* terhadap Pertumbuhan dan Daya Hasil Ubi Kayu Kayu

Metode Grafting	Tinggi (m)	Diameter (mm)	Jumlah Umbi	Berat Umbi (kg)
Kontrol	265,34±8,83 a	31,98±1,26a	5,53±0,36a	3339,47±376,99a
<i>Grafting</i> pucuk	270,28±7,05 a	33,57±1,18a	7,70±0,44b	5259,26±559,15b
<i>Grafting</i> batang	257,75±8,34 a	29,73±1,65a	6,92±0,42ab	3833,33±487,88ab
<i>Grafting</i> tunas	256,72±11,75 a	31,22±1,67a	6,36±0,83ab	4364,00±764,98ab



Keterangan: a) *Grafting* Pucuk, b) *Grafting* Batang, c) *Grafting* Tunas

Sumber: Hartati & Hartati (2016)

Gambar 3.4 Tiga Teknik *Grafting* Ubi Kayu

2. Penyediaan Bibit Melalui Kultur Jaringan

Kultur jaringan merupakan suatu teknik perbanyakan vegetatif tanaman dengan menggunakan sumber eksplan dari seluruh bagian tanaman berdasarkan prinsip totipotensi, seperti daun, batang, tangkai daun, tunas pucuk, akar, bunga, buah, ataupun dari kalus, yang diperbanyak pada media pertumbuhan yang mengandung makro dan mikronutrien, sumber karbon, dan zat pengatur tumbuh serta bahan pematid dalam lingkungan aseptik (*in vitro*) sehingga tanaman dapat tumbuh dan berkembang, berorganogenesis dan dapat beregenerasi menjadi tanaman. Penerapan teknik ini memungkinkan untuk produksi bibit dalam skala besar (Hussain dkk., 2012). Selain itu, teknik ini juga banyak diterapkan untuk penyediaan tanaman bebas dari virus (*virus-free*), preservasi untuk pelestarian jenis rekalsitran dan penyediaan bibit di luar musim, serta regenerasi klonal dan perbanyakan tanaman hasil perbaikan genetik secara bioteknologi melalui pembentukan embriogenesis somatik.

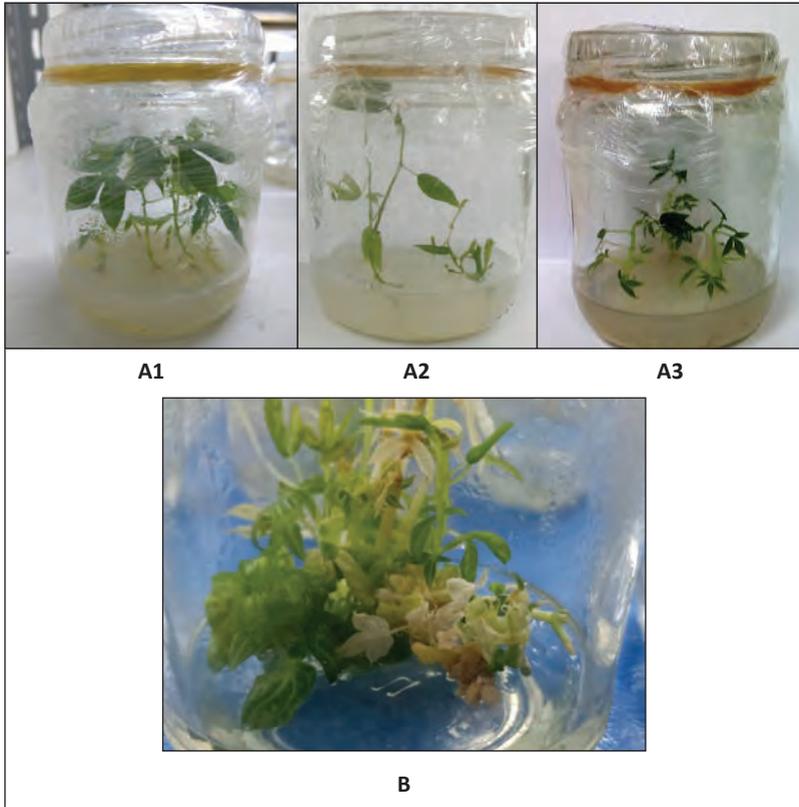
Beberapa tahapan dalam kultur jaringan, di antaranya, persiapan eksplan tanaman, penanaman eksplan di media pertumbuhan secara aseptik di laminar *air flow cabinet* (LAF), propagasi dan multiplikasi tunas, pembentukan *planlet* tanaman yang sudah berakar, dan aklimatisasi, yaitu penanaman *planlet* dari kondisi aseptik ke kondisi yang alami. Aklimatisasi dilakukan dengan mencuci *planlet* untuk menghilangkan sisa agar yang menempel, baru ditanam pada media tanah/pasir yang steril yang diberi sungkup untuk menjaga kelembapannya (Hussain dkk., 2012). Teknik perbanyakan tanaman secara kultur jaringan telah banyak diterapkan pada berbagai jenis tanaman, terutama tanaman yang komersial, seperti tanaman hias (*Anthurium*, krisan, anggrek, dll.); tanaman perkebunan, seperti kelapa sawit, kopi, karet, jati; pada hortikultura, seperti pisang, kentang, dan tanaman pangan, seperti ubi kayu, dan padi. Beberapa keuntungan penerapan kultur *in vitro* untuk perbanyakan tanaman adalah mendapatkan tanaman baru dalam jumlah banyak/tidak terbatas dengan waktu

perbanyak yang lebih cepat/singkat, tanaman yang dihasilkan seragam dengan mutu yang sama dengan induknya yang unggul, tidak membutuhkan ruangan yang luas, bebas penyakit, tidak tergantung musim, dan mengurangi biaya pemeliharaan (Hussain dkk., 2012).

a. Penyediaan Bibit Melalui Induksi Tunas Majemuk

Perbanyak bibit ubi kayu di LIPI umumnya dilakukan dengan perbanyak stek, sementara perbanyak *in vitro* dilakukan pada ubi kayu yang memiliki nilai ekonomi penting, salah satunya ubi kayu berumbi kuning yang dapat digunakan untuk mendukung industri mocaf kaya beta karoten. Salah satu faktor utama yang menentukan keberhasilan dalam perbanyak bibit kultur jaringan adalah munculnya tunas baru dari eksplan tanaman (Grozeva, 2015). Karena ditujukan untuk produksi bibit, diperlukan pembentukan tunas dalam jumlah banyak, biasanya melalui induksi tunas majemuk. Untuk pertumbuhan tunas biasa cukup diperbanyak pada media MS0 tanpa ZPT, tetapi untuk pembentukan tunas majemuk perlu ditambahkan ZPT (Gambar 3.5). ZPT yang umum digunakan untuk induksi tunas adalah dari golongan sitokinin, seperti BAP, BA, Kinetin, giberelin, zeatin, dan TDZ.

Perbanyak bibit ubi kayu melalui induksi tunas majemuk dilakukan dengan menanam eksplan tanaman di media MS, dengan penambahan ZPT. Fitriani, Rahman, dan Hartati (2017) menyebutkan bahwa penggunaan BAP 0,4 mg/L dengan penambahan CuSO₄ 1–4 mg/L dapat meningkatkan pembentukan tunas majemuk pada genotip ubi kayu berumbi kuning, yaitu Mentega 2 dan Ubi Kuning. Peningkatan konsentrasi CuSO₄ mempercepat pertumbuhan tunas, tetapi memperlambat multiplikasi tunas majemuk. Konsentrasi CuSO₄ sebesar 4 uM menghasilkan jumlah tunas paling banyak.



Keterangan: A) Perbanyakan bibit tanpa induksi tunas majemuk di media MS, pada beberapa genotip ubi kayu umbi kuning, yaitu: (A1) Ubi Kuning, (A2) Mentega 2 dan (A3) Adira 1. B) Perbanyakan bibit melalui induksi tunas majemuk dengan perlakuan ZPT pada Mentega 2.

Sumber: Fitriani dkk. (2017); Lab. GMMJBT (2019)

Gambar 3.5 Perbanyakan Bibit Ubi Kayu Tanpa dan Melalui Induksi Tunas Majemuk

b. Embriogenesis Somatik untuk Penyediaan Bibit Ubi Kayu Kaya Beta Karoten

Penyediaan bibit ubi kayu, termasuk ubi kayu kaya beta karoten, dalam jumlah besar juga dapat dilakukan secara *in vitro* melalui pembentukan embriogenik somatik. Embriogenesis somatik merupakan suatu metode regenerasi tanaman untuk propagasi klonal yang banyak

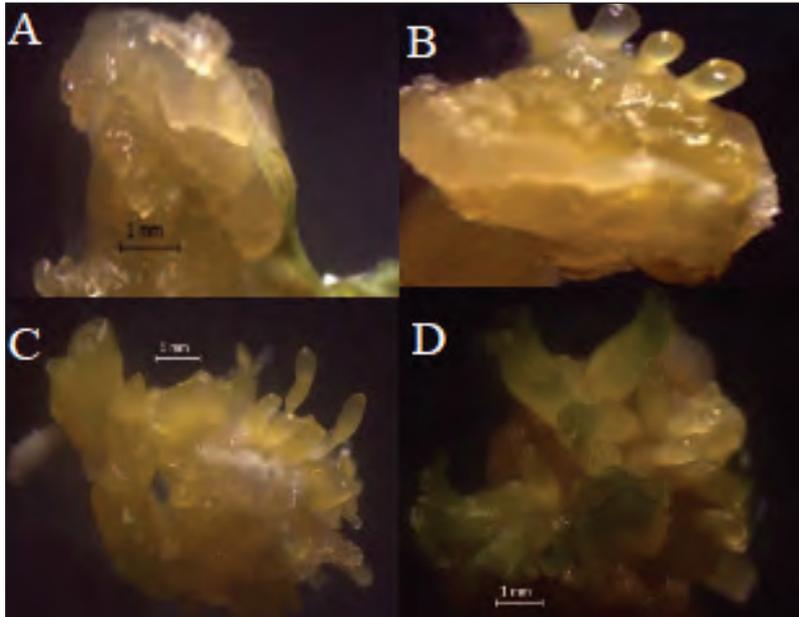
diterapkan pada bioteknologi tanaman. Perbanyakan klonal tanaman melalui embriogenesis somatik terjadi melalui proses sel-sel somatik (baik haploid maupun diploid) yang berkembang membentuk tumbuhan baru melalui tahapan perkembangan embrio yang spesifik tanpa melalui fusi gamet (sel zigotik). Embrio zigotik dan somatik memiliki karakteristik tahapan perkembangan yang sama, kecuali pada tahap yang paling awal, karena berasal dari dua jenis sel yang berbeda (Hussain dkk., 2012). Keuntungan menggunakan teknik ini untuk perbanyakan bibit adalah 1) waktu perbanyakan lebih cepat; 2) pencapaian hasil dalam mendukung program perbaikan tanaman lebih cepat; dan 3) jumlah bibit yang dihasilkan tidak terbatas. Proses produksi bibit melalui embriogenesis somatik melalui beberapa tahapan perkembangan, termasuk di antaranya induksi embrio somatik melalui pembentukan kalus, pemeliharaan, pendewasaan, perkecambahan, dan aklimatisasi (Hussain dkk., 2012).

Ada beberapa faktor yang memengaruhi induksi embriogenik somatik, di antaranya sumber eksplan yang dipakai, media regenerasi, genotip tanaman, konsentrasi dan tipe zat pengatur tumbuh yang digunakan atau digunakannya kondisi selektif dalam media *in vitro* (Sudarmonowati & Henshaw, 1996; Fitriani dkk., 2016). Keberhasilan regenerasi tanaman melalui embriogenesis somatik sangat dipengaruhi oleh komposisi media yang digunakan yang berbeda pada setiap tahap perkembangan embrio somatik serta jenis eksplan yang digunakan. Media Murashige dan Skoog (MS) yang diperkaya pikloram dapat menginduksi pembentukan embriogenik somatik ubi kayu genotip Ubi Kuning (Supatmi, Fitriani, Nurhamidar, Hartati, & Sudarmonowati, 2017) seperti tampak dalam Gambar 3.6. Namun, penggunaan media MS yang ditambah media Gresshoff dan Doy (GD) dan pikloram dapat mengoptimalkan induksi somatik embriogenik ubi kayu pada Mentega 2 (Fitriani dkk., 2016), seperti tampak dalam Gambar 3.7. Media ini juga digunakan untuk regenerasi kalus remah embriogenik somatik dari Carvita 25 untuk menghasilkan *plantlet* Carvita 25

(Gambar 3.8). Carvita 25 merupakan genotip hasil varian somaklonal yang dikembangkan LIPI dan telah dirilis sebagai tanaman unggul ubi kayu mengandung beta karoten. Varietas ini memiliki morfologi yang berbeda dari induk asalnya, Adira 4. Carvita 25 memiliki umbi yang berwarna kuning (Gambar 3.9), yang berbeda dengan induknya yang berumbi putih. Media MS maupun GD dapat menginduksi kalus remah, tetapi media GD lebih efektif untuk menginduksi kalus embriogenik ubi kayu. Pada induksi somatik, tahap pembentukan struktur *globular* dan hati sering digunakan zat pengatur tumbuh sitokinin atau auksin. Media GD yang ditambah pikloram menginduksi pembentukan kalus embriogenik ubi kayu lebih baik. Konsentrasi pikloram yang paling efektif untuk pertumbuhan kalus embrio somatik sekunder (ESS) adalah 6 mg/l (Fitriani dkk., 2016).

Eksplan yang umum digunakan adalah jaringan atau organ yang bersifat embriogenik, seperti embrio zigotik, kotiledon, mata tunas, dan hipo/epikotil. Dari embrio somatik primer, dapat diprakarsai pembentukan embrio somatik sekunder (ESS) yang berpotensi untuk diterapkan sebagai metode perbanyakan mikro tanaman secara massal karena dapat mengurangi waktu kultur sehingga mengurangi risiko variasi somaklonal (Bintarti, 2015). Beberapa penelitian melaporkan embrio somatik sekunder dapat diperoleh dari penggunaan eksplan embrio zigotik tua atau daun.

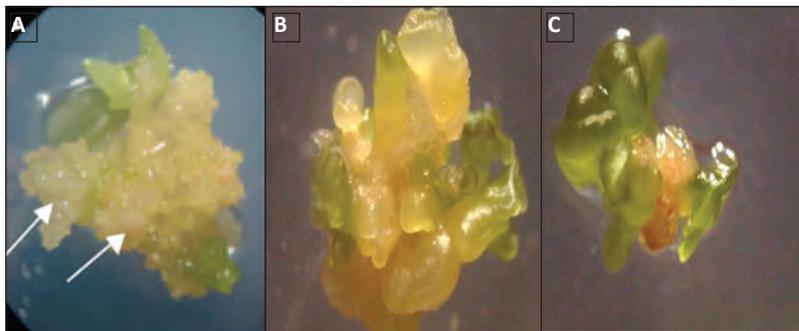
Perkembangan protokol kultur jaringan dalam perbanyakan sel dan jaringan telah sampai pada level yang memungkinkan untuk melakukan industrialisasi perbenihan. Perbanyakan tanaman lebih lanjut dapat dilakukan dengan pemanfaatan bioreaktor untuk produksi tanaman secara massal dengan cara memanipulasi berbagai faktor yang memengaruhi proses produksi embrio somatik pada setiap tahapannya, seperti komposisi sukrosa, nitrogen, dan media. Saat ini, teknologi embriogenesis somatik mulai dikembangkan untuk menghasilkan materi perbanyakan bibit dalam jumlah massal, dan dengan memanfaatkan bioreaktor. Sebelumnya, bioreaktor banyak digunakan



Keterangan: A) Pada Tahap *Nodul/Globular* yang Berasal dari Berbagai Ukuran Daun setelah Dikultur pada Media yang Diperkaya dengan Pikloram; B) Fase Tubular Awal; C) Fase Tubular Akhir; D) Fase Kotiledon

Sumber: Supatmi dkk. (2017)

Gambar 3.6 Pembentukan Somatik Embriogenik Genotip Ubi Kuning



Keterangan: A) Friable ESS yang Sebagiannya Menjadi *Nodul/Globular*; B) Fase Torpedo Awal dan Akhir; C) Kotiledon

Sumber: Fitriani dkk. (2016)

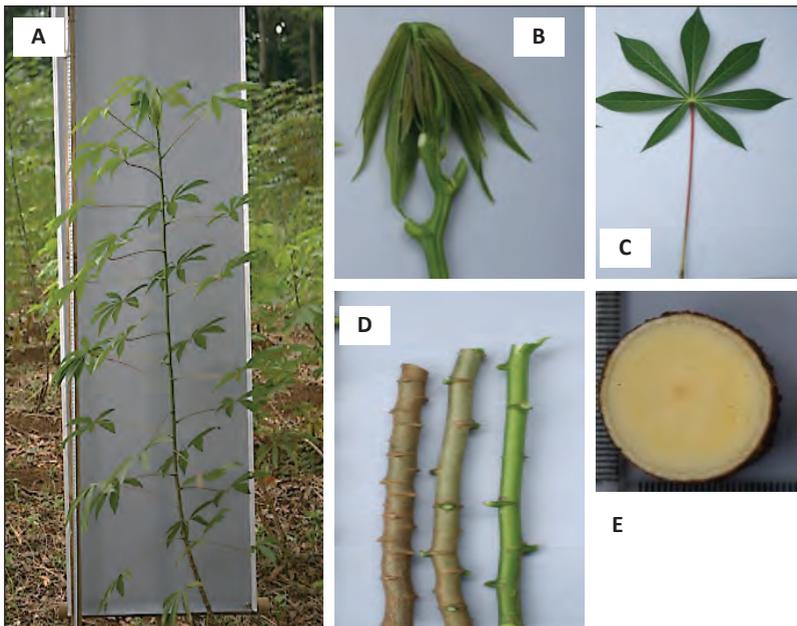
Gambar 3.7 Induksi Kalus Embriogenik Somatik Sekunder (ESS) Mentega 2 yang Terbentuk pada Media Perlakuan

Buku ini tidak diperjualbelikan.



Sumber: Lab. GMMJBT (2019)

Gambar 3.8 *Plantlet* Carvita 25 Asal Varian Somaklonal



Keterangan: A) Morfologi Habitus, B) Pucuk, C) Petiol, D) Warna Batang, dan E) Warna Umbi

Sumber: Lab. GMMJBT (2016)

Gambar 3.9 Morfologi Varietas Carvita 25 Asal Varian Somaklonal Somatik

Buku ini tidak diperjualbelikan.

hanya untuk perbanyakan pada kultur suspensi sel dan produksi metabolit sekunder. Namun, dalam perkembangannya, alat ini digunakan juga dalam perbanyakan embrio somatik dalam skala besar. Embriogenesis somatik dalam kultur cair dalam bioreaktor dapat diaplikasikan pada ubi kayu.

Perbanyakan bibit ubi kayu hasil perakitan melalui aplikasi bioteknologi tidak dapat dipisahkan dari pemanfaatan teknik kultur jaringan. Beberapa jenis ubi kayu kaya beta karoten hasil perakitan varietas tanaman melalui berbagai teknik bioteknologi modern telah dihasilkan oleh berbagai lembaga riset, seperti ubi kayu yang mengekspresikan gen *phytoene synthase* atau *PSY* (Welsch dkk., 2010). Bibit ubi kayu kaya beta karoten dapat dirakit dengan dua cara: *pertama*, dengan meningkatkan ekspresi gen yang berkontribusi positif pada biosintesis beta karoten, seperti menginsersikan gen *PSY* pada genom ubi kayu melalui teknik transformasi genetik; *kedua*, dengan menghambat aktivitas enzim yang berkontribusi negatif pada akumulasi beta karoten. Perakitan bibit ubi kayu melalui penerapan bioteknologi, terutama untuk perbaikan genetik ubi kayu kaya beta karoten akan dijelaskan lebih lanjut pada Bab IV. Teknologi transformasi genetik yang diterapkan untuk perakitan varietas tanaman ubi kayu dengan beta karoten yang lebih tinggi bergantung pada beberapa aspek teknik kultur jaringan. Keberhasilan transformasi genetik ubi kayu untuk peningkatan beta karoten pada umbi mencapai hasil yang menggembarakan setelah penggunaan material *friable embryogenic callus* (FEC) pada protokol transformasi. Jaringan somatik hasil kultur *in vitro* ubi kayu dari asal eksplan daun muda digunakan untuk memproduksi struktur embriogenik yang kemudian diubah menjadi FEC melalui proses subkultur yang berulang-ulang pada media Gresshoff dan Doy (GD). Setelah transformasi, koloni dari tanaman FEC transgenik dipulihkan pada media antibiotik dan diregenerasikan menjadi embrio tahap kotiledon yang matang pada media MS yang diperkaya dengan benzilaminopurin (BAP). Waktu yang dibutuhkan dari mulai transformasi hingga terbentuknya *planlet* tanaman yang siap diaklimatisasi

adalah sekitar 5 bulan (Sayre dkk., 2011; Taylor dkk., 1996, 2001). *Planlet* tanaman ini dapat diperbanyak lebih lanjut pada media propagasi untuk memperbanyak bibit dalam jumlah massal. Perbanyak bibit lebih lanjut dapat dilakukan dengan menggunakan metode konvensional melalui memperbanyak stek pada ubi kayu hasil aklimatisasi yang telah dipindah ke lapang.

3. Perbanyak Bibit dan Diseminasi di Lapangan Berdasarkan Seleksi Kesesuaian Lahan

Perbanyak bibit ubi kayu kaya beta karoten tinggi dilakukan di berbagai lokasi, yaitu Bogor, Subang, Gunung Kidul, dan Boyolali. Tahapan untuk dilepas menjadi varietas sedang dilakukan berupa uji multilokasi yang akan dilakukan di beberapa lokasi, yaitu Bogor, Sumedang, Subang, Banjarnegara, Wonogori, Boyolali, Malang, Lampung Tengah, dan Lampung Selatan. Hasil uji kesesuaian lahan di Kabupaten Boyolali menunjukkan bahwa ubi Carvita 25 sangat sesuai di kabupaten ini, di lahan kampus Universitas Boyolali dengan hasil umbi besar dan panjang dan berbobot sekitar 15 kg per tanaman (Gambar 3.10.). Hasil lebih komprehensif sedang disusun dan bibit akan ditanam kembali di beberapa tempat untuk konfirmasi kestabilan penampilan (hasil dan kandungan beta karoten).



Sumber: Lab. GMMJBT (2019)

Gambar 3.10 Panen Ubi Kayu Carvita 25 dan Manggu di Lahan Kampus Universitas Boyolali di Kabupaten Boyolali

BAB IV

Perbaikan Genetik Ubi Kayu untuk Meningkatkan Kadar Beta Karoten



Perakitan varietas unggul merupakan kegiatan yang sangat penting untuk meningkatkan produktivitas tanaman. Perakitan varietas unggul dapat dihasilkan secara konvensional dan bioteknologi. Pada dasarnya, merakit varietas tanaman adalah menyediakan keanekaragaman genetik baru. Berbagai cara dapat dilakukan untuk merakit varietas tanaman yang bervariasi dari cara konvensional melalui persilangan atau yang dikenal pula dengan istilah hibridisasi seksual hingga melalui cara modern menggunakan bioteknologi. Perakitan tanaman umbi-umbian, khususnya ubi kayu, untuk meningkatkan kadar beta karoten, pada prinsipnya dapat menggunakan semua cara tersebut. Tiap-tiap teknik memiliki kelemahan dan keunggulan yang ditinjau dari berbagai aspek, mulai dari faktor ketersediaan variasi sumber daya genetik tanaman, waktu yang dibutuhkan, tingkat kesulitan dari teknik yang digunakan hingga ketersediaan biaya.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Kualitas nutrisi merupakan aspek penting terkait dengan ketersediaan bahan pangan bergizi untuk menunjang ketahanan pangan. Di antara komponen nutrisi pangan yang penting adalah beta karoten sebagai prekursor vitamin A yang sangat dibutuhkan, di antaranya, untuk pertumbuhan dan perkembangan, reproduksi, serta kesehatan mata. Komoditas tanaman pangan yang perlu dikembangkan adalah ubi kayu sebagai bahan pangan sumber karbohidrat yang potensial dan populer.

Masyarakat di negara-negara maju dapat memenuhi kebutuhan nutrisi yang dibutuhkan dari berbagai jenis bahan pangan. Namun, masih banyak negara yang tergantung pada bahan pangan pokok yang rendah gizi, seperti padi dan ubi kayu. Prospek penerapan pemuliaan konvensional, bioteknologi, dan pemupukan dengan mikronutrien dapat meningkatkan kualitas mikronutrien bahan pangan pokok yang disebut biofortifikasi. Biofortifikasi menawarkan penggunaan modifikasi teknik budi daya yang potensial untuk diterapkan di negara yang memiliki risiko tinggi terhadap defisiensi mikronutrien (Hotz & McClafferty, 2007). Berdasarkan laporan-laporan hasil penelitian terkait perbaikan genetik ubi kayu, perakitan varietas untuk meningkatkan kadar beta karoten ubi kayu, khususnya secara bioteknologi, hingga saat ini belum banyak dilakukan. Puslit Bioteknologi LIPI telah menghasilkan jenis ubi kayu kaya beta karoten yang dihasilkan melalui induksi mutasi dan radiasi sinar gama dan induksi varian somaklonal. Pendekatan molekuler untuk perakitan ubi kayu kaya beta karoten menggunakan teknologi DNA telah diprakarsai melalui isolasi dan identifikasi gen terkait beta karoten, yaitu fragmen gen *PSY*, *CRT*, *BCH* (Hartati, Aryaningrum, & Sudarmonowati, 2016). Saat ini, telah tersedia jenis-jenis ubi kayu dan umbi-umbi lain yang kaya beta karoten hasil perakitan varietas tanaman melalui berbagai teknik secara konvensional, hingga bioteknologi modern yang dihasilkan oleh berbagai lembaga riset (Tabel 4.1)

Tabel 4.1 Beberapa Jenis Ubi Kayu dan Umbi Lain Hasil Perbaikan Genetik dengan Berbagai Teknik Pemuliaan Tanaman

Jenis Teknik Pemuliaan	Produk / Rincian	Lembaga—Negara	Referensi
Pemuliaan konvensional	UNB 310, Adira 1	CIAT—Kolombia, Balitkabi Kementerian—Indonesia	Balai Penelitian Tanaman Aneka Kacang dan Umbi (2016)
Induksi mutasi melalui radiasi	Ubi kuning radiasi	LIPI—Indonesia	Supatmi dkk. (2018)
Induksi varian somaklonal	Carvita 25	LIPI—Indonesia	Sudarmonowati dkk. (2018)
<i>Marker assisted breeding</i>	SNPs pada lokus Manes.01G124200.1 responsibel untuk peningkatan akumulasi karotenoid provitamin A di ubi kayu pada populasi S1 dan S2 hasil dari <i>selfing</i> beberapa ubi kayu koleksi IITA dan CIAT	National Crops Resources Research Institute—Uganda	Esuma dkk. (2016)
	3 QTL berasosiasi dengan total karoten, yaitu 3 SSR marker (NS109, rSSRY251, dan rSSRY313) pada populasi S1 dari varietas Thailand MTA18 (AM320)	CIAT—Kolombia	Colorado, Ramirez, dan Fregene (2009)
	SNPs pada kromosom 2 dan 7 berasosiasi dengan tingginya kadar beta karoten pada 2 populasi segregasi pseudo F2 dari persilangan kultivar GM3732 dan GM3736	CIAT—Kolombia	Ovalle dkk. (2016)

Jenis Teknik Pemuliaan	Produk / Rincian	Lembaga—Negara	Referensi
Rekayasa genetika	Ubi kayu hasil overekspresi gen <i>PSY</i>	University of Freiburg—Jerman; International Center for Tropical Agriculture—Kolombia	Welsch dkk. (2010)
	Ubi kayu hasil overekspresi <i>Deoxy-D-xylulose-5-phosphate synthase (DXS) and bacterial phytoene synthase (crtB)</i> ,	Donald Danforth Plant Science Center—Amerika Serikat	Beyene dkk. (2018)

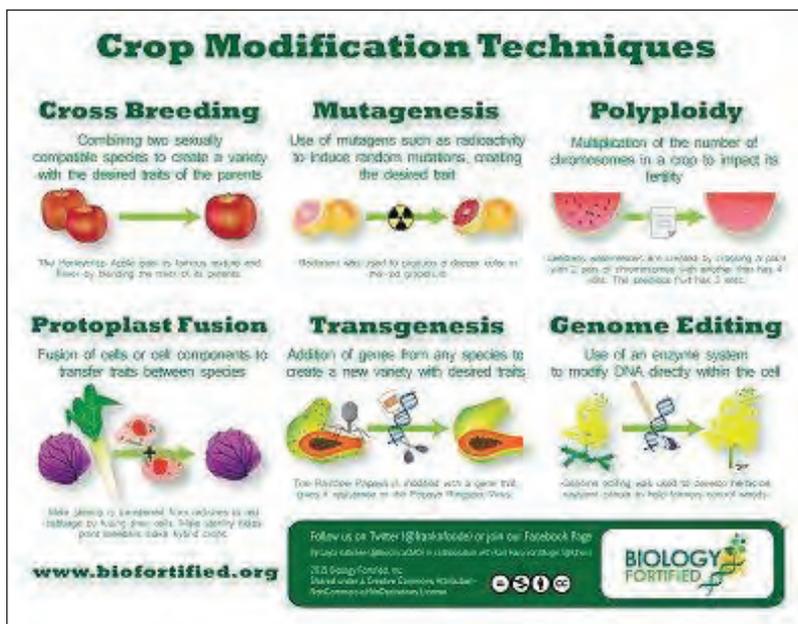
A. Perbaikan Genetik secara Konvensional: Penyilangan dan Seleksi Alami

Sumber keanekaragaman genetik tanaman merupakan aspek sangat penting untuk perbaikan genetik tanaman, khususnya pemuliaan secara konvensional maupun yang dikombinasikan dengan teknik molekuler, seperti *marker assisted breeding*. Variasi genom dan kemiripan genotip merupakan konsep dasar dalam studi genetik. Konsep tersebut dapat diterapkan, di antaranya untuk mempelajari penurunan sifat, identifikasi populasi superior, struktur genetik populasi, serta uji stabilitas genetik pada propagasi tanaman. Variasi genetik dapat diamati berupa ekspresi yang tampak secara langsung, seperti polimorfisme morfologi dalam hal perbedaan bentuk dan warna daun, ataupun karakter yang harus diidentifikasi melalui percobaan di laboratorium (marka molekuler).

Sumber variasi genom, baik yang menimbulkan perubahan ekspresi fenotipik secara langsung maupun tidak, adalah pengaturan kembali kromosom dan mutasi titik. Perpasangan kromosom tidak normal atau rekombinasi selama meiosis, insersi, delesi, inversi, translokasi, dan duplikasi merupakan peristiwa yang dapat terjadi pada pengaturan kembali kromosom. Mutasi titik dapat berupa sub-

stitusi satu nukleotida yang terjadi secara transisi atau transversi serta insersi ataupun delesi. Jika delesi atau insersi terjadi pada tiga basa atau kelipatannya, ini dapat mengubah kerangka baca kode-kode genetik dan menyebabkan perubahan pada susunan asam amino yang dihasilkan. Hal ini dapat mengganggu atau menghilangkan suatu fungsi protein yang dapat saja terekspresi dalam perubahan karakter fenotipik.

Pada pemuliaan konvensional atau dikenal pula sebagai pemuliaan tradisional, kombinasi beberapa gen dapat dilakukan sekaligus, tetapi memiliki kelemahan, yaitu latar belakang genetik yang tidak diinginkan bisa terbawa dan diperlukan waktu yang panjang untuk memperoleh tanaman yang homozigot. Pada pemuliaan secara bioteknologi, transfer gen dapat dilakukan untuk satu sifat yang diinginkan saja kepada tanaman dengan latar belakang genetik unggul. Secara umum,



Sumber: Katirae (2015)

Gambar 4.1 Pemuliaan Tanaman secara Konvensional dan Bioteknologi

Buku ini tidak diperjualbelikan.



Sumber: Lab. GMMJBT (2019)

Gambar 4.2 Varietas Ubi Kayu Kaya Beta Karoten Adira 1 Hasil Persilangan

perbedaan prinsip pemuliaan konvensional dan bioteknologi ditampilkan pada Gambar 4.1.

Varietas unggul baru ubi kayu asal Indonesia yang dihasilkan melalui persilangan konvensional telah banyak dihasilkan (Gambar 4.2) dan telah dilepas, di antaranya, Adira 1, Adira 4, Malang 4, UJ 5, Darul Hidayah, dan Vati. Di antara jenis ubi kayu asal Indonesia maupun lembaga lain di luar negeri jenis yang memiliki kadar beta karoten tinggi adalah Adira 1 dan UNB 310.

B. Perbaikan Sifat Melalui Induksi Mutasi

Penerapan iradiasi dalam meningkatkan keanekaragaman genetik telah berhasil dilakukan pada berbagai jenis tanaman, baik tanaman hias, tanaman pangan maupun tanaman berkayu. Mutasi adalah proses dalam genetik di mana suatu gen mengalami perubahan struktur. Hasil mutasi akan menimbulkan gen baru dan keanekaragaman genetik yang dapat digunakan untuk pemuliaan tanaman. Beberapa mutasi buatan yang direncanakan terbukti telah menghasilkan individu baru yang superior. Salah satu mutasi buatan yang umum digunakan adalah dengan menggunakan radiasi sinar gama untuk perbaikan mutu benih dan bibit serta untuk meningkatkan keanekaragaman genetik guna memperoleh jenis unggul. Iradiasi sinar gama telah banyak dimanfaatkan untuk meningkatkan kesejahteraan ma-

nusia. Dalam bidang pemuliaan tanaman, sinar gama bermanfaat dalam menciptakan varietas baru yang lebih unggul.

1. Mutasi dengan Radiasi

Pengadaan bibit tanaman unggul ubi kayu perlu dilakukan agar tanaman yang dihasilkan memiliki kualitas lebih baik. Pengadaan bibit unggul ini dapat dilakukan melalui beberapa cara, salah satunya dengan teknik mutasi. Mutasi adalah perubahan pada sekuens DNA. Secara umum, Syukur dkk. (2013) mengemukakan bahwa mutasi dapat didefinisikan sebagai perubahan materi genetik yang merupakan sumber pokok dari semua keanekaragaman genetik, baik perubahan terhadap gen tunggal, sejumlah gen maupun susunan kromosom. Mutasi umumnya terjadi secara alami dan merupakan bagian dari fenomena alam. Namun, mutasi juga dapat diciptakan dengan sengaja (induksi), salah satunya dengan pemaparan sinar radiasi. Yunita (2009) mengungkapkan bahwa secara mendasar tidak terdapat perbedaan antara mutasi yang terjadi secara alami dan mutasi hasil induksi. Keduanya dapat menimbulkan variasi genetik sebagai dasar dalam seleksi tanaman.

Induksi mutasi dapat dilakukan salah satunya dengan memberikan pancaran radiasi sinar gama terhadap tanaman yang diinginkan. Radiasi sinar gama merupakan mutagen fisik yang memiliki radiasi elektromagnetik dengan panjang gelombang yang lebih pendek daripada sinar X sehingga dapat menghasilkan radiasi elektromagnetik dengan tingkat energi yang lebih tinggi. Sinar gama lebih sering digunakan karena mempunyai daya tembus lebih tinggi sehingga peluang terjadinya mutasi akan lebih besar (Syukur dkk., 2013).

Radiasi sinar gama dosis rendah memberikan pengaruh positif terhadap tanaman ciplukan (*Physalis angulata*) dan menciptakan perubahan morfologi yang menjadikan tanaman tersebut lebih unggul dibandingkan tanaman kontrol (Wahid, 2001). Namun, perlu diperhatikan mengenai dosis radiasi yang akan diberikan. Daya tembus



Sumber: Supatmi dkk. (2018)

Gambar 4.3 Kultur ubi kayu ubi kayu kaya beta karoten hasil induksi mutasi menggunakan sinar gama.

yang dimiliki sinar gama ke dalam jaringan sangat dalam, bisa mencapai beberapa sentimeter dan bersifat merusak jaringan yang dilewatinya. Oleh karena itu, dosis yang terlalu tinggi dapat menyebabkan kematian. Hal ini dapat dilihat pada penelitian Dwiatmini, Kartiningrum, dan Sulyo (2009), biji kecombrang (*Etilingera elatior*) yang diberi dosis di atas 60 Gy tidak ada yang tumbuh. Penelitian tersebut menjelaskan bahwa terdapat kecenderungan semakin tinggi dosis radiasi, semakin sedikit biji yang mampu tumbuh. Secara fisik pun semakin tinggi dosisnya, semakin terhambat pula pertumbuhan tanaman, baik tinggi maupun ukuran bagian-bagian tanaman.

Keanekaragaman yang terbentuk setelah radiasi diberikan bisa berbeda-beda. Umumnya, intensitas radiasi tinggi menghasilkan

keanekaragaman yang rendah (Kurniajati, 2017). Sebaliknya, keanekaragaman yang terbentuk pada intensitas radiasi rendah bisa saja tinggi. Oleh sebab itu, penelitian mengenai radiasi sinar gama terhadap ubi kayu perlu dilakukan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh radiasi terhadap tingkat keanekaragaman. Beberapa jenis ubi kayu hasil mutasi radiasi yang telah dihasilkan, di antaranya ubi kuning hasil radiasi kultur *in vitro* ubi kuning dengan sinar gama dosis 10 Gy (Supatmi dkk., 2018) seperti tampak dalam Gambar 4.3.

a. Pengaruh Zat Pengatur Tumbuh (zpt) dan Subkultur terhadap Variasi Somaklonal

Keanekaragaman somaklonal dikenal sebagai keanekaragaman genetik pada tanaman hasil perbanyakan secara *in vitro*. Metode *in vitro* yang mampu meningkatkan keanekaragaman genetik, yaitu keanekaragaman somaklonal kombinasi dengan radiasi, keanekaragaman somaklonal dengan perlakuan *colchicin*, fusi protoplas (Mariska & Lestari, 2003).

Variasi somaklonal menyebabkan tanaman memiliki fenotip yang berbeda dengan tetuanya (Supatmi & Sudarmonowati, 2012; Mgbeze & Iserhienrhien, 2014), perubahan kandungan fitokimia (Syahid, 2008), dan perubahan secara molekuler (Soniya, Banerjee, & Das, 2011; Bordallo dkk., 2004; Demirkiran dkk., 2013). Perubahan pada tanaman hasil perbanyakan *in vitro* sengaja dimanfaatkan atau dimunculkan untuk proses perbaikan atau pemuliaan tanaman karena mampu meningkatkan keanekaragaman genetik tanaman (Mariska & Lestari, 2003).

Variasi somaklonal dapat disebabkan oleh mutasi somatik yang diinduksi oleh perlakuan pemeliharaan atau subkultur, fusi protoplas, pemberian mutagen fisik (radiasi), pemberian antibiotik, pemberian mutagen kimia (*colchicin*), dan pemberian ZPT (Mariska & Lestari 2003; Ehsanpour, Madani, & Hosein, 2007; Lestari dkk., 2010; Wattimena dkk., 2011; Supatmi & Sudarmonowati 2012; Sun dkk., 2013).

Perubahan genetik dan epigenetik memicu munculnya variasi somaklonal. Perubahan genetik memicu terjadinya variasi somaklonal yang ditandai dengan adanya perubahan urutan materi genetik pada suatu organisme. Perubahan ini dapat disebabkan oleh mutasi titik (transisi, transversi, insersi, delesi) yang terjadi pada daerah *coding* maupun *noncoding*. Perubahan lainnya dapat disebabkan oleh mutasi spontan dan mutasi yang diinduksi. Mutasi spontan dapat berasal dari kesalahan selama proses replikasi DNA, sedangkan mutasi yang diinduksi disebabkan oleh pemberian mutagen yang dapat menyisip, merusak, dan mengganti basa DNA (Griffiths dkk., 2012).

Perubahan epigenetik pada tanaman dapat juga menyebabkan variasi somaklonal (Biswas dkk., 2009; Smulders & Klerk, 2011). Perubahan epigenetik bersifat sementara dan *reversible*. Perubahan epigenetik dapat dilihat melalui perubahan fenotip seperti berbunga lebih awal dan peningkatan formasi akar adventif pada peremajaan tanaman kultur jaringan (Evans, Loleman, & Kearns, 2003). Variasi epigenetik merupakan perubahan genetik yang disebabkan oleh amplifikasi DNA, aktivasi elemen transposom, dan metilasi DNA (Evans dkk., 2003; Smulders & Klerk, 2011). Metilasi DNA terjadi karena perubahan basa sitosin menjadi basa *5-methylcytosine* (Sahu dkk., 2013). Perubahan epigenetik diinduksi oleh adanya stres pada tanaman, perlakuan subkultur, dan induksi karena ZPT (Biswas dkk., 2009; Demirkiran dkk., 2013; Sahu dkk., 2013; Sun dkk., 2013).

Pemberian ZPT pada level 11,5 mM 2,4 D dan 1,65 mM pikloram pada tanaman kentang berpengaruh terhadap tingginya variasi yang dihasilkan (Bordallo dkk., 2004). Pemberian BAP pada konsentrasi tinggi mampu menghasilkan variasi somaklonal, terutama morfologi kanopi, daun, buah, dan cabang pengelompokan bunga tanaman stroberi (Biswas dkk., 2009). Zat pengatur tumbuh 8,8 μM benziladenin dan 4,13 μM pikloram memberikan pengaruh terhadap morfogenesis atau perkembangan kalus pada tanaman tomat (Soniya dkk., 2001).

Perbanyak tanaman secara vegetatif melalui metode konvensional, seperti cangkok ataupun stek batang, mempunyai beberapa kelemahan, seperti bibit bermutu yang dihasilkan sedikit, memerlukan area luas, serta kurang efisien untuk mendapatkan tanaman yang seragam dalam jumlah besar. Perbanyak tanaman melalui kultur jaringan yang dikenal dengan mikropropagasi menjadi metode alternatif untuk mendapatkan bibit tanaman secara massal dengan sifat-sifat yang seragam.

Kecepatan multiplikasi tunas menjadi aspek yang sangat penting dalam mikropropagasi. Telah banyak dilakukan penelitian untuk optimisasi metode propagasi berbagai jenis tanaman seperti penelitian mengenai pengaruh zat pengatur tumbuh maupun konsentrasi garam-garam anorganik terhadap kecepatan multiplikasi biakan kultur jaringan tanaman. Di samping penelitian pada skala laboratorium, produksi bibit secara massal melalui kultur jaringan, seperti bibit kelapa sawit dan pisang, telah dilakukan oleh beberapa perusahaan untuk memasok kebutuhan bibit suatu agroindustri maupun komoditas bibit ubi kayu.

Perubahan genetik yang diakibatkan oleh variasi somaklonal ada yang bersifat sementara dan permanen. Jika menyebabkan perubahan fenotipik maupun fisiologis, perubahan genetik ini dapat menimbulkan kerugian, seperti menurunnya produktivitas. Jika bibit yang diharapkan adalah bibit bermutu tinggi dan seragam, aspek variasi somatik yang mengakibatkan *off type* pada tanaman, baik yang diakibatkan oleh sumber eksplan maupun akibat akumulasi bahan-bahan kimia karena subkultur berulang-ulang. Dengan demikian, deteksi dini terhadap perubahan genetik tanaman hasil kultur jaringan pada tahap *planlet* perlu dilakukan sebelum penerapan besar-besaran di lapangan. Penyimpanan dengan metode kriopreservasi dapat menekan atau memperlambat pertumbuhan sehingga dapat mengatasi subkultur yang terlalu sering yang diharapkan pula menekan terjadinya variasi somatik.

b. Masalah Pascakultur

Off type adalah mutasi somatik yang muncul pada tanaman yang dapat diinduksi oleh proses *in vitro* sebagai akumulasi bahan-bahan kimia ataupun stres. Pada umumnya, variasi somatik yang muncul pada tanaman dewasa bersifat merugikan, seperti menurunnya produktivitas tanaman, dan hanya sedikit *Off type* yang menguntungkan. Jenis *Off type* tanaman umumnya meliputi *dwarfs* (kerdil), perubahan warna atau pola mosaik, perubahan kebiasaan tumbuh, serta perubahan produktivitas.

Penyebab variasi somatik dapat dibagi ke dalam tiga kelompok, yaitu:

- 1) variasi yang ada dalam sumber eksplan, misalnya kimera,
- 2) perubahan genetik, dan
- 3) pengaruh epigenetik atau fisiologis.

Pengamatan terhadap bibit kultur jaringan yang sudah ditumbuhkan dalam *polybag* selama tiga bulan dan mencapai tinggi 50 cm (tingkat aklimatisasi), ditemukan adanya *Off type* (Wardiyati, 1995) berupa mosaik pada helai daun serta kerdil, daun sempit, dan berwarna kuning. Variasi somaklonal pada perbanyakan genetik tanaman secara umum dihindari untuk menjaga keseragaman mutu bibit, tetapi beberapa varian somaklonal setelah dilakukan identifikasi morfologi dan hasil, ada pula yang bersifat menguntungkan, di antaranya pada tanaman pisang, nilam, dan jahe. Tanaman umbi-umbian yang memiliki kadar beta karoten tinggi hasil varian somaklonal, di antaranya Carvita 25 yang dihasilkan dari varietas asal Adira 4 (Gambar 4.4).



Sumber: Lab GMMJBT (2019)

Gambar 4.4 Profil Tegakan Tanaman dan Umbi Varietas Ubi Kayu Kaya Beta Karoten Carvita 25 Hasil Induksi Varian Somaklonal

Buku ini tidak diperjualbelikan.

C. Perbaikan Sifat dengan Marka Molekuler

Keanekaragaman genetik tanaman yang dimiliki Indonesia sangat besar, bahkan Indonesia termasuk salah satu negara megabiodiversitas dunia. Pada dasarnya, keanekaragaman genetik yang luas sangat menguntungkan karena kita memiliki berbagai sumber genetik untuk berbagai sifat yang diinginkan. Namun, pemanfaatan sumber genetik tersebut belum maksimal. Pada dasarnya, spesies dengan derajat keanekaragaman genetik tinggi pada populasinya memiliki lebih banyak variasi alel yang dapat diseleksi. Dengan keanekaragaman genetik yang tinggi, sifat tanaman unggul mungkin diperoleh. Artinya, ada kemungkinan terjadi variasi genetik di dalam satu spesies tanaman yang berperan dalam mekanisme adaptasi atau pertahanan diri tanaman terhadap suatu lingkungan yang kurang menguntungkan baginya.

Pemuliaan tanaman melalui persilangan merupakan teknik yang sangat penting, tetapi memiliki keterbatasan. Persilangan hanya dapat dilakukan antara dua tanaman yang secara seksual cocok satu sama lain (tidak ada inkompatibilitas seluler). Selain itu, pada persilangan sifat-sifat lain yang tidak diinginkan (tidak menguntungkan), bisa tertransfer yang dapat mengakibatkan pengaruh yang tidak diharapkan pada hasil. Rekayasa genetika merupakan modifikasi genetika jenis baru yang mampu menambahkan gen asing pada genom suatu organisme. Gen yang dipindahkan atau ditambahkan mengandung informasi yang dibutuhkan untuk mengubah suatu sifat. Karena tidak diperlukan lagi persilangan tanaman, hambatan seksual antarspesies dapat diatasi. Selain itu, penambahan sifat baru dapat dilakukan secara terarah, baik untuk sifat tunggal maupun beberapa sifat.

Proses seleksi tanaman unggul, terutama untuk pangan, telah lama dilakukan, yang pada dasarnya telah mendekati pada penyempitan keanekaragaman genetik. Secara genetik, tanaman tersebut mendekati seragam. Akibatnya, tanaman menjadi rentan terhadap satu serangan biotik tertentu atau terhadap cekaman abiotik tertentu. Salah

satu contoh ialah wabah kelaparan kentang di Irlandia tahun 1840-an akibat tanaman kentang mereka terserang *Phytophthora infestans*. Selain karena keseragaman genetik yang tinggi, adakalanya kerentanan tanaman disebabkan oleh ketiadaan sumber gen tersebut di dalam tanaman itu sendiri. Contoh ketahanan tanaman terhadap penggerek batang. Atau, jika sifat yang diinginkan adalah sesuatu yang berbeda dengan sifat alami tanaman tersebut, besar kemungkinan sumber gen yang mengontrol sifat tersebut tidak ada dalam tanaman, contoh padi pro-vitamin A. Oleh karena itu, mekanisme pertahanan, adaptasi, toleransi, atau sifat tertentu lainnya dalam tanaman sangat ditentukan oleh peran gen-gen yang ada di dalamnya.

Pembentukan keanekaragaman genetik untuk sifat unggul tertentu dapat dilakukan secara buatan, yaitu melalui pemuliaan tanaman (persilangan). Prinsipnya ialah memindahkan suatu sifat tertentu yang diinginkan dari suatu plasma nutfah tertentu. Kegiatan ini dilakukan antara suatu spesies tanaman dan spesies lain atau dengan kerabatnya. Melalui teknik ini, telah banyak diperoleh varietas komersial tanaman unggul dengan berbagai sifat agronomi yang menguntungkan. Seiring perkembangan ilmu pengetahuan di bidang bioteknologi tanaman, teknik pemuliaan seperti ini juga telah berkembang dengan kombinasi menggunakan marka molekuler (marka genetik). Melalui metode ini, seleksi menggunakan marka genetik untuk sifat tertentu menjadi lebih tepat dan cepat. Beberapa contoh tanaman yang telah berhasil diperoleh melalui metode ini ialah varietas padi tahan rendaman yang memiliki marka molekuler Sub-1.

Kandungan *cis*- dan *trans*- beta karoten tertinggi di ubi kayu adalah di bagian proksimal umbi, sedangkan yang terendah adalah di bagian distal. Tidak ada perbedaan nyata ($P > 0,05$) di metode sampling yang dicoba. Alternatif metode adalah kesesuaian sampling tanpa *cork-boring* (Maziya-Dixon dkk., 2016). Studi yang dilakukan menggunakan ubi kayu di sub-Saharan Afrika menunjukkan pentingnya perkiraan kandungan dan distribusi karotenoid varietas ubi kayu

yang benar dalam program pemuliaan tanaman. Dua metode sampling, yaitu dengan *cork borer* dan tanpa *cork borer* di umbi berdaging kuning dari 40 varietas ubi kayu yang dipanen umur 12 bulan. Ubi kayu kuning merupakan hasil pemuliaan tanaman baru terkait daging umbi kuning, yang termasuk paling populer di negara tropis. Di Nigeria, telah ditanam tiga jenis varietas kuning ubi kayu, yaitu UMUCASS 36, UMUCASS 37, dan UMUCASS 38 dengan pendanaan dari Proyek Harvest Plus (2 dan 3) karena kandungan beta karoten yang tinggi. Defisiensi vitamin A merupakan masalah utama di Nigeria, prevalensinya mendekati 1 dari 3 balita. Dampak kekurangan vitamin A bisa berakibat fatal, yaitu mengurangi sistem kekebalan tubuh dan penglihatan yang dapat menyebabkan kebutaan dan bahkan kematian pada beberapa kasus. Ubi kayu merupakan pangan utama di Afrika sehingga sangat berpotensi untuk mengatasi defisiensi vitamin A. Ketiga varietas tersebut merupakan hasil dari penelitian selama 12 tahun di Nigeria yang didanai Harvest Plus melalui International Institute of Tropical Agriculture (IITA) dan Nigeria's National Root Crop Research Institute. Pada 2015, targetnya dapat mencapai kadar beta karoten hingga 15 µg/g. Selain mengandung beta karoten tinggi, varietas ini juga mempunyai kelebihan lain, yaitu hasil tinggi dan tahan terhadap hama dan penyakit. Ubi kayu kuning yang dihasilkan adalah ubi kayu yang di-biofortifikasi dengan vitamin A. Ubi kayu menyediakan 80% pati dan mencapai 25% dari asupan harian vitamin A yang disarankan. Di Nigeria, selain yang terdampak balita (30% dari balita), juga wanita hamil yaitu 20% dari wanita hamil. *Yellow cassava* (ubi kayu kuning) selain mengandung 80% pati, juga mengandung hampir 25% asupan vitamin A harian yang direkomendasikan.

Peningkatan kandungan mikronutrien di ubi kayu semakin berkembang menjadi beberapa sifat lain yang semula kaya beta karoten untuk mengatasi defisiensi vitamin A di Afrika dengan skema program kolaboratif di Amerika Serikat dan Afrika, yaitu Harvest Plus

initiative, menjadi peningkatan ketersediaan Fe dan Zn. Pada tahun 2011, dilaporkan bahwa International Institute of Tropical Agriculture (IITA), International Center for Tropical Agriculture (CIAT), National Root Crops Research Institute (NRCRI), dan Umudike, bekerja sama untuk mengembangkan “*gene pool*” ubi kayu unggul yang akan dilepas ke petani agar masalah malanutrisi mikronutrien dapat teratasi (Njoku dkk.).

D. Perbaikan Kadar Beta Karoten dengan Transfer Gen

Perbaikan sifat tanaman melalui hibridisasi seksual atau persilangan memiliki keterbatasan, seperti adanya inkompatibilitas seluler dan pada jenis tanaman tertentu yang berumur panjang akan membutuhkan waktu lama, terutama karena siklus hidupnya yang panjang. Dengan demikian, upaya perbaikan sifat tanaman melalui teknologi DNA atau rekayasa genetika akan lebih menguntungkan. Modifikasi terjadi dalam waktu relatif singkat karena langsung menyangkut gen penyandi sifat yang ingin diubah, sedangkan teknik konvensional targetnya masih beberapa gen sehingga perlu proses penyilangan bertahap. Teknik transfer gen atau transformasi genetik tanaman secara umum dapat dilihat pada Gambar 4.5

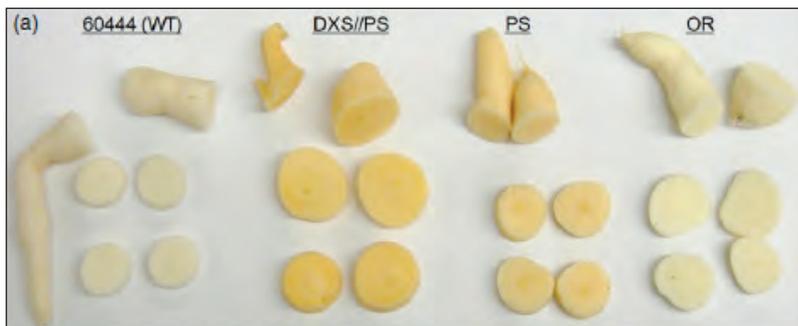
Bioteknologi tanaman melalui proses rekayasa genetika telah berkembang pesat selama lebih dari dua dekade terakhir. Tujuannya untuk mendapatkan tanaman unggul. Melalui teknik ini, pemindahan satu atau beberapa gen saja yang menyandikan sifat tertentu dapat dilakukan. Sumber genetik dengan teknik ini tidak harus berasal dari tanaman sejenis atau sekerabat saja, tetapi dapat dari organisme berbeda. Proses ini dinamakan transformasi. Gen yang disisipkan dapat terekspresi membentuk suatu protein tertentu yang bertanggung jawab untuk sifat tertentu.

Transformasi genetik telah berhasil dilakukan pada berbagai jenis tanaman, termasuk tanaman pangan sereal maupun umbi. Transformasi genetik yang dilakukan pada tanaman padi juga dimanfaatkan

untuk membentuk populasi mutan, yaitu dengan menyisipkan sekuens DNA loncat (transposon). Mutan yang diperoleh diharapkan memiliki keanekaragaman genetik luas yang nantinya dimanfaatkan sebagai sumber plasma nutfah baru. Tanaman transgenik yang dihasilkan juga dimanfaatkan untuk memproduksi senyawa terapeutik tertentu atau menghasilkan vaksin.

Ubi kayu transgenik hasil penelitian Beyene dkk. (2018) mengalami peningkatan kandungan beta karoten pada umbi karena adanya koekspresi transgen *deoxy-D-xylulose-5-phosphate synthase (DXS)* dan *bacterial phytoene synthase (crtB)* menggunakan promoter patatin tipe 1 yang ditransformasi dengan *Agrobacterium* (Gambar 4.5). Umbi hasil panen mempunyai kandungan karoten sebesar $\leq 50 \mu\text{g} / \text{g DW}$ (*Dry Weight*), relatif meningkat 15 sampai 20 kali lipat dari umbi nontransgenik. Sekitar 85%–90% jenis karotenoid yang terakumulasi adalah *all-trans* beta karoten, karotenoid dengan nutrisi paling baik. Kentang transgenik yang mengekspresikan *DXS* dan *crtB* secara bersama-sama menunjukkan korelasi yang sama antara akumulasi beta karoten, pengurangan bahan kering, kandungan pati serta peningkatan minyak dan gula terlarut dalam umbi.

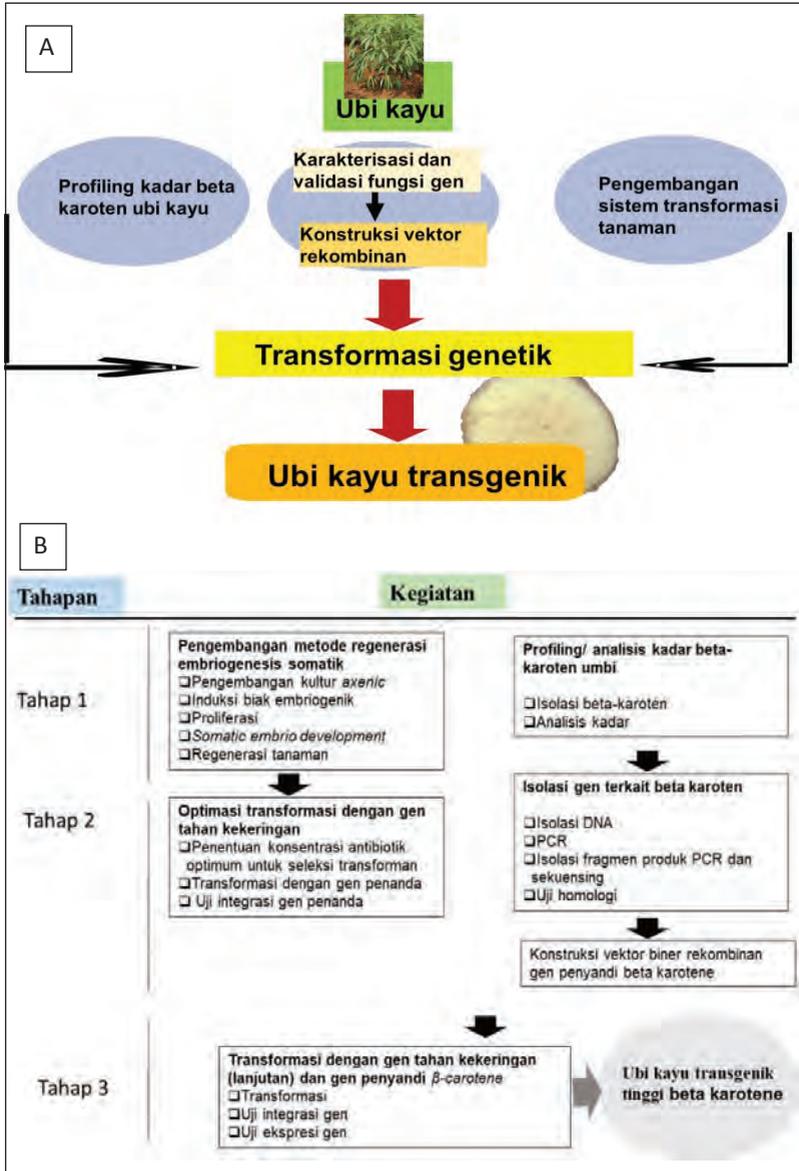
Transformasi genetik pada tanaman dapat dilakukan karena tanaman bersifat totipotensi, yaitu mampu beregenerasi membentuk



Sumber: Beyene dkk. (2018)

Gambar 4.5 Umbi Ubi Kayu Hasil Transformasi Genetik dengan Overekspresi Gen *DXS/PS*

Buku ini tidak diperjualbelikan.



Keterangan: A) strategi perakitan tanaman transgenik secara umum; B) alur perakitan tanaman transgenik tinggi beta karoten.

Sumber: Lab. GMMJBT

Gambar 4.6 Tahapan penelitian perbaikan genetik ubi kayu kaya beta karoten melalui teknologi DNA (rekayasa genetika).

tanaman baru yang berasal dari sel tunggal sekalipun. Tanaman hasil transformasi genetik ini dinamakan tanaman transgenik. Teknik ini berkembang setelah ditemukannya enzim restriksi yang mampu memotong molekul DNA pada tempat spesifik, dan enzim ligase yang mampu menyatukan fragmen-fragmen DNA kembali sehingga dimungkinkan mengembangkan teknik rekombinasi DNA. Potongan gen (DNA) asing yang ditransformasikan akan menyatu ke dalam genom tanaman. Beberapa tanaman transgenik yang berhasil diperoleh antara lain memiliki ketahanan terhadap herbisida, virus, hama, bakteri, jamur, dan sifat toleran terhadap cekaman kekeringan.

Untuk merakit tanaman transgenik, secara umum memerlukan ketersediaan sumber gen yang akan ditransformasikan. Metode regenerasi tanaman umumnya dilakukan melalui kultur jaringan. Sumber gen yang akan ditransformasikan bisa berasal dari ubi kayu sendiri yang dilakukan dengan teknik *up*-regulasi maupun *down*-regulasi gen tertentu, baik yang berasal dari tanaman yang sama, sejenis, maupun dari organisme lain. Konstruksi gen merupakan tahapan yang sangat penting untuk mengatur ekspresi suatu gen sesuai tujuan. Selain itu, perlu dilakukan identifikasi sifat tanaman yang dalam hal ini kadar beta karoten. Strategi perakitan tanaman transgenik untuk memperoleh ubi kayu dengan kandungan beta karoten tinggi ditampilkan pada Gambar 4.6.

1. Teknik Transfer Gen (Transformasi Genetik)

Berbagai metode transformasi genetik pada tanaman telah dikembangkan (Gambar 4.7). Pemilihan metode transformasi yang akan digunakan sangat tergantung pada kemampuan jaringan/sel tanaman untuk diregenerasikan. Oleh karena itu, informasi kemampuan tanaman yang dapat dikultur penting untuk diketahui. Metode kultur jaringan tanaman dalam proses transformasi genetik memegang peranan penting karena menentukan regenerasi. Secara umum, teknik transformasi genetik yang digunakan dibedakan atas dua, yaitu transformasi genetik secara langsung dan tidak langsung. Metode transformasi langsung

adalah dengan memasukkan DNA langsung ke dalam genom suatu tanaman tanpa melalui agen perantara. Beberapa teknik transformasi langsung yang terus berkembang dan banyak digunakan, antara lain 1) elektroporasi (menggunakan voltase listrik tinggi) untuk material tanaman berupa protoplas atau jaringan tanaman; 2) *Polyethylene glycol* (PEG) untuk protoplas; 3) Transformasi polen; dan 4) penembakan DNA terhadap jaringan, kalus embriogenik, atau sel tanaman. Sementara itu, transformasi tidak langsung menggunakan agen perantara yang membawa gen pembawa sifat yang diinginkan tersebut. Metode tidak langsung yang saat ini banyak digunakan adalah dengan memanfaatkan *Agrobacterium tumefaciens*. Selanjutnya, diuraikan secara lebih terperinci mengenai teknik transformasi genetik secara langsung dan melalui *A. tumefaciens*.

a. Transfer Gen dengan Penembakan DNA

Pada tahun 1987, Klein dkk., untuk pertama kalinya berhasil melakukan transformasi menggunakan penembakan DNA (*particle bombardment* atau *biolistic*) pada *Allium cepa*. Teknik ini dapat digunakan terhadap spektrum tanaman yang luas dan efektif untuk mengembangkan tanaman transgenik, termasuk untuk kultivar-kultivar elite. Gen pengatur sifat yang diinginkan tidak hanya dapat disisipkan ke dalam inti sel, tetapi juga pada organel lain, seperti mitokondria dan kloroplas. Karena kemampuannya mengantarkan gen sisipan pada organel, pola pewarisan sifat secara maternal mungkin untuk dipelajari. Teknik ini juga memiliki kelebihan, yaitu dapat mentransfer DNA lebih dari satu plasmid (vektor). Namun, teknik ini juga memiliki kelemahan, di samping tidak murah dan tidak sederhana, sering kali jumlah salinan gen tersisip banyak. Jumlah salinan gen yang banyak dapat menyebabkan terjadinya pembungkaman sejumlah gen penting di dalamnya.

Transformasi menggunakan penembakan DNA dapat dilakukan dengan cara membalut partikel metal (umumnya partikel emas dan tungsten) dengan DNA plasmid yang telah mengandung gen pengatur

sifat yang diinginkan. Lalu, partikel tersebut ditembakkan dengan tekanan kuat (umumnya menggunakan gas helium) melalui penyaring tertentu sehingga mengurangi sel mati. Tipe jaringan yang dapat digunakan bervariasi antar-tanaman. Jaringan yang umum digunakan, di antaranya embrio belum masak, kalus embriogenik, dan meristem. Setelah ditembak, jaringan diseleksi dan diregenerasi sehingga diperoleh tanaman transgenik. Hasil analisis molekuler, seperti *Southern blot* dan *polymerase chain reaction* (PCR), menunjukkan bahwa gen sisipan terintegrasi dalam genom dan tersegregasi secara Mendellian untuk gen dominan. Beberapa contoh tanaman yang telah berhasil ditransformasi dengan teknik ini, antara lain ubi kayu, jagung, kapas, kedelai, dan padi serta tanaman hutan/berkayu atau pohon. Pada ubi kayu, teknik penembakan DNA telah berhasil untuk gen penanda *luciferase* (Raemakers dkk., 1996).

b. Transformasi Genetik Menggunakan *Agrobacterium tumefaciens*

Agrobacterium merupakan bakteri aerob obligat gram negatif yang hidup alami dalam tanah dan dapat menyebabkan penyakit *crown gall* pada tanaman dikotil. *A. tumefaciens* dan *A. rhizogenese* digunakan dalam transformasi DNA ke dalam tanaman. *A. rhizogenese* khusus digunakan untuk induksi pertumbuhan akar rambut. Umumnya, produk dari akar rambut ditujukan untuk menghasilkan senyawa metabolit sekunder tertentu.

Transformasi menggunakan *A. tumefaciens* pada mulanya hanya dapat digunakan untuk kelompok tanaman dikotil. Hal ini disebabkan tanaman dikotil mengeluarkan senyawa fenolik asetosiringon yang diperlukan bakteri untuk menginduksi gen-gen vir sehingga *A. tumefaciens* aktif. Perkembangan selanjutnya, transformasi dengan *A. tumefaciens* juga dapat diterapkan pada tanaman monokotil. Teknik transformasi sedikit dimodifikasi, yaitu dengan menambahkan senyawa asetosiringon di dalam media kokultivasi. Contoh tanaman dikotil yang pertama dapat ditransformasi adalah tembakau, disusul oleh



beberapa anggota tanaman *solanaceae*, kemudian padi untuk tanaman monokotil.

Secara alami, kemampuan *A. tumefaciens* yang menyebabkan tumor tanaman terkait dengan gen penginduksi tumor yang ada pada plasmid (Ti) bakteri tersebut. Dalam sel tumor, terbentuk enzim-enzim yang tidak tampak pada tanaman normal karena enzim ini hanya dihasilkan sel *Agrobacterium*. Enzim-enzim tersebut menghasilkan senyawa gula spesifik yang dinamakan opin yang berguna bagi bakteri itu sendiri. Kemampuan *A. tumefaciens* untuk membentuk *crown gall* berhubungan dengan keberadaan plasmid Ti dalam sel bakteri. Plasmid tersebut berukuran besar, lebih dari 200 kb, dan membawa banyak gen yang terlibat dalam proses infeksi. Sifat yang mencolok pada plasmid Ti adalah sebagian dari molekulnya berinteraksi dalam DNA kromosom tanaman setelah infeksi. Segmen tersebut dikenal dengan T-DNA yang berukuran antara 15–30 kb. Segmen tersebut dipertahankan stabil di dalam sel tanaman dan diintegrasikan ke sel anakan sebagai bagian integral kromosom.

Cara *Agrobacterium* mentransfer gen-gen yang ada dalam genomnya ke dalam tanaman ditentukan oleh semua gen dalam genomnya. Di dalam sel *Agrobacterium*, terdapat tiga komponen utama yang berperan dalam transfer DNA ke dalam sel tanaman. *Komponen pertama* adalah T-DNA, yaitu fragmen yang ditransfer ke dalam sel tanaman. T-DNA terdapat dalam plasmid Ti yang berukuran 200 kb (kilo basa). Daerah T-DNA diapit oleh sekuens DNA berulang yang berukuran 25 pb (pasang basa) pada sisi kanan dan kiri. *Komponen kedua* adalah daerah *virulence* (*vir*) yang berukuran 35–40 pb dan berada dalam plasmid Ti. Letak gen *vir* bersebelahan dengan batas kiri T-DNA. Gen-gen *vir* ini terbagi menjadi tujuh, yaitu A, B, C, D, E, G, dan H. Gen-gen *vir* menyintesis protein virulensi yang berperan dalam menginduksi terjadinya transfer dan integrasi T-DNA ke dalam tanaman. Empat gen *vir* yang paling penting menyintesis protein virulensi ini adalah *vir* A, B, D, dan G. Jika ada sesuatu yang mengin-

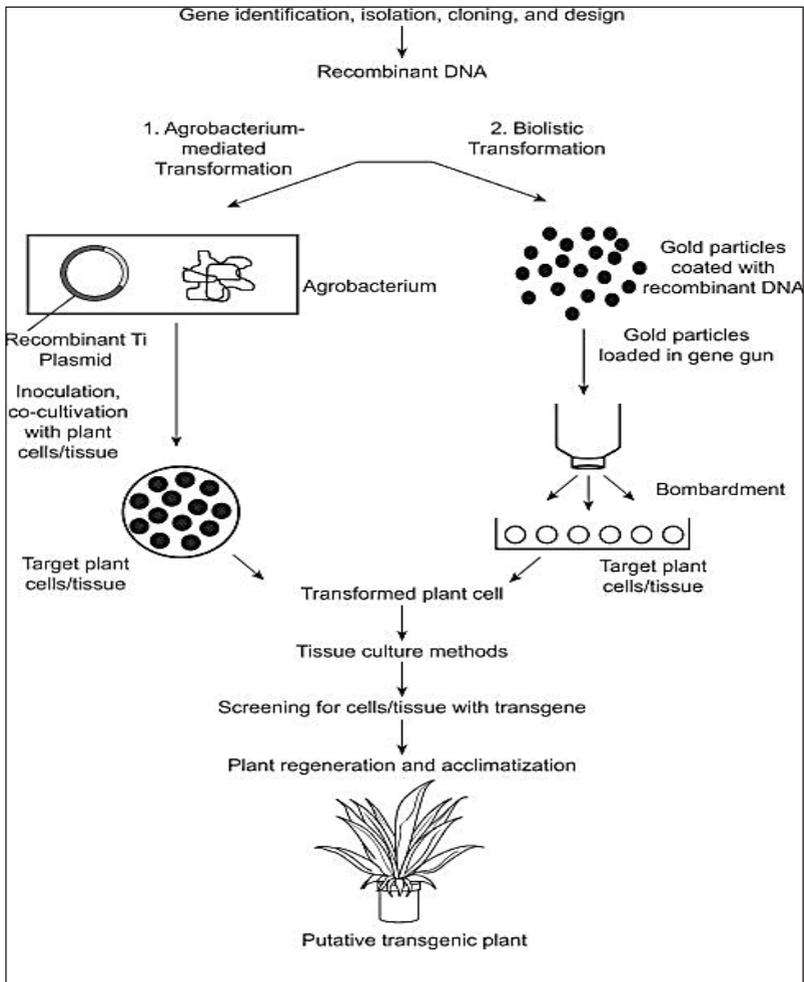
duksinya, gen vir A dan G akan terekspresi dan mengaktifkan serangkaian gen vir lain. Senyawa kimia yang diketahui sebagai penginduksi gen vir, antara lain monosiklik fenolik asetosiringon. Ekspresi gen vir juga dipengaruhi pH optimum yang berkisar antara 5–5,8. *Komponen ketiga* adalah gen *chromosomal virulence* (chv) yang terdiri atas chvA, chvB, pscA, dan att. Gen-gen tersebut terletak di dalam kromosom *Agrobacterium* dan berfungsi untuk melekatkan bakteri pada sel tanaman dengan membentuk senyawa protein beta-1,2-glukan.

Proses transfer T-DNA *Agrobacterium* ke dalam sel tanaman secara alamiah terdiri atas dua proses, yaitu sistem virulensi dan integrasi T-DNA ke dalam genom tanaman. Sistem virulensi menggunakan dua komponen spesifik, yaitu asetosiringon dan pH pada keadaan asam. Asetosiringon merupakan bahan kimia yang dihasilkan oleh sel tanaman yang terluka. Eksudat ini merangsang transkripsi gen yang mengendalikan virulensi pada bakteri (vir gen). Gen ini menghasilkan endonuklease yang memotong T-DNA menjadi bentuk T *strand* yang akan melewati dinding sel dan sitoplasma sel tanaman. Proses integrasi T-DNA ke dalam genom tanaman dimulai dari transfer T *strand* dan protein virulensi dari sel *A. tumefaciens* melalui saluran transportasi. Dalam sel tanaman, protein virulensi berinteraksi dengan T-*strand* membentuk kompleks-T. Pelepasan untai DNA yang berikatan dengan protein virD2 dan dilindungi oleh protein VirE2, terjadi setelah sampai pada targetnya, yaitu nukleus. Pada akhirnya, T-DNA bersatu dengan genom tanaman. Sel tanaman yang terluka mengeluarkan molekul sinyal yang berupa komponen fenolik (asetosiringon). Molekul ini akan dikenali oleh protein transmembran VirA. Kemudian, VirA akan melakukan autofosforilasi dan mengaktivasi VirG yang merupakan protein aktivator proses transkripsi yang akan mengekspresikan vir gen (vir C, D, E, B, F, dan H). Protein VirD1/D2 akan mengenali pembatas T-DNA (batas kiri dan batas kanan). Endonuklease akan memotong untai bawah T-DNA, kemudian VirD2 akan berikatan dengan ujung 5' dari ss-T-DNA. VirD2

berperan sebagai pelindung *T-strand* dari aktivitas eksonuklease. Kemudian, kompleks ss-T-DNA-VirD2 akan ditransfer melalui membran sel bakteri, ruang antarsel, dinding sel tanaman, dan membran inti. Protein VirB akan membentuk struktur saluran protein, dikenal dengan nama *T-Pilus*. Kemudian, kompleks-T ditransfer secara aktif dengan bantuan protein VirD. Kompleks ini ditransfer bersamaan dengan transfer protein VirE2. Dalam sitoplasma sel inang, protein VirE2 akan menyelubungi kompleks-T. Protein VirD2 dan E2 memegang peranan penting dalam proses transfer kompleks-T ke dalam target yang tepat, yaitu nukleus tanaman.

Proses integrasi ke DNA inang dimulai dari masuknya kompleks-T ke dalam nukleus melalui celah nukleus dengan bantuan protein VirD2 yang menjaga permukaan celah nukleus tetap terbuka. Langkah pertama dalam integrasi T-DNA adalah pelepasan protein-protein yang menyelubungi kompleks-T oleh *Skp1-Cullin-F box protein* (SCF). Kemudian, terjadi pemutusan DNA tanaman di situs spesifik oleh enzim restriksi. Langkah berikutnya adalah pembentukan ds-T-DNA dari ss-T-DNA. Terakhir, penggabungan ds-T-DNA dengan DNA tanaman oleh enzim ligase. Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam proses transformasi melalui *A. tumefaciens* adalah transfer T-DNA ke inti tanaman target, integrasi T-DNA tersebut ke genom tanaman target, serta ekspresi gen yang tertransformasi. Sementara itu, faktor utama yang mendukung produksi tanaman transgenik adalah kemampuan jaringan target untuk menerima gen asing dan kemampuan beregenerasi setelah transformasi.

Dalam perkembangannya, peneliti memanfaatkan mekanisme transfer gen tersebut dengan menyisipkan gen-gen interes pada daerah T-DNA. Vektor yang digunakan ialah sistem vektor ganda. Plasmid pertama sebagai vektor yang mengandung fragmen DNA dan plasmid kedua sebagai Ti yang menyediakan gen vir untuk fasilitator transfer gen ke dalam sel tanaman. Kedua plasmid ini dapat bereplikasi dalam sel *Agrobacterium*. Dengan menggunakan vektor ganda, penyisipan gen menjadi lebih mudah karena vektor yang mengandung batas



Sumber: Maheswari dan Kovalchuk (2016)

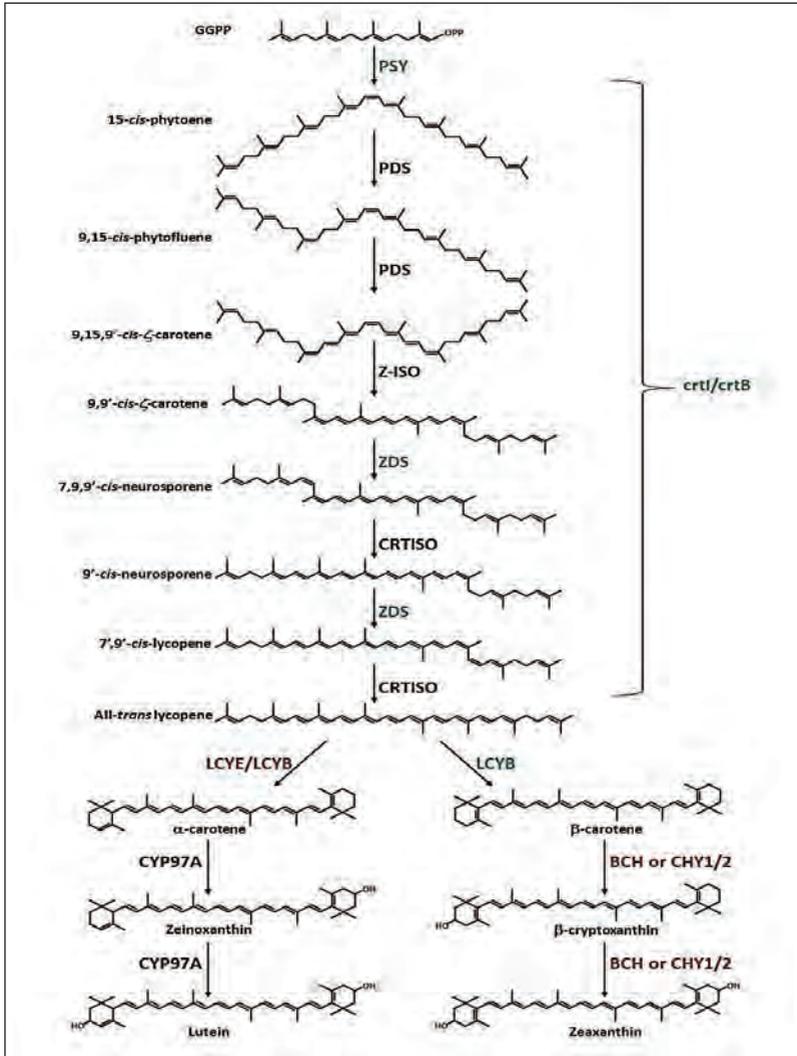
Gambar 4.7 Teknik Transformasi Genetik Tanaman

T-DNA berukuran jauh lebih kecil daripada plasmid Ti yang sesungguhnya.

Keberhasilan transformasi menggunakan *A. tumefaciens* terkait pada beberapa faktor, antara lain tipe dan umur jaringan yang akan diinfeksi, genotip tanaman, kondisi kultur jaringan, jenis vektor, ukuran vektor, *strain Agrobacterium*, konsentrasi, dan jenis antibiotik yang digunakan saat seleksi dilakukan.

2. Rekayasa Jalur Biosintesis Karotenoid untuk Meningkatkan Beta Karoten Ubi Kayu

Kandungan beta karoten pada ubi kayu dapat ditingkatkan melalui dua pendekatan. *Pendekatan pertama* dilakukan dengan meningkatkan ekspresi/aktivitas gen yang berkontribusi positif pada biosintesis beta karoten. Pendekatan ini dikenal juga dengan sebutan “*push strategy*”. Secara praktik, gen yang berkontribusi positif diinsersikan kembali pada genom ubi kayu melalui teknik transformasi genetik, baik menggunakan *Agrobacterium* maupun dengan teknik *particle bombardment*. *Pendekatan kedua* adalah dengan menghambat aktivitas enzim yang berkontribusi negatif pada akumulasi beta karoten. Pendekatan ini juga dikenal sebagai “*block strategy*”. Strategi kedua ini dilakukan dengan menurunkan ekspresi atau mematikan fungsi gen target dengan teknik RNAi atau *genome editing* (Gambar 4.8).



Keterangan: Enzim dengan warna hijau menunjukkan gen yang dapat menjadi target dalam pendekatan “push strategy” untuk meningkatkan kandungan beta karoten. Sementara itu, enzim dengan warna merah adalah gen target dalam pendekatan “block strategy” untuk meningkatkan kandungan beta karoten.

Sumber : dimodifikasi dari Wurtzel (2019)

Gambar 4.8 Jalur Biosintesis Karotenoid

Buku ini tidak diperjualbelikan.

a. Perbaikan Melalui Teknik Overekspresi Gen

Berikut ini disajikan beberapa gen yang berkontribusi positif pada biosintesis beta karoten dan dapat digunakan dalam teknik overekspresi dalam usaha meningkatkan kandungan beta karoten. Gen *DXP synthase (DXS)* dan *crtI/crtB* telah dioverekspresikan pada ubi kayu dan terbukti dapat meningkatkan kandungan beta karoten. Sementara itu, gen lain, seperti *DXP reducto-isomerase (DXR)*, *Phytoene synthase (PSY)*, *ζ-carotene desaturase (ZDS)*, dan *Lycopene beta-cyclase (LCYB)*, dilaporkan dapat meningkatkan kandungan beta karoten umbi-umbian, seperti ubi jalar, kentang, dan wortel. Keempat gen tersebut sangat potensial untuk diterapkan dalam usaha meningkatkan kandungan beta karoten pada ubi kayu.

b. DXP Synthase (DXS) dan DXP Reducto-isomerase (DXR)

Pada tanaman, karotenoid berasal dari dua senyawa isoprena, yaitu *Isopentenyl diphosphate (IPP)* dan *Dimethylallyl diphosphate (DMAPP)*. Senyawa ini juga digunakan dalam biosintesis berbagai senyawa *phytohormone (cytokinin, brassinosteroid, gibberellin, abscisic acid, trigolactones)*, fitosterol (*tocopherol* dan *polyprenol*), *quinone (phyloquinone, plastoquinone)*, dan klorofil (Rodríguez-Concepción, 2010). IPP dan DMAPP diproduksi melalui *mevalonic acid pathway (MVA)* di sitosol dan *methylerythritol 4-phosphate pathway (MEP)* di kloroplas (Pulido, Perello, & Rodriguez-Concepcion 2012). Sementara itu, biosintesis karotenoid menggunakan IPP dan DMAPP yang dihasilkan dari jalur MEP di kloroplas (Rodríguez-Concepcion, 2002).

Dalam jalur MEP, asam *pyruvate* dan *Glyceraldehyde 3-phosphate* yang dihasilkan oleh proses fotosintesis dikonversi menjadi *deoxy-d-xylulose 5-phosphate (DXP)* oleh enzim *DXP synthase (DXS)*. DXP mengalami reduksi membentuk *methylerythritol 4-phosphate (MEP)* yang dikatalisis oleh *DXP reducto-isomerase (DXR)*. Selanjutnya, DXP mengalami penambahan gugus *cytidine 5'-triphosphate* membentuk *methylerythritol cytidyl diphosphate (CDP-ME)* oleh

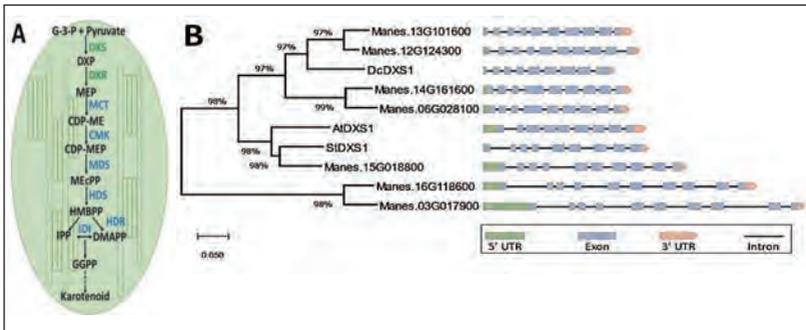
enzim *2-C-methyl-D-erythritol 4-phosphate cytidyltransferase* (MCT). Kemudian, CDP-ME berubah menjadi IPP dan DMAPP melalui posporilasi, sikliasi, dan reduksi secara berurutan yang dikatalis oleh enzim-enzim spesifik di kloroplas, seperti *2-C-methyl-d-erythritol 4-phosphate cytidyl transferase* (MCT), *4-(cytidine 50-diphospho)-2-C-methyl-d-erythritol kinase* (CMK), *2-C-methyl-d-erythritol 2,4-cyclodiphosphate* (MCS), dan *1-hydroxy-2-methyl-2-(E)-butenyl 4-phosphate synthase* (HDS) (Zhao dkk., 2013). Enzim-enzim tersebut dikode oleh DNA genom di inti sel, kemudian proteinnya mengalami translokasi ke kloroplas (Gambar 4.6A). Gen yang mengode enzim pada jalur MEP telah teridentifikasi pada tanaman model, seperti Arabidopsis dan padi (Pulido, Perello, & Rodriguez-Concepcion, 2012).

Pada jalur MEP, karotenoid dibentuk dari dua senyawa IPP dan DMAPP yang disintesis melalui jalur MEP di kloroplas. Peningkatan aliran IPP dan DMAPP dari jalur MEP mampu meningkatkan sintesis senyawa karotenoid. Aliran IPP dan DMAPP dari jalur MEP diatur oleh dua enzim penting pada jalur MEP, yaitu *DXS* dan *DXR*. Enzim *DXS* dan *DXR* dianggap sebagai faktor pembatas dalam sintesis isoprenoid, termasuk karotenoid. Dua enzim ini berkorelasi positif terhadap produksi senyawa karotenoid pada umbi-umbian (Henriquez dkk., 2016). Overekspresi gen *DXS* atau *DXR* dari Arabidopsis dapat meningkatkan kandungan klorofil dan karotenoid pada wortel. Peningkatan kandungan karotenoid ini disebabkan oleh overekspresi *DXS* atau *DXR* sehingga memicu peningkatan ekspresi gen *PSY1* dan *PSY2* yang mengode *phytoene synthase*, yaitu gen yang menjadi faktor pembatas dalam jalur karotenoid pada wortel (Simpson dkk., 2016). Sementara itu, overekspresi *DXS* dari bakteri pada kentang dapat meningkatkan kandungan karoten menjadi 2 kali dengan peningkatan kandungan *phytoene* mencapai 6–7 kali (Morris dkk., 2006). Berdasarkan data tersebut, *DXS* dan *DXR* berperan penting dalam memproduksi prekursor untuk menyintesis karotenoid. Oleh karena itu, gen



DXS dan *DXR* potensial untuk digunakan dalam merekayasa ubi kayu dengan kandungan karoten tinggi.

Saat ini, telah tersedia sekuens genomik ubi kayu <https://phytozome.jgi.doe.gov/> (Goodstein dkk., 2012). Berdasarkan sekuens genomik tersebut, gen *DXS* pada ubi kayu diidentifikasi menggunakan analisis BLAST dengan protein sebagai *query*. Selanjutnya, disusun pohon filogenetik menggunakan MEGA X dengan metode *neighbor-joining algorithm* (Kumar dkk., 2018). Berdasarkan analisis BLAST, didapatkan tujuh salinan gen *DXS* pada genom ubi kayu. Ketujuh sekuens asam amino tersebut memiliki tingkat kesamaan yang tinggi berkisar antara 97–98% dengan wortel, kentang, dan *Arabidopsis*. Sesuai dengan analisis filogeni, ketujuh *DXS* ubi kayu terbagi menjadi dua grup. Manes. 13G101600, Manes. 12G124300, Manes. 14G161600, dan Manes 06G028100 tergolong dalam grup pertama yang merupakan ortholog dari *DcDXS1* wortel dan merupakan representasi dari keluarga Apiaceae. Sementara itu, Manes.15G018800, Manes. 16G118600, dan Manes.03G017900 tergolong pada grup kedua yang merupakan ortholog dari *StDXS1* kentang dan merupakan representasi keluarga Euphorbiaceae. Sesuai dengan struktur *DXS* pada wortel,



Keterangan: Sekuens gen, protein, dan struktur gen diambil dari <https://phytozome.jgi.doe.gov/>.

Sumber: diadopsi dari Pulido dkk. (2012)

Gambar 4.9 A) *Methylethylthritol 4-phosphate pathway* (MEP). B) Pohon filogenetik dari sekuens asam amino *DXS* ubi kayu dibandingkan wortel (*Daucus carota*), kentang (*Solanum tuberosum*), dan *Arabidopsis thaliana* (kiri). Perbandingan struktur gen *DXS* ubi kayu dibandingkan wortel, kentang, dan *Arabidopsis* (kanan).

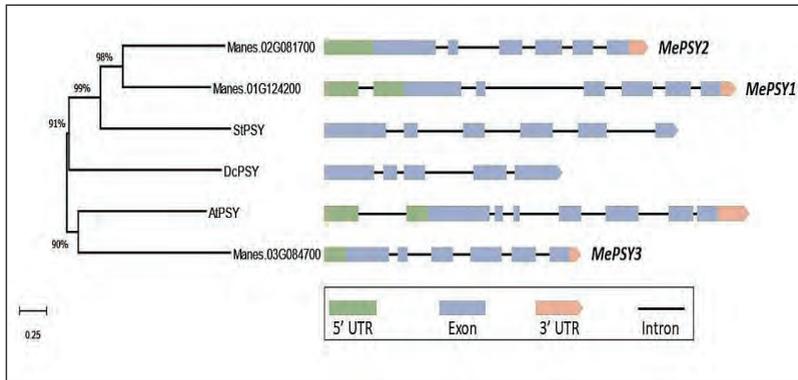
kentang, dan Arabidopsis, ketujuh gen *DXS* pada ubi kayu tersusun atas 10 ekson dan 9 intron (Gambar 4.9B).

c. *Phytoene synthase (PSY)*

Geranylgeranyl pyrophosphate (GGPP) merupakan prekursor dalam biosintesis karotenoid. GGPP yang tersusun atas 20 karbon (C_{20}) merupakan hasil kondensasi dari DMAPP (C_5) dan beberapa senyawa IPP (C_5). Reaksi ini diawali oleh kondensasi DMAPP dan IPP membentuk *geranyl pyrophosphate* (GPP, C_{10}). Penambahan IPP pada GPP menghasilkan *farnesyl pyrophosphate* (FPP, C_{15}) dan penambahan IPP pada FPP menghasilkan GGPP. Reaksi kondensasi ini dikatalisis oleh enzim *Geranyl diphosphate synthase* (GPS) dan *Geranylgeranyl diphosphate synthase* (GGPS). Selanjutnya, dua senyawa GGPS mengalami reaksi kondensasi membentuk senyawa *phytoene* (C_{40}) yang difasilitasi oleh enzim *Phytoene synthase* (PSY). *Phytoene* adalah senyawa hidrokarbon tidak berwarna dan merupakan komponen utama penyusun senyawa karotenoid pada tanaman (Fraser & Bramley, 2004).

Tanaman dengan kandungan karotenoid rendah disebabkan oleh rendahnya ekspresi atau aktivitas enzim *PSY*. Sebagai contoh, tanaman ubi kayu berumbi kuning memiliki aktivitas enzim *PSY* lebih tinggi daripada ubi kayu berumbi putih. Hal ini karena terdapat single *nucleotide polymorphism* (SNP) pada gen *PSY*, di mana perubahan asam amino alanin menjadi asam aspartat ($A_{191}D$) menyebabkan aktivitas *PSY* pada ubi kuning lebih tinggi daripada ubi kayu putih (Welsch dkk., 2010). Ubi kayu memiliki tiga gen *PSY* pada genomnya, di mana *PSY1* dan *PSY2* bertanggung jawab dalam *phytoene synthase*, sedangkan *PSY3* berperan dalam stres abiotik (Arango dkk., 2010).

Gen *PSY* pada ubi kayu diidentifikasi menggunakan analisis BLAST dengan protein sebagai *query* terhadap genomik *database*. Selanjutnya, disusun pohon filogenetik menggunakan MEGA X dengan metode *neighbor-joining algorithm* (Kumar dkk., 2018). Sesuai dengan hasil analisis BLAST, didapatkan tiga salinan gen *PSY* pada



Keterangan: Pohon filogenetik dari sekuens asam amino *MePSY* ubi kayu dibandingkan dengan wortel (*Daucus carota*), kentang (*Solanum tuberosum*), dan *Arabidopsis thaliana* (kiri). Perbandingan struktur gen *DXS* ubi kayu dibandingkan dengan wortel, kentang, dan *Arabidopsis* (kanan). Sekuens gen, protein dan struktur gen

Sumber: Goodstein dkk. (2012)

Gambar 4.10 Pohon Filogenetik dan Struktur Gen *PSY*

genom ubi kayu. Sekuens-sekuens asam amino *PSY* dari ubi kayu tersebut memiliki tingkat kesamaan yang tinggi berkisar antara 90–98% dengan wortel, kentang, dan *Arabidopsis*. Berdasarkan analisis filogeni, *PSY* ubi kayu digolongkan menjadi dua grup. *MePSY1* (Manes.01G124200) dan *MePSY2* (Manes.02G081700) tergolong dalam grup pertama yang merupakan ortholog dari *PSY* dari kentang dan wortel. Grup pertama ini merupakan representasi gen *PSY* dari keluarga Euphorbiaceae. Sementara itu, *MePSY3* (Manes.03G084700) tergolong pada grup kedua yang merupakan ortholog dari *AtPSY1* dan merupakan representasi keluarga Poaceae. Ketiga gen *MePSY* ini tersusun atas enam ekson dan lima intron sesuai dengan struktur *PSY* pada wortel, kentang, dan *Arabidopsis* (Gambar 4.10).

d. Carotene Desaturase

Reaksi kondensasi dua molekul GGPP yang dikatalisis oleh *PSY* menghasilkan 15-*cis-phytoene*, yang kemudian dikonversi menjadi likopen dalam proses desaturasi/isomerasi. Proses desaturasi/isomerasi secara berurutan dikatalisis oleh *Phytoene desaturase* (PDS),

Buku ini tidak diperjualbelikan.

15-*cis*-zeta carotene isomerase (Z-ISO), zeta carotene desaturase (ZDS), dan *Prolycopene isomerase* (CrtISO). PDS menambahkan dua ikatan rangkap pada 15-*cis*-phytoene menghasilkan 9, 15, 9' *tri*-*cis*-zeta karoten. Kemudian, senyawa ini mengalami proses isomerisasi oleh Z-ISO membentuk 9, 9' *di*-*cis*-zeta carotene (Chen, Li, & Wurtzel 2010). Penambahan kembali dua ikatan rangkap pada 9, 9' *di*-*cis*-zeta karoten oleh ZDS menghasilkan 7, 9, 7', 9' *tetra*-*cis*-likopen (prolikopen). Selanjutnya, *tetra*-*cis*-likopen dikonversi menjadi *trans*-likopen oleh enzim CrtISO (Yu dkk., 2011; Nisar dkk., 2015).

Reaksi desaturasi/isomerisasi senyawa *phytoene* dalam proses sintesis karoten dikatalisis oleh empat enzim, yaitu PDS, Z-ISO, ZDS, dan CrtISO. Sementara itu, pada bakteri, proses desaturasi/isomerisasi dikode hanya oleh enzim *crtI* atau *crtB* (Giuliano dkk., 2008) sehingga gen *crtI/crtB* dari bakteri ini diintroduksi pada umbi-umbian untuk meningkatkan kandungan beta karoten. Overekspresi gen *crtI* meningkatkan kandungan karotenoid sehingga bisa mengubah ubi putih menjadi berwarna kuning (Welsch dkk., 2010). Konsentrasi beta karoten dapat ditingkatkan lagi dengan teknik koekspresi gen *crtB* dan *DXS* pada ubi kayu. Teknik ini dapat meningkatkan kandungan karotenoid sampai 50 µg/g dari berat kering. Menariknya, 85–90% kandungan karotenoidnya dalam bentuk *trans*-beta-karoten sangat bermanfaat bagi tubuh manusia. Selain itu, teknik koekspresi gen *crtI-DXS* ini juga dapat menunda kerusakan fisiologis pascapanen yang merupakan kendala utama dalam pemanfaatan ubi kayu (Beyene dkk., 2018).

Gen yang mengode enzim zeta karoten desaturase (ZDS) telah dikarakterisasi dan diisolasi dari ubi jalar. Overekspresi *IbZDS* meningkatkan kandungan beta karoten menjadi 2,24–3,96 kali, sedangkan lutein menjadi 1,74–2,37 kali. Hal ini disebabkan oleh peningkatan ekspresi *IbZDS* diikuti oleh meningkatnya ekspresi gen likopen *beta-cyclase* (*beta-LCY*) and beta karoten *hydroxylase* (*beta-CHY*). Overekspresi gen *IbZDS* juga menyebabkan peningkatan kandungan *Abscisic acid* (ABA) dan *proline* serta ekspresi gen yang ber-



hubungan dengan stres abiotik, seperti *superoxide dismutase* (SOD), *catalase* (CAT), dan *peroxidase* (POD) sehingga tanaman ubi jalar menjadi lebih tahan terhadap kekeringan (Li dkk., 2017).

e. Likopen beta-cyclase (LCYB)

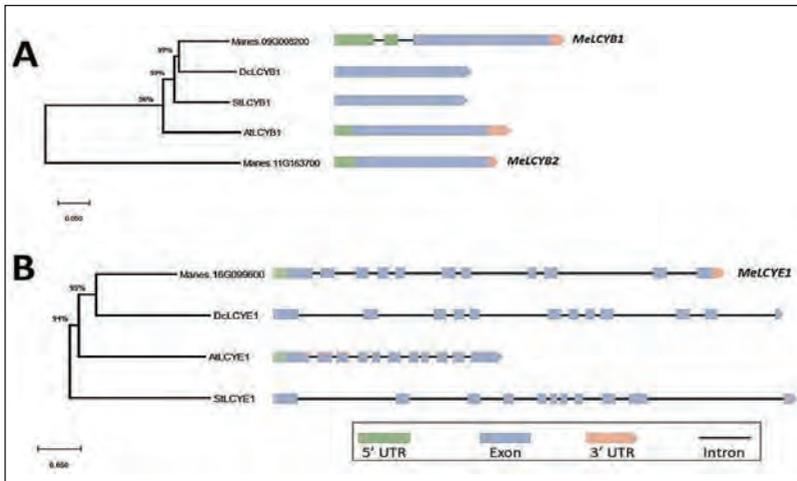
Setelah pembentukan likopen, jalur biosintesis karotenoid terbagi menjadi dua cabang, yaitu *alfa branch* dan *beta branch*. Pada *alfa branch*, enzim *LCYE* dan *LCYB* mengubah likopen menjadi alfa karoten dengan mengatalisis reaksi siklisasi pembentukan *alfa ring* dan *beta ring*. Siklisasi adalah proses pembentukan cincin (*ring*) *cyclohexane* pada salah satu atau kedua ujung senyawa karotenoid, khususnya likopen. Pembentukan cincin ini dikatalisis oleh enzim likopen-beta-cyclase (*LCYB*) dan likopen-epsilon-cyclase (*LCYE*). Enzim *LCYB* mengatalisis pembentukan *beta ring*, sedangkan *LCYE* mengatalisis pembentukan *alfa ring*. Perbedaan antara *alfa ring* dan *beta ring* terletak hanya pada posisi ikatan rangkap pada *cyclohexane-ring*. Enzim *LCYB* mampu membentuk *cyclohexane-ring* pada kedua ujung senyawa likopen dan menghasilkan senyawa beta karoten. Sementara itu, *LCYE* hanya bisa membentuk *cyclohexane-ring* pada salah satu ujung likopen. Untuk menghasilkan senyawa alfa karoten, yang mempunyai *cyclohexane-ring* pada kedua ujungnya, dibutuhkan aktivitas dari *LCYE* dan *LCYB*.

Gen *LCYB* pada ubi kayu diidentifikasi menggunakan analisis BLAST dengan menggunakan *AtLCYB* protein sebagai *query* terhadap genomik *database*. Selanjutnya, disusun pohon filogenetik menggunakan MEGA X dengan metode *neighbor-joining algorithm* (Kumar dkk., 2018). Sesuai dengan hasil analisis BLAST, didapatkan dua salinan gen *LCYB* pada genom ubi kayu, yaitu *MeLCYB1* (Manes.09G008200) dan *MeLCYB1* (Manes.11G163700). Kedua sekuens asam amino *LCYB* dari ubi kayu memiliki tingkat kesamaan yang sangat tinggi, yaitu 96–99% dengan wortel, kentang, dan *Arabidopsis*. Hal ini unik karena kedua gen *MeLCYB* ini hanya tersusun oleh satu ekson tanpa intron sesuai dengan struktur *LCYB* pada wortel, kentang, dan

Arabidopsis (Gambar 4.8A). Sementara itu, gen *LCYE* hanya terdapat satu salinan pada genom ubi kayu yang terletak pada kromosom 16. Gen *MeLCYE1* ini tersusun atas 11 ekson dan 10 intron. Sekuens asam amino *MeLCYE1* memiliki tingkat kesamaan yang tinggi (94–95%) dibandingkan wortel, kentang, dan Arabidopsis (Gambar 4.11 B).

Dari alfa karoten ini, selanjutnya akan disintesis senyawa *zeinoxanthin* dan lutein secara berurutan melalui proses hidroksilasi dan epoksidasi. Sementara itu, pada *beta branch*, enzim *LCYB* mengubah likopen menjadi beta karoten dengan mengatalisis pembentukan beta ring. Kemudian, senyawa beta karoten akan diubah menjadi beta kriptoksantin dan zeaksantin melalui proses hidroksilasi dan epoksidasi secara berurutan.

Di antara karotenoid lain, beta karoten merupakan sumber utama vitamin A yang sangat penting bagi kesehatan manusia, yaitu melin-



Keterangan: Pohon filogenetik dari sekuens asam amino *MeLCYB* dan *MeLCYE* dibandingkan wortel (*Daucus carota*), kentang (*Solanum tuberosum*), dan Arabidopsis *thaliana* (kiri). Perbandingan struktur gen *BCH* ubi kayu dibandingkan wortel, kentang, dan Arabidopsis (kanan).

Sumber: Goodstein dkk. (2012)

Gambar 4.11 Pohon Filogenetik dan Struktur Gen (A) *LCYB* dan (B) *LCYE*

Buku ini tidak diperjualbelikan.

dungi dari penyakit degeneratif, penyakit kardiovaskular, kanker, dan kekurangan vitamin A. Oleh karena itu, beta karoten menjadi target yang menarik dalam rekayasa metabolisme dibandingkan karotenoid yang lain.

Overekspresi gen *LCYB* pada beberapa tanaman umbi mampu meningkatkan kandungan beta karoten. Sebagai contoh, gen *LCYB* dari ubi jalar, *IbLCYB2*, yang dioverekspresikan pada ubi jalar meningkatkan kandungan beta karoten, *beta-cryptoxanthin* dan zeaksantin. Gen ini juga meningkatkan kandungan ABA dan *proline* sehingga meningkatkan ketahanan pada stres abiotik (Kang dkk., 2018). Selain itu, gen *LCYB* dari kentang, *StLCYB*, juga meningkatkan kandungan beta karoten sampai dua kali dibandingkan tanaman kontrol (Song dkk., 2016). Pada wortel, overekspresi *DcLCYB1* menyebabkan peningkatan kandungan beta karoten mencapai tiga kali dari kandungan awal (Moreno dkk., 2013). Oleh karena itu, peningkatan ekspresi gen *LCYB* dapat dijadikan strategi untuk meningkatkan kandungan beta karoten pada ubi kayu.

3. Perbaikan Melalui Teknik *Down-regulasi Gen*

Perbaikan melalui teknik *down-regulasi gen* atau dikenal juga dengan “*block strategy*” pada dasarnya dilakukan dengan menghambat ekspresi gen atau aktivitas enzim yang berkontribusi negatif terhadap akumulasi beta karoten. Ekspresi gen dapat dihambat pada level transkripsi, sedangkan penghambatan aktivitas enzim dapat dilakukan dengan membuat mutasi pada sekuens DNA di genom. Teknologi RNA *interference* (RNAi) dapat diterapkan untuk menghambat ekspresi gen target pada level transkripsi, sedangkan *genome editing* dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan mutasi pada DNA target.

RNAi adalah teknologi untuk menghambat ekspresi gen target dengan memanfaatkan *double strand RNA* (dsRNA) sebagai pemantik yang menyebabkan terjadinya *gene silencing* (Younis dkk., 2014). dsRNA dimasukkan pada sel tanaman dengan memanfaatkan

Agrobacterium. Sementara itu, *genome editing* adalah teknologi untuk menghasilkan mutasi, baik dalam bentuk insersi, delesi, maupun substitusi basa pada sekuens gen target di dalam genom (Manghwar dkk., 2019). Teknologi *genome editing* ini meliputi beberapa teknik, seperti *zinc finger nucleases* (ZFNs), *transcriptional activator-like effector nucleases* (TALENs), dan *clustered regularly interspaced short palindromic repeat* (CRISPR)/CRISPR-associated nuclease 9 (CRISPR/Cas9). Penerapan teknologi *genome editing* pada tanaman juga memanfaatkan *Agrobacterium*.

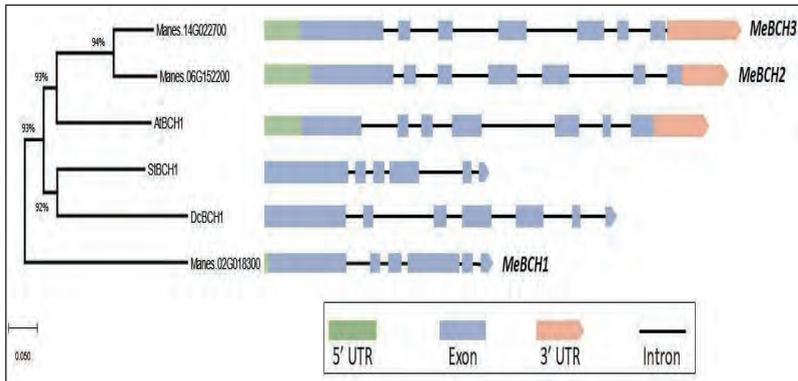
Berikut ini akan dijelaskan tentang gen yang dapat menjadi target dalam perbaikan melalui teknik *down*-regulasi. Likopen-epsilon-cyclase (*LCYE*) dan *beta-Hydroxylases* (*BCH*) dapat digunakan sebagai gen target dalam usaha meningkatkan kandungan beta karoten. *Down*-regulasi gen *LCYE* dan *BCH* telah dilakukan pada ubi jalar dan kentang serta terbukti meningkatkan kandungan beta karoten. Hal ini dapat digunakan sebagai pembanding untuk diterapkan pada ubi kayu.

a. Likopen-epsilon-cyclase (*LCYE*)

Sebagaimana dijelaskan sebelumnya, bahwa setelah terbentuknya likopen, jalur biosintesis karotenoid terbagi atas dua cabang, yaitu jalur *alfa branch* dan *beta branch*. Dua jalur ini menggunakan substrat yang sama sehingga terjadi kompetisi antara *LCYE* dan *LCYB* dalam penggunaan likopen. Oleh karena itu, pemblokiran jalur *alfa branch* akan meningkatkan aliran likopen pada *beta branch* sehingga akan meningkatkan sintesis beta karoten dan zeaksantin. Teknik ini telah diterapkan untuk meningkatkan kandungan beta karoten pada kentang sehingga sangat potensial untuk diterapkan pada ubi kayu.

Down-regulasi gen *IbLCYE* dengan teknik RNAi pada kalus ubi jalar meningkatkan kandungan beta karoten sampai 21 kali dibandingkan kalus kontrol, sedangkan kandungan alfa karoten dan lutein tidak terdeteksi (Kim dkk., 2012). Sementara itu, pada umbi kentang, *down*-





Keterangan: Pohon filogenetik dari sekuens asam amino *MeBCH* ubi kayu dibandingkan wortel (*Daucus carota*), kentang (*Solanum tuberosum*), dan *Arabidopsis thaliana* (kiri). Perbandingan struktur gen *BCH* ubi kayu dibandingkan wortel, kentang, dan *Arabidopsis* (kanan).

Sumber: Goodstein dkk. (2012)

Gambar 4.12 Pohon Filogenetik dan Struktur Gen *BCH1*

regulasi *StLCYE* menyebabkan peningkatan beta karoten mencapai 14 kali dibandingkan kontrolnya dan menurunkan kandungan lutein secara signifikan (Diretto dkk., 2006).

b. *Beta-Hydroxylases (BCH)*

Pada jalur *beta branch*, beta karoten dikonversi menjadi zeaksantin oleh enzim beta karoten *hydroxylase (BCH)*. Pemblokiran aktivitas *BCH* dapat digunakan sebagai strategi untuk meningkatkan kandungan beta karoten. Sebagai contoh, *down-regulasi* gen *StBCH* pada kentang dapat meningkatkan kandungan beta karoten menjadi 3 µg/g dari berat kering, sedangkan kandungan zeaksantin menurun sangat signifikan.

Sesuai dengan hasil analisis BLAST menggunakan sekuens protein *BCH* sebagai *query* pada sekuens genom ubi kayu, didapatkan tiga salinan gen *BCH*, yaitu *MeBCH1* (Manes.06G152200), *MeBCH2* (Manes.14G022700), dan *MeBCH3* (Manes.02G018300). Sekuens asam amino *MeBCH1* dari ubi kayu memiliki tingkat kesamaan sebesar 93% dengan *DcBCH* dari wortel dan *StBCH* dari kentang.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Sementara itu, *MeBCH2* dan *MeBCH3* memiliki kesamaan sebesar 93% dengan *AtBCH1* dari *Arabidopsis*. Oleh karena itu, *BCH* ubi kayu dapat digolongkan menjadi dua grup, yaitu 1) *MeBCH1* pada grup pertama, ortholog dari *DcBCH* dan *StBCH*, representasi dari keluarga *Euphorbiaceae*; dan 2) *MeBCH2* dan *MeBCH3* pada grup kedua, ortholog *AtBCH1* dan representasi dari keluarga *Poaceae*. Gen *MeBCH1* tersusun atas enam ekson dan lima intron, sedangkan *MeBCH2* dan *MeBCH3* tersusun atas tujuh ekson dan enam intron (Gambar 4.12).

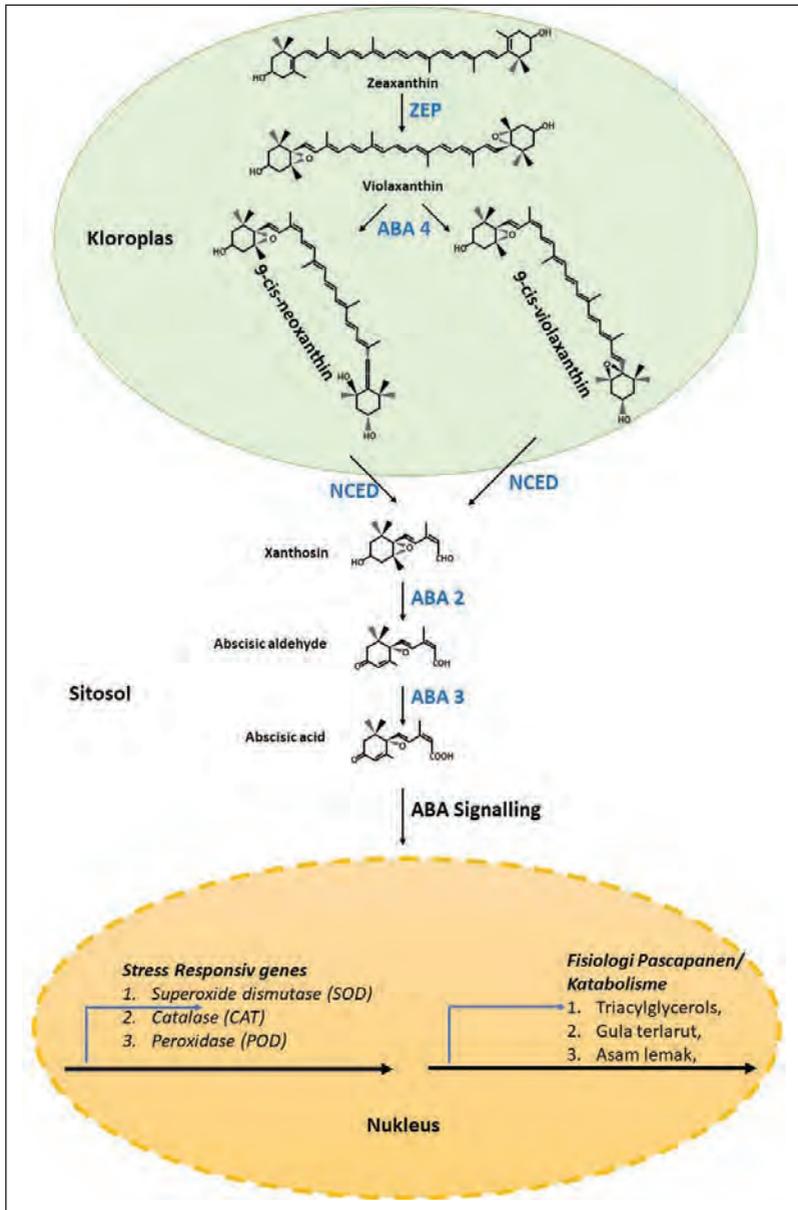
E. Pengaruh Modifikasi Karotenoid terhadap Fenotip Tanaman

Karotenoid adalah prekursor pembentukan *abscisic acid* (ABA) sehingga modifikasi kandungan karotenoid akan berimplikasi pada sintesis hormon ABA. Mengingat ABA adalah hormon yang berperan dalam kondisi stres, modifikasi karotenoid juga akan memengaruhi fenotip tanaman pada kondisi stres. Berikut ini dijelaskan mengenai pengaruh peningkatan karotenoid terhadap fenotip tanaman yang juga akan sangat terkait dengan ABA.

1. Ketahanan pada Stress Abiotik

Peningkatan kandungan beta karoten melalui rekayasa genetik diikuti dengan meningkatnya ketahanan pada stres abiotik, seperti kekeringan dan stres garam. Secara molekuler, peningkatan ketahanan ini ditandai dengan meningkatnya ekspresi gen yang berhubungan dengan stres abiotik, seperti *superoxide dismutase* (*SOD*), *catalase* (*CAT*) dan *peroxidase* (*POD*). Peningkatan kandungan beta karoten juga diikuti meningkatnya kandungan hormon ABA (Li dkk., 2017). Hal ini disebabkan oleh beta karoten sebagai prekursor pembentukan ABA.

Dalam proses biosintesis ABA, beta karoten mengalami hidroksilasi oleh enzim beta Karoten *hydroxylase* menghasilkan zeaksantin. Selanjutnya, zeaksantin mengalami proses epoksidasi yang dikatalisis oleh enzim Zeaksantin *epoxidase* (*ZEP*) membentuk 9-*cis*-violaksantin



Sumber: Nambara & Marion-Poll (2005); Felemban dkk. (2019)

Gambar 4.13 Jalur Biosintesis ABA dan Hubungannya dengan Ekspresi Gen

Buku ini tidak diperjualbelikan.

dan *all-trans*-neoksantin. Enzim ABA4 mengonversi 9-*cis*-violaksantin dan *all-trans*-neoksantin menjadi 9-*cis*-neoksantin. Kemudian, 9-*cis*-neoksantin dipotong oleh enzim *Nine-cis-epoxy-dioxygenase* (NCED) menghasilkan *xanthoxin*. Selanjutnya, *xanthoxin* keluar dari kloroplas sehingga dapat diakses oleh dua enzim penyintesis ABA, yaitu ABA2 dan ABA3. ABA 2 mereduksi *xanthoxin* menjadi *abscisic aldehyde*, sedangkan ABA 3 mengoksidasi *abscisic aldehyde* menjadi ABA (Felemban dkk., 2019) seperti tampak dalam Gambar 4.13.

ABA merupakan hormon yang secara molekuler berperan dalam mengatur respons tanaman dalam menghadapi stres dan terlibat dalam berbagai proses perkembangan tanaman. Peningkatan kandungan ABA pada tanaman akan mengaktifkan ABA *signaling* yang pada akhirnya akan menginduksi gen-gen yang berfungsi menghadapi stres abiotik, seperti *SOD*, *CAT*, dan *POD* sehingga tanaman menjadi lebih tahan pada kondisi stres abiotik (Vishwakarma dkk., 2017).

ABA berperan dalam mengatur penyerapan air dan mengatur stomata untuk meminimalisasi kehilangan air pada kondisi stres kekeringan (Munemasa dkk., 2015). Kandungan ABA yang tinggi pada kondisi stres abiotik akan memicu ABA *signaling* yang mengakibatkan *ion channel* menjadi aktif disebabkan oleh akumulasi Ca^{2+} pada luar sel stomata. Akibatnya, K^+/Cl^- akan dipompa ke luar sel sehingga tekanan turgor pada stomata menurun yang menyebabkan stomata menutup. Menutupnya stomata ini akan menekan kehilangan air melalui penguapan pada kondisi stres.

2. Memperpanjang Umur Simpan Umbi

Peningkatan kandungan karoten juga berkontribusi pada penundaan kerusakan fisiologis pascapanen sehingga memperpanjang waktu simpan. Kandungan karotenoid yang tinggi pada ubi kayu juga meningkatkan kandungan ABA. ABA akan memicu menutupnya lentisel sehingga meminimalisasi kehilangan air melalui proses penguapan selama penyimpanan umbi. Namun, penundaan kerusakan fisiologis

ini berdampak pada penurunan kandungan pati karena mengalami degradasi menjadi *triacylglycerol* dan gula terlarut (Beyene dkk., 2018). Hal ini menandakan bahwa umur simpan yang panjang memerlukan energi yang diperoleh dari katabolisme pati menjadi *triacylglycerol* dan gula terlarut.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

BAB V

Bioaktivitas dan Bioaksesibilitas Beta Karoten serta Karotenoid Lain pada Tubuh Manusia



Jumlah asupan bahan pangan bergizi sering kali dikaitkan dengan adanya klaim perbaikan kondisi kesehatan tubuh manusia. Efek ini diberikan oleh senyawa atau molekul yang terkandung dalam bahan pangan, seperti beta karoten dan karotenoid lain melalui efek antioksidan, anti-inflamasi, dan perbaikan sistem imun (Bohn, 2017; Stahl & Sies, 2005). Dampak positif ini disebut dengan bioaktivitas dan didapatkan setelah bahan pangan tercerna dalam tubuh manusia oleh enzim pencernaan, serta diserap dalam bentuk molekul kompleks oleh sel-sel organ pencernaan manusia (Chacón-Ordóñez, Carle, & Schweiggert, 2019; Reboul, 2019). Jumlah molekul nutrisi aktif yang tercerna dari bahan pangan dan tersedia di dalam tubuh manusia disebut dengan bioaksesibilitas (Galanakis, 2017). Keseluruhan proses pencernaan, penyerapan, metabolisme, distribusi molekul nutrisi aktif di dalam tubuh dan fungsi biologis (bioaktivitas) merupakan bioavailabilitas nutrisi pangan (Galanakis, 2017). Di dalam bab ini, akan dijabarkan mengenai potensi bioaktivitas beta karoten untuk kese-

Buku ini tidak diperjualbelikan.

hatan manusia dan mekanisme metabolisme karotenoid serta penyerapannya di dalam tubuh.

A. Bioaktivitas Beta Karoten pada Tubuh untuk Mendukung Kesehatan

Beta karoten bersama dengan senyawa karotenoid yang memiliki struktur satu atau dua cincin beta-ionon, yaitu alfa karoten dan beta kriptoksantin, memiliki aktivitas provitamin A atau prekursor vitamin A (Nagarajan dkk.,1998). Aktivitas provitamin A dari ketiga karotenoid tersebut dapat diubah menjadi vitamin A retinol setelah proses penyerapan di dalam tubuh oleh enzim oksigenase. Satuan besaran provitamin A terkini adalah *Retinol Activity Equivalent* (RAE), di mana 1 RAE sebanding dengan 12 µg beta karoten, 24 µg alfa karoten, atau 24 µg beta kriptoksantin (IOM, 2001). Sebelumnya, satuan besaran provitamin A adalah *Retinol Equivalent* (RE) dengan 1 RE adalah 6 µg beta karoten atau 12 µg karotenoid yang lain (Eitenmiller, Ye, & Landen, 2008; Saini, Nile, & Park, 2015). Pada label suplemen vitamin atau produk makanan, sering ditemukan satuan unit *International Unit* (IU), di mana 1 IU setara dengan 0,6 µg beta karoten. Jumlah besaran asupan provitamin A yang disarankan untuk dikonsumsi pada wanita sekitar 700 µg RAE per hari, sedangkan pada pria 900 RAE µg per hari (IOM, 2001) atau sebanding dengan 1.000 RE per hari untuk pria dan 800 RE untuk wanita (Eitenmiller dkk., 2008). Besaran asupan vitamin A per hari dapat dilihat selengkapnya pada Tabel 5.1.

Provitamin A akan dimetabolisme tubuh menjadi vitamin A yang melibatkan enzim mono- atau di-oksigenase. Kelompok molekul vitamin A terdiri dari retinol, retinal, asam retinoat, dan retinil asetat (Gambar 5.1). Vitamin A sangat penting untuk penglihatan, ekspresi gen, diferensiasi sel, morfogenesis, pertumbuhan, fungsi kekebalan tubuh, dan perkembangan embrio pada ibu hamil (IOM, 2001; Nagarajan dkk., 2017). Vitamin A retinal merupakan komponen pen-

ting dari rodopsin, yaitu protein yang menyerap cahaya di reseptor retinal, terutama cahaya biru yang memiliki energi yang besar dan panjang gelombang pendek, melindungi retina dari kerusakan akibat fotokimia, dan mendukung diferensiasi dan fungsi normal lapisan konjungtival dan kornea (Eggersdorfer & Wyss, 2018).

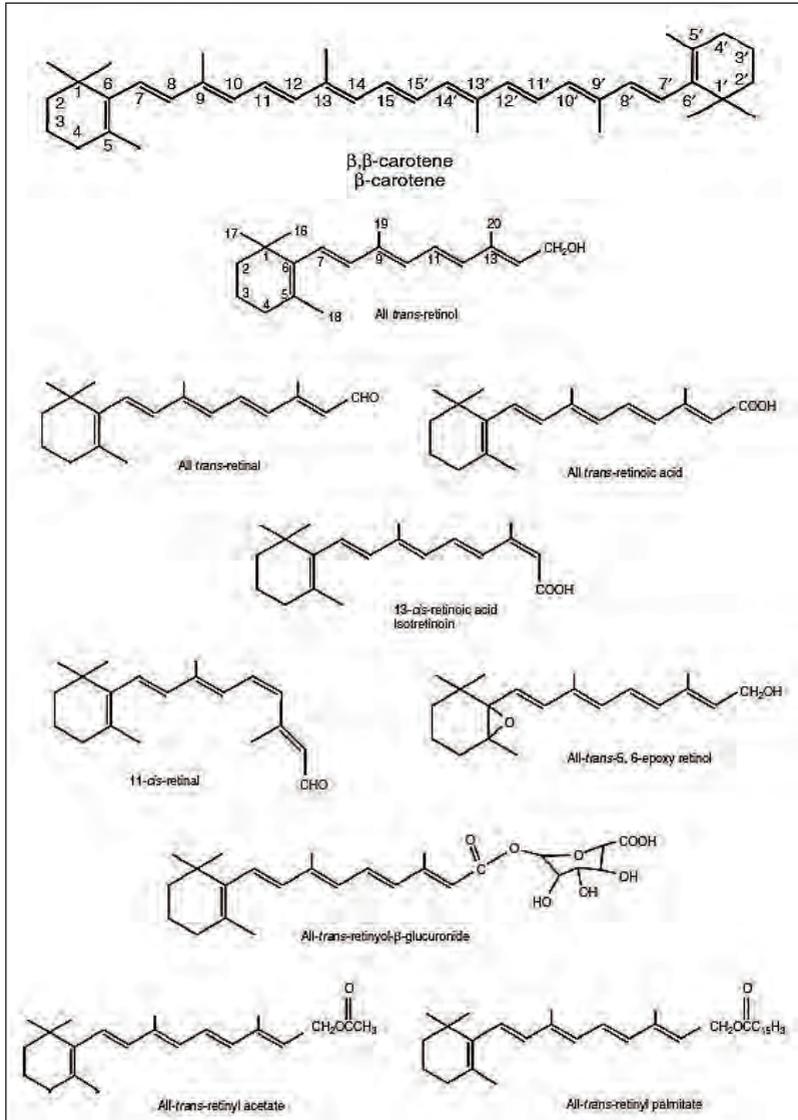
Beta karoten dan karotenoid lain memiliki aktivitas antioksidan, terutama untuk menangkal radikal bebas dengan mendeaktivasi *reactive oxygen species* (ROS) yang salah satunya berupa singlet oksigen ($^1\text{O}_2$) atau bentuk reaktif dari oksigen yang menginduksi proses oksidasi di dalam sel (Sies, Stahl, & Sundquist, 1992). Aktivitas antioksidan ini sangat penting dalam menjaga performa kognitif. Hasil studi dengan suplementasi beta karoten dengan dosis 50 mg dan plasebo secara bergantian setiap harinya menunjukkan performa memori verbal yang signifikan (Eggersdorfer & Wyss, 2018). Beta karoten juga dapat membantu mengurangi efek paparan sinar UV pada kulit, kulit terbakar akibat sinar matahari, dan penuaan kulit (Eggersdorfer & Wyss, 2018; Perera & Yen, 2007). Beta karoten sebagai antioksidan bekerja dengan mendeaktivasi molekul radikal bebas dengan mendonasikan satu ion hidrogen (Yusuf dkk., 2012). Selain itu, beta karoten berfungsi sebagai penyerap radikal oksigen atau *oxygen radical scavengers*, seperti singlet oksigen ($^1\text{O}_2$) melalui oksidasi *irreversible* dan berperan sebagai deaktivator singlet oksigen dengan mekanisme tukar muatan ion (Sies dkk., 1992; Yusuf dkk., 2012) seperti tampak dalam Gambar 5.2.

Tabel 5.1. Besaran Asupan per Hari dan Dosis Tertinggi Vitamin A

Kelompok Umur	Besaran Asupan per Hari (μg retinol activity equivalent/day)	Dosis Tertinggi (μg retinol activity equivalent/day)
Bayi (Bulan)		
0–6	400	600
7–12	500	600
Anak-anak (Tahun)		
1–3	300	600
4–8	400	900
Pria (Tahun)		
9–13	600	1.700
14–18	900	2.800
19–30	900	3.000
31–50	900	3.000
51–70	900	3.000
>70	900	3.000
Wanita (Tahun)		
9–13	600	1.700
14–18	700	2.800
19–30	700	3.000
31–50	700	3.000
51–70	700	3.000
>70	700	3.000
Ibu Hamil (Tahun)		
≤ 18	750	2.800
19–30	770	3.000
31–50	770	3.000
Ibu Menyusui (Tahun)		
≤ 18	1.200	2.800
19–30	1.300	3.000
31–50	1.300	3.000

Sumber: Eitenmiller dkk. (2008)

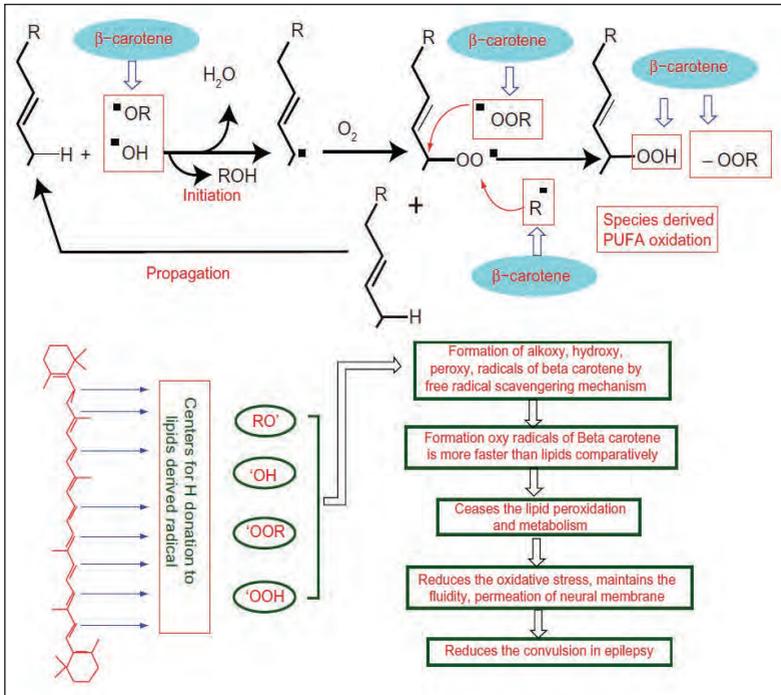
Buku ini tidak diperjualbelikan.



Sumber: Eitenmiller dkk. (2008)

Gambar 5.1 Struktur Kimia Beta Karoten (A) dan Molekul Vitamin A atau Retinol dan Senyawa Isomernya (B)

Buku ini tidak diperjualbelikan.



Sumber: Yusuf dkk. (2012)

Gambar 5.2 Mekanisme Bioaksi Beta Karoten sebagai Pendonası Ion Hydrogen untuk Mendeaktivasi Radikal Bebas dan Penyerap Radikal Bebas

Selain itu, vitamin A retinoid dan apo-karotenoid membantu diferensiasi jaringan adiposit sehingga membantu penurunan lemak abdominal dan subkutan. Oleh karena itu, karotenoid juga dipercaya memiliki peran dalam menjaga berat badan dan obesitas (Eggersdorfer & Wyss, 2018). Beta karoten bersama karotenoid yang lain berperan dalam pencegahan kanker, seperti kanker kulit dan payudara (Sies dkk., 1992). Hasil studi klinis juga menunjukkan beta karoten berpotensi mengurangi risiko kanker paru dan gastrik karena aktivitasnya sebagai pencegah radikal bebas dan mengatur ekspresi gen dan protein yang berkaitan dengan modulasi tekanan inflamasi dan oksidatif (Eggersdorfer & Wyss, 2018).

Konsumsi bahan pangan atau produk olahan pangan atau suplemen dengan kandungan beta karoten dan vitamin A dengan besaran asupan yang melebihi anjuran per hari dapat menyebabkan dampak negatif terhadap kesehatan. Hasil uji klinis menunjukkan bahwa asupan vitamin A yang berlebihan akan menyebabkan keracunan dengan gejala seperti gangguan sistem pencernaan, gangguan sistem saraf, pengelupasan kulit, kerusakan hati, dan teratogenik pada embrio (Dibley & Jeacocke, 2001). Asupan vitamin A yang berlebihan juga akan memengaruhi penyerapan vitamin D sehingga akan menyebabkan defisiensi vitamin D. Namun, beta karoten, sebagai prekursor vitamin A, tidak beracun bila berlebih secara alami. Bila cukup vitamin A, tubuh tidak akan membuat vitamin dari beta karoten. Namun, kelebihan suplemen beta karoten tidak menguntungkan untuk kesehatan dan bila sangat berlebih akan menyebabkan kulit menjadi kuning (Dibley & Jeacocke, 2001).

B. Bioaksesibilitas Beta Karoten di dalam Tubuh Manusia

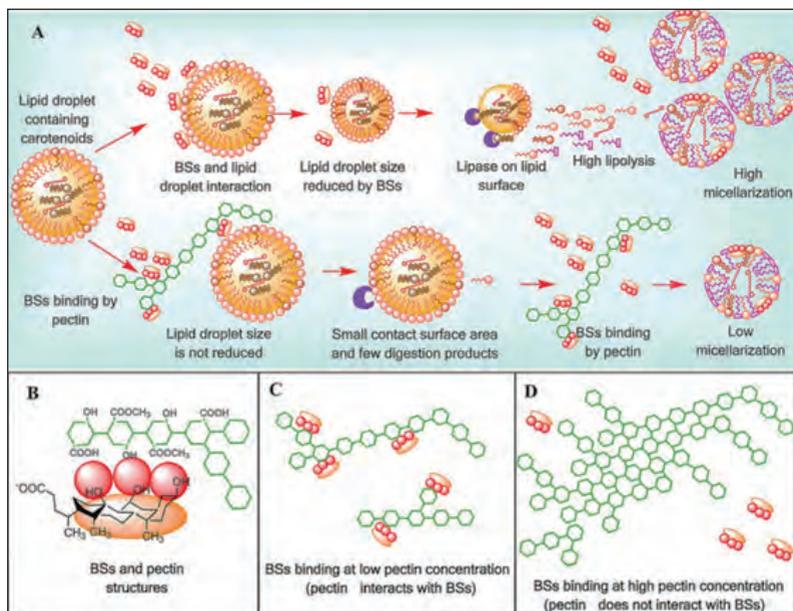
Beta karoten dan karotenoid merupakan salah satu mikronutrien terlarut dalam lemak yang tecerna di awal sistem pencernaan manusia, bersama dengan molekul lipid, seperti lemak. Secara umum, proses penyerapan beta karoten dan karotenoid melibatkan tahapan lepasnya senyawa pigmen ini dari matriks bahan pangan, inkorporasi senyawa ini dalam bentuk *droplet* lipid dan pembentukan struktur misel sebelum diserap oleh sel epitel usus halus atau enterosit (Cervantes-Paz dkk., 2017; Chacón-Ordóñez dkk., 2019; Reboul, 2019). Tahapan pertama dari digesti karotenoid adalah tecernanya bahan pangan dengan kandungan karotenoid secara mekanis di dalam mulut dengan bantuan gigi dan enzim saliva, seperti amilase (Cervantes-Paz dkk., 2017; Chacón-Ordóñez dkk., 2019). Enzim amilase membantu pemecahan pati dalam matriks bahan pangan sehingga mempermudah pelepasan karotenoid dari bahan pangan. Tahapan pencernaan selanjutnya di dalam lambung juga membantu pelepasan karotenoid lebih

banyak lagi dari bahan pangan dengan bantuan gerakan peristaltik dan aktivitas enzim lipase dan pepsin (Chacón-Ordóñez dkk., 2019). Pelarutan karotenoid terjadi di dalam lambung dan usus dua belas jari atau duodenum dengan membentuk *droplet* lipid bersama kelompok lipid tecerna dari bahan pangan (Chacón-Ordóñez dkk., 2019; Reboul, 2019). Dalam proses ini, struktur karotenoid tidak berubah, tetapi terjadi hidrolisis gugus ester oleh kelompok enzim lipase, yaitu *cholesterol ester hydrolase* (CEH) yang dihasilkan dari cairan pankreas (Reboul, 2019; Saini dkk., 2015). Proses hidrolisis terjadi karena karotenoid secara alamiah pada tanaman ada dalam bentuk terikat dengan gugus ester. Gugus ester lain, jika masih ada setelah proses hidrolisis dengan CEH, akan terlepas pada tahapan pencernaan di mikrovili duodenum atau dihidrolisis di sitosol enterosit duodenum (Reboul, 2019).

Selama proses pencernaan di duodenum, karotenoid terinkorporasi dengan lipid yang lain, seperti kolesterol, fosfolipid, dan produk digesti lipid, seperti asam lemak bebas, monoasilgliserol, lisofosfolipid, menjadi struktur misel gabungan (Gambar 5.3). Penyerapan karotenoid bergantung pada struktur ikatan kompleks karotenoid. Umumnya, struktur kompleks misel-karotenoid berukuran 3 dan 10 nm, serta banyak ditemui di sekitar lapisan terluar mikrovili (Chacón-Ordóñez dkk., 2019; Reboul, 2019). Struktur ini mempermudah pengangkutan dan penyerapan karotenoid ke dalam lapisan mukosa usus melalui difusi pasif dan/atau melalui *transporter* (Chacón-Ordóñez dkk., 2019; Reboul, 2019). Struktur misel tetap akan terbentuk meskipun karotenoid dalam bentuk terikat dengan protein, misalnya, beta karoten yang terikat dengan protein susu lipokalin beta-laktoglobulin. Struktur misel ini berukuran besar, tetapi masih dapat diserap oleh usus (Chacón-Ordóñez dkk., 2019).

Bioaksesibilitas karotenoid atau struktur kompleks karotenoid dengan misel gabungan sangat tinggi. Model sistem pencernaan *in vitro* menunjukkan bahwa bioaksesibilitas lipopen sangat terbatas,

yaitu 0,1% untuk tomat mentah; dan 1,5% untuk *pure* tomat (Reboul, 2019). Bioaksesibilitas beta karoten juga cukup rendah, yaitu 4% pada *pure* wortel, 14% pada jus tomat, dan 20% pada buah mangga (Reboul, 2019; Chacón-Ordóñez dkk., 2019). Sementara itu, pada lutein bioaksesibilitasnya cukup tinggi, yaitu 37% dari daun bayam mentah sampai 48% pada daun bayam rebus. Hal ini karena karotenoid berada di dalam sel dan proses digesti serat dan dinding sel serta kompleks karotenoid-protein bahan pangan tanaman di dalam sistem pencernaan tidak mudah sehingga jumlah karotenoid yang terlepas dari bahan pangan tanaman tidak maksimal (Saini dkk., 2015). *Phytoene* dan *phytofluene* juga menunjukkan bioaksesibilitas yang cukup tinggi karena struktur molekuler yang fleksibel dibandingkan karotenoid lain sehingga dapat meningkatkan kelarutannya pada struktur misel gabungan.



Sumber: Cervantes-Paz dkk. (2017)

Gambar 5.3 Struktur Misel Gabungan yang Berisi Kompleks Fosfolipid dan Produk Digesti Lipid

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Penyerapan karotenoid terjadi pada enterosit dan efisiensi penyerapan untuk setiap jenis karotenoid bervariasi. Penyerapan beta karoten ke dalam tubuh manusia berkisar 3–80% dan umumnya penyerapan terjadi 10–30% (Reboul, 2019). Rendahnya penyerapan beta karoten disebabkan oleh bioaksesibilitas beta karoten, serapan, dan pengangkutan melalui enterosit yang tidak terlalu banyak. Setelah proses pencernaan makanan, beta karoten dapat tersimpan di dalam usus dan dilepaskan pada saat fase *postprandial*, yaitu fase penurunan kadar gula darah setelah makan.

Penelitian dengan menggunakan model sistem sel *in vivo* menunjukkan bahwa jumlah *phytofluene*, beta karotene dan lutein yang terserap sama dan lebih tinggi dibandingkan *phytoene*, sedangkan penyerapan likopen sangat rendah dibandingkan karotenoid yang lain. Efisiensi penyerapan karotenoid berkaitan dengan fleksibilitas dan polaritas dari setiap jenis karotenoid. Karotenoid dengan polaritas dan fleksibilitas yang baik akan berikatan lebih baik dengan transporter lipid dan membran plasma sehingga meningkatkan penyerapan ke dalam tubuh. Meskipun penyerapan karotenoid yang terkandung dalam bahan pangan alami tidak optimal, konsumsi karotenoid dari bahan pangan alami sangat disarankan karena vitamin A sintetis yang dikonsumsi dalam dosis tinggi berpotensi menyebabkan gangguan kesehatan (Dibley & Jeacocke, 2001).

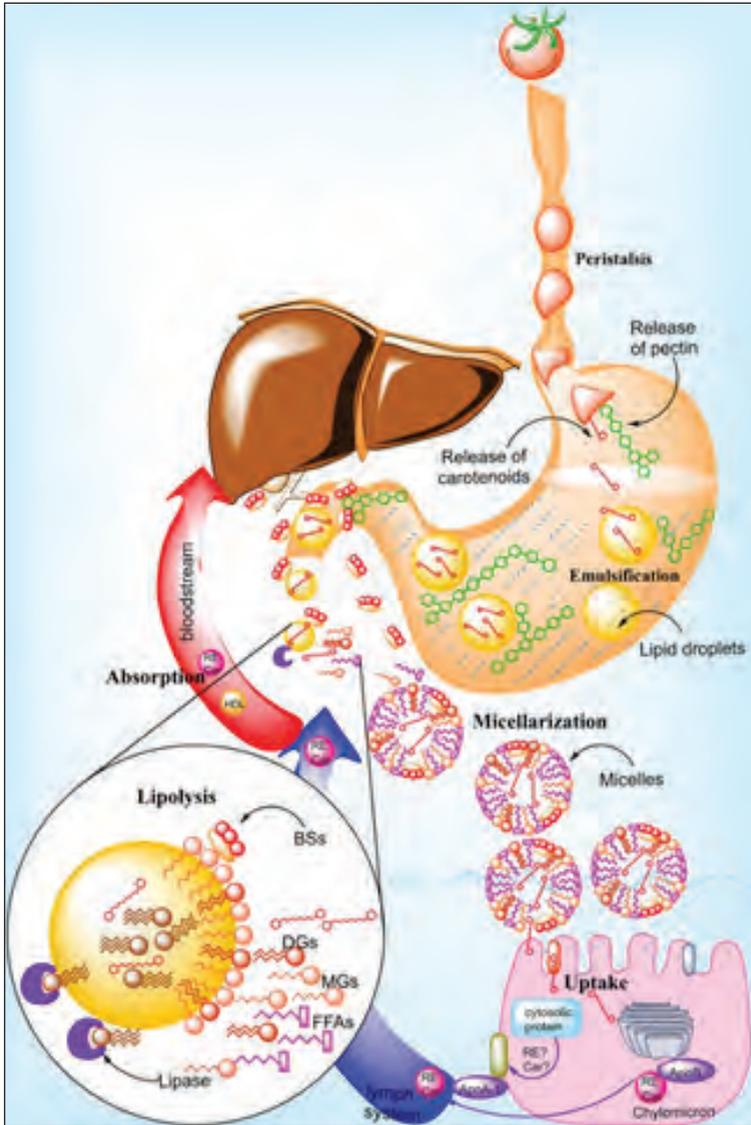
Penyerapan karotenoid di dalam usus terdiri dari dua jalur, yaitu *transport* apikal melewati membran mikrovili dari enterosit dan *transport* sitosol dan metabolisme intraseluler. *Protein transporter* yang melekat pada membran sel, seperti SR-BI, CD36, dan NPC1L1, membantu dalam pengangkutan karotenoid ke dalam sel usus melalui kedua jalur penyerapan tersebut (Gambar 5.4). Fraksi karotenoid yang lain diangkut ke dalam sel usus dengan membentuk *chylomicrons*. Karotenoid provitamin A dimetabolisme menjadi kelompok vitamin A, seperti *retinyl-esters* dan disekresikan ke luar sel usus dalam bentuk *chylomicrons*. Karotenoid lain dan bagian karotenoid yang bersifat



polar, seperti apokarotenoid, disekresikan ke luar sel usus bersama kelompok lipoprotein berdensitas tinggi (Reboul, 2019).

Metabolisme dan penyerapan beta karoten bersama karotenoid yang lain, sebagaimana dijelaskan sebelumnya, masih menyisakan beberapa hal penting yang belum terungkap, di antaranya peran mikrobiota usus terhadap metabolisme dan bioavailabilitas karotenoid di dalam tubuh, serta penyebab terjadinya variasi respons individu manusia terhadap jumlah asupan karotenoid. Meskipun penyerapan beta karoten bersama karotenoid yang lain di dalam tubuh manusia lebih rendah dibandingkan asupan senyawa bioaktif potensial, rekomendasi untuk mengonsumsi bahan pangan yang mengandung senyawa bioaktif alami masih sangat dianjurkan, terutama untuk mencegah penyakit degeneratif, dengan jumlah asupan tertentu agar berdampak pada kesehatan. Pengayaan bahan pangan dengan penambahan senyawa bioaktif atau fortifikasi juga dapat mendukung ketersediaan bahan pangan bergizi.

Tantangan dalam penyediaan bahan pangan kaya kandungan beta karoten dan karotenoid lainnya adalah sifat senyawa ini yang sangat rentan terhadap suhu tinggi dan cahaya sehingga pengolahan bahan pangan dapat menyebabkan penurunan atau pendegradasian kadar nutrisi tersebut. Oleh karena itu, inovasi pengolahan bahan pangan untuk mempertahankan kandungan nutrisi di dalamnya sangat dibutuhkan. Salah satu teknik untuk mempertahankan kadar nutrisi, yaitu teknik fermentasi padat (*solid-state fermentation*) oleh *Aspergillus niger* yang dapat meningkatkan kadar protein dan menurunkan kadar sianogen pada umbi ubi kayu (Montagnac, Davis, & Tanumihardjo, 2009). Teknik ini mungkin dapat dimodifikasi untuk mempertahankan kadar nutrisi dan meningkatkan bioavailabilitas nutrisi dalam bahan pangan.



Keterangan: BSs: bile salts; FFAs: free fatty acids; ApoA-1: apolipoprotein A; ApoB: apolipoprotein B (chylomicron secretion to lymph); RE: retinyl esters.

Sumber: Cervantes-Paz dkk. (2017)

Gambar 5.4 Diagram Jalur Penyerapan dan Pengangkutan Karotenoid pada Tubuh Manusia

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Bab VI

Stabilitas Kandungan Beta Karoten dan Ragam Pangan Fungsional Berbahan Ubi Kayu dan Umbi Lain



Selain bioaksesibilitas yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya, faktor penting lain dalam pemanfaatan ubi kayu kaya beta karoten sebagai bahan pangan fungsional adalah stabilitas beta karoten dalam produk pangan olahannya. Hal ini mengingat karakter beta karoten yang mudah terurai oleh reaksi oksidasi, peka terhadap cahaya, dan lain sebagainya. Kedua faktor (bioaksesibilitas dan stabilitas) inilah yang menyebabkan pemanfaatan ubi kayu sebagai bahan pangan fungsional masih terbatas. Pada Bab ini akan diuraikan ubi kayu sebagai sumber bahan pangan, mocaf kaya beta karoten sebagai bahan baku pangan fungsional, ragam pangan olahan berbasis mocaf kaya beta karoten dari bahan baku ubi kayu, dan stabilitas kandungan beta karoten dalam produk pangan.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

A. Ubi Kayu sebagai Sumber Bahan Pangan

Indonesia, sebagai negara terbesar kedua di dunia setelah Brasil dalam hal keanekaragaman hayati (Bahtera, 2019), memiliki kurang lebih 77 tanaman pangan lokal sumber karbohidrat selain padi/beras, seperti ubi kayu atau singkong, ubi jalar, kentang, jagung, garut, talas, dan gembili, yang potensial dimanfaatkan sebagai bahan baku pangan, baik sebagai bahan pangan utama maupun pangan fungsional (Fajar, 2014; Hatmi & Djaafar, 2014).

Di Indonesia, ubi kayu dimanfaatkan sebagai sumber bahan pangan penting nonberas selain jagung dan kedelai. Potensi ubi kayu di Indonesia sangat besar. Produksi nasional rata-rata per tahun mencapai 20 juta ton pada tahun 2016, keempat terbesar di dunia setelah Nigeria, Thailand, dan Brasil (FAO, 2018). Meskipun memiliki potensi produksi dan pasar yang sangat besar, ubi kayu masih kurang diperhatikan oleh pemerintah. Belum ada regulasi khusus yang mengatur aspek hulu hingga hilir industri berbasis ubi kayu. Selain itu, ubi kayu juga masih dipandang sebagai komoditas yang memiliki nilai rendah sehingga sebagian masyarakat enggan mengonsumsi produk-produk olahan berbasis ubi kayu. Oleh karena itu, diperlukan langkah strategis atau inovasi produk olahan berbasis ubi kayu agar produk yang dihasilkan lebih menarik dari sisi penampilan, rasa, hingga nilai jual atau ekonominya.

Ubi kayu dapat dikonsumsi secara langsung dalam bentuk umbi rebus atau goreng. Sementara itu, tepung ubi kayu sendiri masih terbatas pemanfaatannya dalam pembuatan produk pangan olahan tradisional, seperti getuk, comro, dan misro. Saat ini, ubi kayu sudah mulai banyak diolah menjadi tepung ubi kayu terfermentasi atau yang lebih dikenal dengan sebutan *modified cassava flour* (mocaf). Sejak dikenalkan pada tahun 2006 oleh Prof. Achmad Subagio dari Universitas Jember, mocaf terus mendapatkan perhatian masyarakat dan permintaan terhadap produk mocaf untuk pangan olahan semakin meningkat. Hal ini karena karakter mocaf yang lebih baik daripada tepung ubi

kayu biasa atau tepung gaplek. Meskipun demikian, sebagian masyarakat masih ada yang belum mengenal produk mocaf dan belum tahu bagaimana memperoleh atau membuatnya.

Pusat Penelitian (Puslit) Bioteknologi LIPI telah mengembangkan varian produk mocaf dengan fitur unggul kandungan gizi, terutama beta karoten yang dikenal juga sebagai mocaf kaya beta karoten. Kandungan beta karoten secara alami sudah ada di beberapa varietas ubi kayu yang berumbi kuning. Penggunaan dan pemilihan jenis atau varietas bahan baku yang tepat dan unggul sangat berpengaruh terhadap kualitas produk turunan yang dihasilkan. Oleh karena itu, masyarakat harus tahu jenis-jenis ubi kayu unggul yang dapat digunakan sebagai bahan baku pangan atau pembuatan mocaf biasa dan mocaf kaya beta karoten karena setiap jenis ubi kayu memiliki karakter berbeda-beda. Beberapa jenis atau varietas ubi kayu yang telah digunakan untuk produksi mocaf kaya beta karoten berasal dari seleksi alami dari beberapa wilayah di Indonesia dan hasil pemuliaan di Puslit Bioteknologi LIPI, antara lain, Mentega 2 (Tasikmalaya), Carvita 25 (hasil pemuliaan), Adira 1 (varietas nasional), Nangka (Bogor), dan Bokor (Boyolali).

B. Mocaf Kaya Beta Karoten sebagai Bahan Baku Pangan Fungsional

Saat ini, produk mocaf yang umum ada di pasaran dan banyak digunakan oleh masyarakat untuk bahan pangan utama maupun sebagai pengganti tepung terigu adalah mocaf dari ubi kayu yang memiliki warna daging umbi putih. Mocaf memiliki karakter berbeda dengan tepung ubi kayu biasa dan tapioka, terutama dari sisi viskositas, kemampuan gelasi, daya rehidrasi, dan kemudahan larutnya (Subagio, 2007). Sementara, karakter mocaf kaya beta karoten yang dikembangkan oleh Puslit Bioteknologi LIPI berbeda dengan mocaf biasa, terutama dari aspek kandungan beta karoten yang berkisar antara 10–15 ppm. Mocaf kaya beta karoten memiliki potensi digunakan sebagai

bahan baku pangan fungsional karena kandungan beta karoten di dalam produk tepung mocaf bermanfaat sebagai antioksidan.

Secara umum, proses pembuatan mocaf kaya beta karoten hampir sama dengan mocaf biasa. Hanya pada proses mocaf kaya beta karoten ditambahkan satu tahap teknologi proses untuk memproteksi beta karoten yang secara alami ada di umbi agar tidak banyak yang hilang selama proses penepungan. Selain kandungan beta karoten yang membuatnya berpotensi sebagai bahan pangan fungsional, mocaf kaya beta karoten yang diproduksi dari jenis ubi kayu tertentu, salah satunya Mentega 2, memiliki kandungan zat besi dan seng cukup tinggi sekitar 58 mg/100 g dan 2,22 mg/100 g (data belum dipublikasi).

Pemanfaatan bahan pangan lokal seperti ubi kayu sangat penting dalam mendukung program diversifikasi pangan menuju ketahanan dan kedaulatan pangan nasional. Di samping itu, penggunaan bahan baku pangan lokal ini dapat mengurangi ketergantungan terhadap komoditas pangan tertentu seperti beras atau gandum/tepung terigu. Oleh karena itu, pengembangan produk berbasis pangan lokal ini harus didukung penuh oleh pemerintah secara berkesinambungan.

C. Ragam Pangan Olahan Berbasis Mocaf Kaya Beta Karoten

Untuk meningkatkan minat masyarakat dalam mengonsumsi ubi kayu sebagai komoditas pangan, inovasi produk pangan olahan sangat penting dilakukan. Dengan karakternya yang jauh lebih baik daripada tepung ubi kayu biasa/tepung gapek, mocaf sudah dibuktikan cocok untuk digunakan dalam pembuatan beragam pangan olahan. Berikut ini contoh produk pangan olahan berbasis mocaf kaya beta karoten yang dikembangkan oleh Pusat Penelitian Bioteknologi LIPI bersama UMKM binaannya, dan mocaf biasa dari pelaku industri lainnya sebagai pembanding.

1. Mi Sayur Berbasis Mocaf Kaya Beta Karoten

Produk mi menjadi salah satu produk pangan favorit di dunia. Indonesia sendiri menduduki peringkat kedua setelah China sebagai negara terbesar dalam hal konsumsi mi. Angka konsumsi mi di Indonesia pada tahun 2018 sekitar 12,5 miliar bungkus mi (WINA, 2019). Hal ini menunjukkan besarnya potensi pasar produk mi, baik di dunia maupun di Indonesia khususnya. Seperti yang kita ketahui, pada umumnya mi terbuat dari tepung terigu yang merupakan komoditas impor. Penggunaan tepung terigu untuk produk mi masih umum digunakan karena kandungan gluten yang bisa menjadikan karakter mi lebih kenyal dan tidak mudah putus dalam proses pembuatannya. Namun, sebagian orang tidak bisa mengonsumsi produk-produk pangan yang mengandung gluten, terutama para penderita penyakit *celliac* dan/ atau autis. Oleh karena itu, inovasi produk mi berbasis mocaf kaya beta karoten yang dikembangkan oleh Puslit Bioteknologi LIPI dapat menjadi solusi bagi mereka yang tidak dapat mengonsumsi bahan pangan yang mengandung gluten karena ubi kayu secara alami tidak mengandung gluten. Mi sayur berbasis mocaf kaya beta karoten yang diproduksi oleh UMKM Mekar Sari Boyolali sebagai binaan Pusat Penelitian Bioteknologi LIPI (Gambar 6.1) tidak hanya bebas gluten karena tidak menggunakan terigu sama sekali, tetapi juga punya keunggulan gizi, seperti beta karoten dan mineral yang bermanfaat bagi kesehatan.

Produk mi sayur ini terbuat dari 95% bahan baku ubi kayu dengan mocaf kaya beta karoten sebagai bahan utama yang dicampur dengan tapioka dan tepung maizena. Dibandingkan mi kering lain yang berbahan tepung terigu, mi sayur mocaf kaya beta karoten menghasilkan kalori lebih tinggi dan mengandung lemak, serat pangan, zat besi, dan vitamin E yang lebih tinggi (Tabel 6.1). Pada Tabel 6.1 terlihat produk mi berbahan mocaf kaya beta karoten berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai sumber bahan baku pangan fungsional.



Sumber: Hendrati (2019)

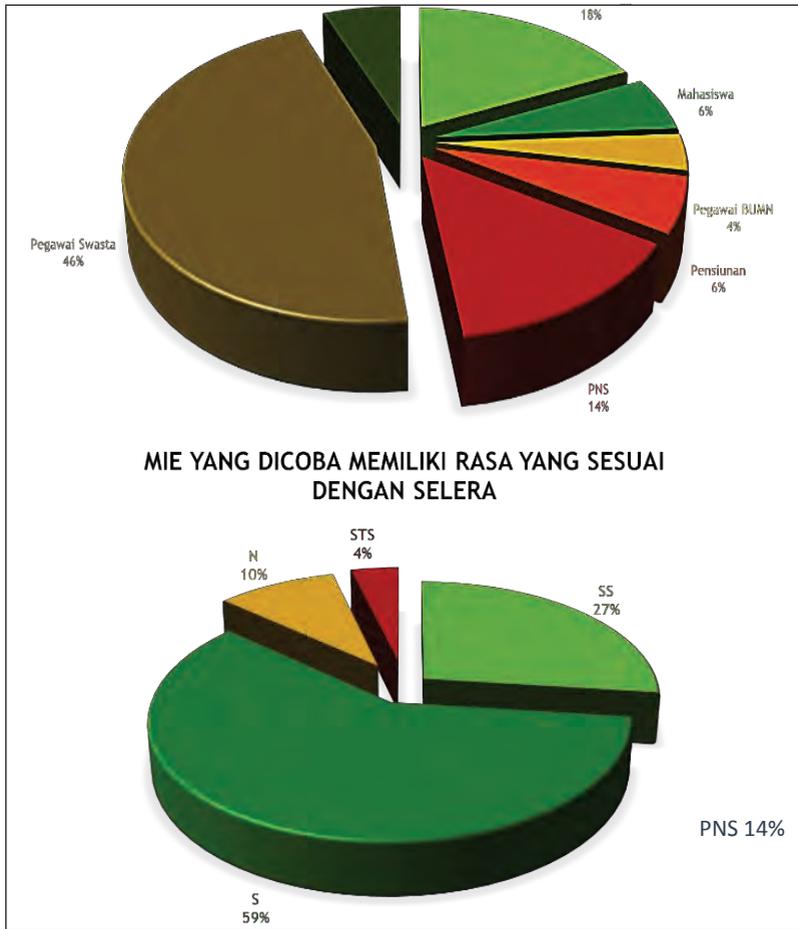
Gambar 6.1 Produk Mi Sayur Berbasis Mocaf Kaya Beta Karoten oleh UMKM Mekar Sari Boyolali, Mitra Binaan Puslit Bioteknologi LIPI

Tabel 6.1 Komposisi Gizi Mi Sayur Mocaf Kaya Beta Karoten dengan Mi Kering Lain Berbahan Tepung Terigu

No.	Kandungan Gizi	Mie Sayur Mocaf Kaya Beta Karoten (per 100 g)	Mi Kering Lain (per 100 g)
1.	Energi total	394 Kcal	358 Kcal
2.	Lemak total	7,46 g	0,39 g
3.	Karbohidrat	77 g	76,5 g
4.	Protein	5 g	12,3 g
5.	Serat Pangan	7,5 g	4,8 g
6.	Zat Besi	25 mg	14 mg
7.	Seng	6 mg	7 mg
8.	Vitamin E	1,58 mg	0,19 mg
9.	Beta Karoten	1,3 mg	-

Sumber: Fathoni dkk. (2019)

Selain kandungan gizi yang baik, produk mi sayur berbahan mocaf kaya beta karoten ini juga memiliki tekstur dan rasa yang disukai oleh 50 konsumen dengan latar belakang yang beragam. Berdasarkan data hasil uji pasar yang telah dilakukan oleh Puslit Bioteknologi LIPI di Café Telo D9 Salatiga, 86% dari 50 responden uji pasar menyukai produk mi sayur berbahan mocaf kaya beta karoten, 10% responden netral, dan hanya 4% yang menyatakan rasa mi tidak sesuai selera responden (Gambar 6.2).



Keterangan: S = Suka, SS = sangat suka, STS = sangat tidak suka, N = netral

Sumber: Fathoni dkk. (2019)

Gambar 6.2 Data Hasil Uji Pasar Produk Mi Sayur Berbahan Mocaf Kaya Beta Karoten dari 50 Responden dengan Latar Belakang Beragam

Uji rasa produk mi mocaf kaya beta karoten juga telah dilakukan dengan melibatkan pelajar SD, SMP, dan masyarakat undangan pada kegiatan “Makan Mi Bersama” di Kabupaten Boyolali. Hasilnya, produk mi mocaf kaya beta karoten sangat disukai pelajar dan masyarakat, bahkan pelajar tidak mengetahuinya dengan mi berbahan baku terigu (Gambar 6.3).



Sumber: Fathoni dkk. (2019)

Gambar 6.3 Uji Rasa dan Penerimaan Konsumen Terbatas Produk Mi Mocaf Kaya Beta Karoten Bersama Pelajar dan Masyarakat

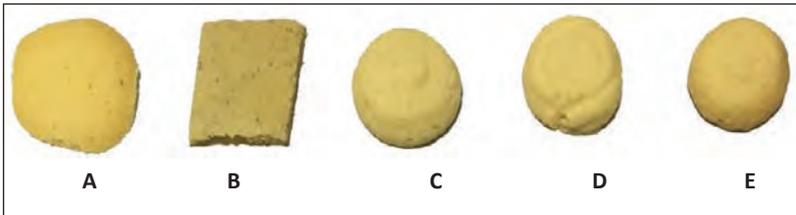
2. Produk Kue Kering

Di Puslit Bioteknologi LIPI, mocaf kaya beta karoten diproduksi dari beberapa jenis ubi kayu pilihan, antara lain Carvita 25, Adira 1, dan Mentega 2 dan telah dimanfaatkan, selain untuk pengembangan produk mie, juga untuk pembuatan produk kue kering (Gambar 6.4). Kue kering dibuat dengan beberapa komposisi berbeda, antara lain komposisi 100% mocaf kaya beta karoten dan tepung komposit campuran antara mocaf kaya beta karoten dan tepung sorgum dengan beberapa komposisi: 100%, 75%:25%, dan 50%:50%. Tepung sorgum ditambahkan sebagai sumber protein karena mocaf atau ubi kayu umumnya memiliki kandungan protein yang rendah. Evaluasi sensori produk kue kering mocaf kaya beta karoten menunjukkan hasil tingkat penerimaan yang baik. Dalam hal ini, kue kering mocaf dari

Buku ini tidak diperjualbelikan.

ketiga jenis ubi kayu dengan komposisi perbandingan antara mocaf dan sorgum (75%:25%) paling disukai oleh sekitar 60 responden (Gambar 6.5).

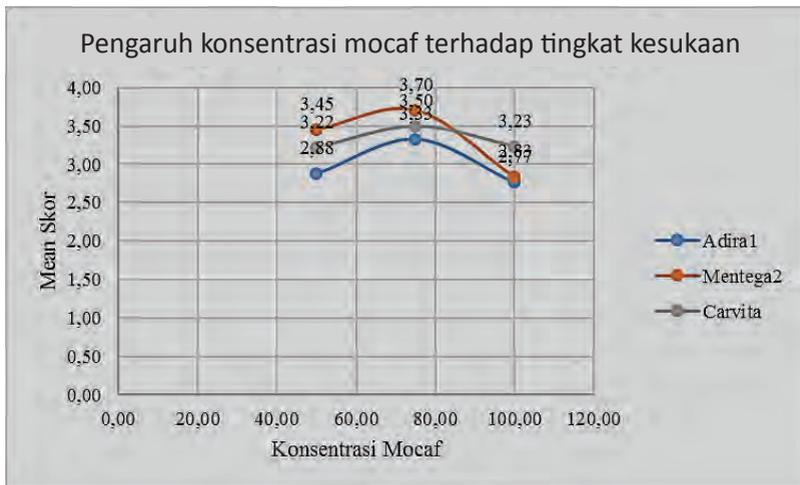
Hasil analisis proksimat kue kering berbahan mocaf kaya beta karoten juga menunjukkan kandungan serat kasar dan kadar abu yang lebih tinggi dibandingkan kue kering dari tepung terigu meskipun proteinnya masih lebih rendah (Tabel 6.2). Dari hasil proksimat tersebut, dapat kita lihat potensi produk kue berbahan mocaf kaya beta



Keterangan: Kue Kering dari A) Tepung Terigu, B) Tepung Sorgum, C) Mocaf Adira 1, D) Mocaf Mentega 2, dan E) Mocaf Carvita 25

Sumber: Dhanasatya (2018)

Gambar 6.4 Produk Kue Kering dari Bahan Baku Tepung yang Berbeda-beda.



Sumber: Dhanasatya (2018)

Gambar 6.5 Hasil evaluasi sensori menunjukkan pengaruh komposisi konsentrasi mocaf dan sorgum pada tingkat kesukaan secara keseluruhan (penampilan, aroma, dan rasa).

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Tabel 6.2 Profil Kandungan Proksimat pada Produk Kue Kering Berbahan Mocaf Kaya Beta Karoten

Bahan Kue Kering	% Kadar Air	% Bahan Kering	Kadar Abu	% Protein Kasar	% Lemak Kasar	% Serat Kasar
Terigu	2,67	97,33	1,78	5,00	25,09	3,44
Adira 1	2,54	97,46	1,95	2,70	24,81	4,12
Carvita	2,61	97,39	1,92	2,82	25,94	6,27
Mentega 2	2,40	97,60	1,96	2,55	25,56	5,71

Sumber: Dhanasatya (2018)

karoten untuk makanan sehat karena kandungan serat tinggi dan kadar abu lebih tinggi yang mengindikasikan kandungan mineral lebih tinggi dalam produk.

3. Jenis Pangan Olahan Lain Berbasis Mocaf

Selain produk mi sayur dan kue kering, mocaf kaya beta karoten juga sangat cocok digunakan dalam pembuatan berbagai macam ragam pangan olahan modern yang berkualitas. Hal ini sangat menarik karena dengan semakin beragamnya inovasi produk berbahan mocaf, semakin tinggi nilai ekonomi produk berbahan mocaf dan turunannya sehingga diharapkan dapat mengubah pandangan masyarakat tentang ubi kayu sebagai makanan orang desa dan miskin. Oleh karena itu, edukasi kepada masyarakat bahwa makan ubi kayu tidak hanya menyenangkan, tetapi juga menyehatkan penting dilakukan.

Kreativitas dan inovasi menjadi kunci untuk melahirkan produk-produk unggulan berbasis lokal yang berdaya saing tinggi. Mitra binaan Puslit Bioteknologi LIPI, yaitu UMKM Mekar Sari Boyolali, Jawa Tengah, telah mengembangkan beberapa produk olahan berbahan baku mocaf kaya beta karoten. Beberapa contoh inovasi produk olahan lain berbahan mocaf kaya beta karoten, mocaf biasa, dan umbi lain, di antaranya produk es krim, cendol, bolu manis, sosis, lapis gulung mocaf, stik mocaf, kue lebaran, dan *brownies*. Dari produk ini, telah dibuat beberapa varian, di antaranya produk sosis berbasis mocaf, seperti sosis jamur tiram dan sosis wortel (Gambar 6.6).



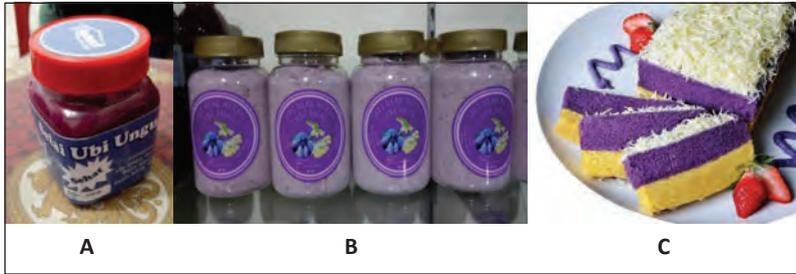


Keterangan: A) Es Krim, B) Cendol, C) Bolu, D) Lapis Gulung, E) Sosis Jamur Tiram, F) Sosis Wortel, G) Stik Mocaf, H) Kue Lebaran, I) Brownies

Sumber: Hendrati (2019); Darlina (2019); Istana Pangan (2019)

Gambar 6.6 Beberapa Produk Berbasis Mocaf Kaya Beta Karoten yang Dikembangkan Mitra Binaan Puslit Bioteknologi LIPI, UMKM Mekar Sari.

Produk berbasis mocaf kaya beta karoten dapat dicampur dengan tepung umbi lain, terutama umbi lokal untuk melengkapi nilai gizinya. Namun, pencampuran perlu memperhatikan produk utama yang ingin dihasilkan. Jika ditujukan untuk menjadi pangan yang tetap bebas gluten, kombinasi komoditas harus mempunyai karakter yang



Keterangan: A) Selai Ubi Jalar Ungu, B) Sari Ubi Jalar, C) Lapis Talas

Sumber: Hendrati (2019); "Kue lapis talas" (2013)

Gambar 6.7 Produk Olahan Berbasis Non-Ubi Kayu Produksi Mitra Binaan Puslit Bioteknologi LIPI (UMKM Mekar Sari Boyolali)

sama. Dengan demikian, selain komoditas ubi kayu, produk olahan pangan lokal lain, terutama dari umbi juga, perlu dikembangkan sehingga tersedia variasi lebih banyak. Walaupun saat ini tersedia olahan aneka umbi, jenis dan mutunya perlu ditingkatkan. Uwi dan gembili (*Dioscorea alata* dan *D. esculenta*), ganyong (*Canna discolor*), garut (*Maranta arundinacea*), serta umbi taka (*Tacca leontopetaloides*, *Amorphophallus sp.*) yang merupakan keanekaragaman hayati lokal, berpotensi dikembangkan dan menjadi campuran karena mempunyai banyak khasiat terhadap kesehatan. Ubi jalar dan talas juga dapat diolah menjadi beragam pangan olahan yang sudah komersial yang berpotensi menjadi campuran untuk saling mendukung gizi yang dikandungnya. Contoh produk inovasi yang telah dikembangkan oleh UMKM Mekar Sari Boyolali, di antaranya selai ubi jalar ungu, sari ubi ungu, dan lapis talas (Gambar 6.7). Di Bogor, produk lapis talas menjadi salah satu ikon kuliner di Bogor. Produk ini menjadi alternatif yang menarik karena unik dan bergizi tinggi. Selain itu, kandungan senyawa bioaktif, seperti antosianin, sangat bermanfaat bagi tubuh. Inovasi produk berbahan dasar tepung bergizi tinggi kombinasi mocaf kaya beta karoten dengan beberapa umbi-umbian lokal lain akan mendukung ketahanan pangan dan kedaulatan pangan nasional serta berperan dalam pemecahan masalah kesehatan termasuk *stunting*.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

D. Stabilitas Beta Karoten dalam Produk Pangan

Kandungan beta karoten pada bahan pangan menjadi keunggulan tersendiri karena fungsinya sebagai provitamin-A yang dapat memenuhi kebutuhan vitamin A dan sebagai antioksidan untuk melawan radikal bebas dalam tubuh. Pemanfaatan karotenoid seperti beta karoten sebagai bahan pangan fungsional masih terbatas karena beberapa faktor, antara lain bioaksesibilitas dan stabilitas (Ariviani, Windi, & Sri, 2018). Beta karoten berikatan dengan senyawa yang strukturnya menyerupai lemak. Hal ini menyebabkan beta karoten harus dikonsumsi dengan yang mengandung lemak untuk membantu pelarutannya di dalam tubuh sehingga manfaat beta karoten bagi tubuh dapat lebih maksimal (Alverina, 2016). Struktur ikatan rangkap pada senyawa beta karoten (total 11 ikatan rangkap dalam satu molekul) menyebabkan senyawa ini mudah teroksidasi oleh oksigen/udara. Reaksi oksidasi beta karoten akan lebih cepat dengan adanya sinar dan katalis logam, terutama tembaga, besi, dan mangan dan pada suhu tinggi (Walfford, 1980; Mc Weeny, 1968). Sementara itu, beta karoten yang memiliki titik leleh sekitar 178–184°C masih stabil atau belum mengalami kerusakan pada suhu 60°C (Muchtadi, 1992; Baurenfeind & Klaul, 1981).

Karena karakter di atas, kandungan beta karoten sangat berpotensi untuk rusak dan hilang selama proses pengolahan, baik dari umbi menjadi tepung maupun dari tepung menjadi produk pangan olahan. Dengan demikian, setiap tahapan pengolahan perlu dikaitkan dengan potensi kerusakan atau kehilangan beta karoten di produk. Selain itu, faktor kemasan sangat penting dalam menjaga stabilitas kandungan beta karoten dalam produk pangan. Pemilihan bahan kemasan, seperti penggunaan bahan alumunium dalam kemasan dan metode vakum dapat melindungi produk dari cahaya dan mencegah kerusakan karena oksidasi oleh udara. Pertimbangan jenis kemasan juga perlu dikombinasikan dengan biaya produksi yang perlu ditekan agar harga jual produk berbasis mocaf kaya beta karoten dapat bersaing. Inovasi

jenis kemasan yang aman terhadap stabilitas beta karoten dan murah serta ramah lingkungan merupakan tantangan pada masa depan. Sosialisasi terkait jenis kemasan sudah dilakukan dan perlu terus ditingkatkan.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Bab VII

Rekomendasi untuk Implementasi



Berdasarkan uraian tentang ubi kayu kaya beta karoten terkait potensi dan perannya sebagai pangan fungsional; pembahasan tentang perbaikan genetik ubi kayu kaya beta karoten; ulasan tentang beta karoten termasuk daya serap tubuh, ketersediaan dan aksesibilitasnya; serta berbagai produk dari tepung mocaf ubi kayu kaya beta karoten dibandingkan tepung dari umbi lain, pengembangan untuk pemanfaatan lebih luas ubi kayu beta karoten perlu lebih mendapat perhatian. Tidak dapat dimungkiri, diperlukan upaya keras untuk meningkatkan ketertarikan masyarakat untuk mengonsumsi bahan pangan berbasis ubi kayu. Upaya yang telah dilakukan, antara lain dengan menciptakan banyak varian produk pangan berbasis tepung mocaf kaya beta karoten yang enak dan menarik sehingga tidak kalah dengan produk pangan dari gandum. Upaya dengan menggandeng UMKM dan mitra lain juga telah dilakukan, tetapi masih perlu ditingkatkan dan perlu bantuan pemerintah dan para pihak berkepentingan untuk bahu-membahu dalam pengembangan, pemasaran, dan sosialisasi.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Minat masyarakat atau konsumen terhadap pangan fungsional yang memiliki manfaat bagi kesehatan semakin tinggi. Hal ini disebabkan oleh semakin berkembangnya pengetahuan dan kesadaran terhadap pola hidup sehat yang menggeser kebutuhan akan pangan dari fungsinya sebagai pemenuhan sumber energi menjadi memiliki fungsi fisiologis untuk tubuh. Sosialisasi pengetahuan yang lebih baik bagi masyarakat tentang pangan fungsional akan mengurangi jumlah orang yang berobat ke dokter atau rumah sakit karena sakit. Hal ini karena dengan menyantap pangan fungsional dalam menu makanan sehari-hari, akan membantu memelihara kesehatan dan mencegah terkena penyakit. Dengan semakin meningkatnya kesadaran mengonsumsi pangan fungsional, ketersediaan dan informasi terkini terkait pangan fungsional perlu dipersiapkan pemerintah, termasuk lembaga penelitian, perguruan tinggi bekerja sama dengan industri/swasta dengan mengintensifkan program-program terkait dengan mengimplementasikan inovasi-inovasi.

Pemanfaatan keanekaragaman hayati Indonesia, khususnya sebagai pangan fungsional, perlu lebih digalakkan. Masih banyak plasma nutfah di Indonesia yang perlu diteliti nutrisi atau sifat/atribut komponen gizi dan fungsionalnya sehingga berpotensi menjadi pangan fungsional. Pemerintah perlu mendorong melalui kebijakan-kebijakan, termasuk penganggaran terkait pemanfaatan sumber daya hayati, khususnya penelitian pangan fungsional dan aplikasinya. Aspek terkait mencakup: 1) penyadartahuan dan sosialisasi tentang pangan fungsional dan pentingnya pangan fungsional dalam diet pangan sehari-hari dengan frekuensi lebih banyak dan menciptakan publikasi yang mudah dimengerti dalam jumlah banyak; 2) penelitian yang mencakup pemilihan jenis, budi daya, termasuk hama dan penyakit tanaman mengandung beta karoten tinggi, produksi varietas unggul, pengolahan pascapanen, dan pengemasan; 3) tata niaga dan pemasaran; dan 4) program pengembangan pangan fungsional. Penelitian lain terkait pangan fungsional yang masih perlu dilakukan untuk mendu-



kung aspek manfaatnya bagi kesehatan, di antaranya kestabilan nutrisi atau senyawa bahan aktif pangan fungsional serta pengujian fisiologis sesuai dengan persyaratan yang ditetapkan oleh pemerintah (Peraturan Kepala Badan Pengawas Obat dan Makanan Republik Indonesia NOMOR HK 00.0s.52.0685) mengenai pengawasan pangan fungsional. Beta karoten sebagai provitamin A yang dikandung tanaman perlu lebih diinvestigasi lebih dalam terkait peningkatan ketersediaannya dan degradasinya dalam setiap tahapan pengolahan hingga menjadi produk yang siap dikonsumsi.

Pemerintah juga perlu membuat kebijakan terkait penanaman ubi kayu dengan memanfaatkan lahan marginal atau lahan tadah hujan di seluruh Indonesia yang lebih terintegrasi sehingga kesinambungan produksi dapat dijamin. Luas lahan marginal di Indonesia berkisar 157.246.565 hektare, sedangkan seluas 91.904.643 hektare dari luasan tersebut atau 58,4% berpotensi digunakan untuk lahan pertanian baru. Luasan tersebut terdiri dari lahan kering masam sekitar 62.647.199 hektare, lahan kering iklim kering berkisar 7.762.543 hektare, rawa pasang surut sekitar 9.319.675 hektare, rawa lebak sekitar 7.499.976 hektare, dan lahan gambut sekitar 4.675.250 hektare (Balai Penelitian Tanah, 2016). Umumnya, lahan marginal tidak subur sehingga sulit ditanami jenis tanaman lain. Dengan kemampuan tumbuh di lahan yang kurang subur, ubi kayu menjadi komoditas yang dapat beradaptasi di lahan marginal dan dengan input sarana pertanian, seperti pupuk, dapat memberikan hasil yang lebih baik.

Optimalisasi pemanfaatan sumber pangan fungsional termasuk dari ubi kayu yang penggunaannya sudah populer serta memiliki keunggulan dari segi budi dayanya. Tantangan dalam menarik perhatian atau meningkatkan minat kaum milenial untuk menyantap pangan fungsional harus dipecahkan, mengingat pilihan pangan dewasa ini sangat beragam dan menarik dalam penampilan dan rasa, tetapi berdampak negatif pada kesehatan. Promosi produk-produk berbasis ubi kayu kaya beta karoten serta rantai niaganya, termasuk

pemasaran, perlu mendapat perhatian khusus. Pelibatan perusahaan rintisan (*start up*) yang dibuat oleh kaum milenial perlu ditingkatkan dengan memfasilitasi membuat jaringan dengan perusahaan besar. Kegiatan yang melibatkan pelajar, misalnya, “makan bersama mi mocaf kaya beta karoten”, seperti yang sudah dilakukan di beberapa lokasi di Jawa Tengah, perlu diperbanyak, sekaligus melakukan uji preferensi untuk penyempurnaan rasa dan kreasi produk mi berbahan baku mocaf kaya beta karoten. Upaya-upaya yang dilakukan perlu sinergi antara pemerintah, perusahaan swasta, perguruan tinggi, lembaga penelitian, LSM, dan masyarakat sehingga dapat mencapai target secara signifikan dan jumlah generasi muda yang obesitas menurun, jumlah ibu hamil yang mengalami gangguan atau kelainan kehamilan dan anak yang dilahirkannya semakin sedikit, serta jumlah lansia yang kurang gizi dan sakit menurun.

Sebagai pangan fungsional yang mulai dipopulerkan, ubi kayu memiliki nilai lebih tinggi sehingga harga jual meningkat yang berakibat dapat meningkatkan pendapatan masyarakat /petani. Selama ini, petani menanam ubi kayu tidak secara intensif karena bukan prioritas utama, hanya *sambilan* menunggu komoditas lain sehingga tanpa melakukan praktik budi daya yang sebenarnya. Penggunaan klon unggul hasil penelitian yang terbukti mengandung beta karoten lebih tinggi daripada klon lain, serta tambahan input untuk meningkatkan produktivitasnya, perlu disosialisasikan ke petani. Pengenalan pada petani termasuk alih teknologi memerlukan waktu dan proses pendampingan khusus yang melibatkan kajian sosial dan budaya.

Dengan telah dihasilkannya klon unggul ubi kayu Carvita 25 yang mengandung beta karoten lebih tinggi daripada genotip alami dan silangan hasil seleksi yang ada, langkah selanjutnya untuk dilepas sebagai klon unggul perlu difasilitasi oleh pemerintah, dalam hal ini Kementerian Pertanian dengan melakukan bersama uji multilokasi dan tahapan lain. Sehingga masyarakat segera dapat memanfaatkannya dengan menanam varietas unggul tersebut. Mekanisme penyedia-

an bibit unggul yang dihasilkan perlu dilakukan bersama sehingga dapat menjamin ketersediaan bahan baku untuk produk olahan berbasis mocaf kaya beta karoten.

Agar perencanaan hingga pelaksanaan dalam pengembangan ubi kayu kaya beta karoten sebagai pangan fungsional untuk mendukung ketahanan pangan dan pengembangan SDM berkualitas dengan kesehatan prima, diperlukan *grand design* dan rencana aksi yang melibatkan banyak pihak. Tabel 7.1 merupakan rekapitulasi program dan kegiatan serta *output* dan *outcome* yang dipetakan dikaitkan dengan institusi terkait.

Tabel 7.1 Program dan Rencana Aksi Pengembangan Ubi kayu sebagai Pangan Fungsional Kaya Beta Karoten

Program	Kegiatan	Target	Lembaga	Keterangan
1) Budi daya dan perbanyak bibit unggul ubi kayu kaya beta karoten	a) Uji multilokasi hingga pelepasan Carvita 25 b) Perbanyak bibit hasil seleksi melalui kultur jaringan dan stek c) Penerapan <i>artificial intelligence (AI) smart farming</i> dalam budi daya ubi kayu unggul d) Pelatihan perbanyak bibit unggul kaya beta karoten	a) Carvita 25 dilepas sebagai varietas unggul RI b) Jumlah bibit unggul ubi kayu kaya beta karoten c) Budi daya ubi kayu unggul kaya beta karoten terintegrasi dan hasil tinggi	LIPI, Kementan	Pendanaan dari Kementan dan LIPI

Program	Kegiatan	Target	Lembaga	Keterangan
2) Penelitian dan pengembangan ubi kayu unggul yang menghasilkan kandungan beta karoten lebih tinggi	a) Pemanfaatan teknologi yang lebih unggul (kombinasi molekuler dan teknik pemuliaan lain) b) Penelitian ketahanan hama dan penyakit c) penelitian ketahanan terhadap perubahan iklim	potensi klon unggul	LIPI, Kementan, BATAN, IPB	Pendanaan LIPI dan kementerian teknis
3) Pengembangan produk pangan fungsional kaya beta karoten	a) Penerapan teknologi pangan dalam pengolahan dan penyimpanan untuk meningkatkan retensi beta karoten, terutama otomatisasi produksi (melibatkan teknologi IoT dan IT) b) Pengembangan desain dan penampilan serta penyajian produk pangan c) Pembinaan UMKM atau perusahaan rintisan	Variasi produk pangan yang menarik dan enak	LIPI, Kemperin, UMKM, KemKUKM	Pendanaan LIPI, kementerian teknis, dan Insinas Ristekbrin

Program	Kegiatan	Target	Lembaga	Keterangan
4) Penelitian dan pengkajian nutrigenomik nutrisi (beta karoten) ubi kayu	a) Penelitian metabolisme beta karoten <i>in vitro</i> dan <i>in vivo</i> b) Bioaktivitas dan bioaksesibilitas nutrisi (beta karoten) terhadap kesehatan	Data potensi bioaktivitas beta karoten	LIPI, Litbang-kes, dan Perguruan Tinggi	Pendanaan LIPI, Insinas Kemenris-tekbrin, dan Litbangkes
5) Penelitian dan pengkajian lebih lanjut pengaruh cara pengolahan ubi kayu beta karoten menjadi produk olahan terhadap perubahan kandungan beta karoten		a) Data dan informasi kandungan beta karoten berdasarkan cara pengolahannya b) Paket teknologi pengolahan ubi kayu yang aman terhadap stabilitas kandungan beta karoten	LIPI, Litbang-kes, dan Perguruan Tinggi	Pendanaan Insinas Pangan Fungsional LIPI – Ristek
6) Standardisasi produk olahan ubi kayu (SNI)	Penerapan standar mutu pengolahan ubi kayu	Sertifikat SNI produk olahan	BSN, BPOM, UMKM, dan LIPI	Pendanaan BSN
7) Peningkatan promosi, pemasaran dan <i>value chain</i>	a) Sosialisasi pangan fungsional kaya beta karoten kepada masyarakat dan pelajar b) Menjalin kerja sama pemasaran dengan industri c) Menjalin kerja sama dengan LSM dan sekolah-sekolah	a) Paket promosi di berbagai lokasi b) Masyarakat sadar pangan fungsional beta karoten tinggi c) Peningkatan jumlah pemesan produk berbasis mocaf kaya beta karoten	LIPI, Kemen-dikbud, dan Kemenkes	Pendanaan LIPI dan kementerian teknis

Penelitian selanjutnya terkait penelitian pangan fungsional akan meningkatkan kadar mikronutrien lain dan protein ubi kayu sehingga tidak hanya kaya beta karoten, tetapi juga kandungan proteinnya menjadi ada atau lebih tinggi tergantung jenis proteinnya. Peningkatan kandungan proteinnya dapat dilakukan dengan transformasi gen yang mengode *tuber storage protein* dan *seed storage protein* dengan *storage specific promoter*. Untuk meningkatkan kandungan lisin pada ubi kayu, akan dilakukan mutasi melalui teknik *genome editing*. Untuk meningkatkan kandungan Fe/Zn, gen terkait dengan penyerapan Fe/Zn akan diisolasi. Karakterisasi varietas lokal yang memiliki kandungan protein dan mineral tinggi telah dilakukan dan akan dilanjutkan dengan identifikasi dan isolasi gen terkait dengan protein dan mineral, lalu induksi mutasi dengan radiasi dilanjutkan dengan seleksi mutan, konstruksi gen pada plasmid dan optimasi teknik transformasi pada ubi kayu dengan *Agrobacterium*. Karakterisasi ubi kayu akan dilakukan dengan *marker* spesifik untuk kandungan protein dan mineral, lalu yang terpilih akan diradiasi.

Ucapan Terima Kasih



Editor dan penulis buku *Pangan Fungsional Berbasis Ubi Kayu Kaya Beta Karoten* menyampaikan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu selama proses berjalannya penelitian terkait ubi kayu, khususnya pengembangan ubi kayu kaya beta karoten, mocaf kaya beta karoten, serta pangan fungsional dengan bahan baku mocaf kaya beta karoten, hingga penulisan buku ini, antara lain kepada:

1. Deputi Bidang Ilmu Pengetahuan Hayati LIPI periode 2014–2019 yang telah memotivasi dan mendorong penulisan hingga buku ini dapat diterbitkan;
2. Kepala Pusat Penelitian Bioteknologi LIPI yang telah mendorong dan memfasilitasi;
3. Prof. Dr. Enny Sudarmonowati sebagai peneliti senior serta pemrakarsa pendanaan dan kerja sama penelitian ubi kayu dengan kolaborator, baik di dalam maupun luar negeri;
4. LIPI melalui dana DIPA Pusat Penelitian Bioteknologi LIPI untuk dana penelitian sejak 1992–2018, DIPA Pusat Penelitian Biologi LIPI untuk dana penelitian TA 2012–2014, Program Science and Technopark, DIPA Pusat Inovasi LIPI TA 2015–2017, Program

Maluku Tenggara Agro-Marine Technopark, DIPA Pusat Penelitian Oseanografi TA 2015–2016, Program BIOVILLAGE, Kegiatan Budi Daya dan Pengolahan Pascapanen Ubi Kayu Kedeputian Ilmu Pengetahuan Hayati LIPI TA 2015–2017, Program Kompetitif LIPI TA 2013–2014, Program Unggulan Kedeputian IPH LIPI TA 2017–2018;

5. Kementerian Ristek (sekarang RistekBRIN) untuk kegiatan Speklok pada tahun 2010–2011;
6. Program Insentif Peningkatan Kapasitas Peneliti dan Perakayasa DIKTI TA 2009 dan 2012;
7. Program Insinas Kemenristek TA 2013;
8. Program beasiswa Riset-Pro, Kemenristek, RI TA 2013–2017;
9. Program Insinas *flagship* pangan fungsional, Kemenristek TA 2018–2019;
10. Program Inovasi Industri, Kemenristek TA 2019;
11. Program RISPRO LPDP Kementerian Keuangan TA 2020;
12. AVEBE Belanda yang telah memberikan pendanaan penelitian selama 7 tahun (2003–2010);
13. KNAW SPIN (Belanda);
14. Swiss Seed Money Project Grant Swiss TA 2015–2016;
15. IAEA untuk penelitian radiasi ubi kayu lokal Indonesia dengan kontrak proyek RC No. 13196/RO;
16. Mitra perguruan tinggi di luar negeri, yaitu Wageningen University-Research Centre (WUR), Radboud University (Belanda), University of Bath (Inggris), ETH Zurich (Swiss);
17. Kementerian Pertanian serta Dinas Pertanian Pemerintah Daerah sebagai mitra utama di Indonesia sehingga hasil riset dapat diterapkan di masyarakat;
18. Badan Tenaga Atom Nasional (BATAN) atas kerja samanya dalam proses radiasi sampel;

19. Dr. John Beeching dan Prof. Rod Scott untuk supervisi penelitian PPD di University of Bath, Inggris;
20. Bapak Dirham selaku Kepala Pusat Penelitian Oseanografi;
21. Bapak Agus Kusnadi sebagai Koordinator Kegiatan Program Maluku Tenggara Agro-Marine Technopark, DIPA Pusat Penelitian Oseanografi TA 2015–2016;
22. Bapak Jasmadi dan seluruh staf Unit Pelaksana Teknis Tual;
23. Dr. Koes Harjoto dan Bapak Wahyu dari Balai Penelitian Tanaman Aneka Kacang dan Umbi (Balitkabi) Kementerian Pertanian atas bantuannya dalam menyediakan stek dan biji Adira 4;
24. Bapak Nanang Taryana, Bapak Nawawi, Sdri. Nia Anggraeni, Sdri. Dina Andriyani, dan Sdr. Saefudin yang telah banyak membantu pemeliharaan koleksi ubi kayu secara teknis di lapangan dan laboratorium;
25. Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Tepat Guna LIPI;
26. Balai Penelitian Teknologi Bahan Alam;
27. UKM Mekar Sari; dan
28. UKM Sari Kumetap.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Daftar Pustaka



- Almeida-Muradian, L. B., & Penteado, M.V.C. (1992). Carotenoids and provitamin A value of some Brazilian sweet potato cultivars (*Ipomoea batatas* Lam.). *Revista de Farma'cia e Bioqu'mica da Universidade de Sa'õ Paulo*, 28, 145–154.
- Alverina, A.C. (2016). *Formulasi SNEDDS (self-nanoemulsifying drug delivery system) beta karoten menggunakan minyak zaitun (Olea europaea)*. (Doctoral dissertation), Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Angraini, V., Sudarmonowati, E., Hartati, N. S., Suurs, L., & Visser, R. G. F. (2009). Characterization of cassava starch attributes of different genotypes. *Starch-Stärke*, 61, 472–481.
- Aniedu, C., & Omodamiro, R. M. (2012). Use of newly bred β -carotene cassava in production of value-added products: implication for food security in Nigeria. *Global J. Sci. Front. Res. Agric. Vet. Sci*, 12, 10–16.
- Astawan, M. (2011). Pangan fungsional untuk kesehatan yang optimal. Diakses pada 12 Desember 2019 dari <http://www.masnafood.com>.
- Arango, J., Wüst, F., Beyer, P., & Welsch, R. (2010). Characterization of phytoene synthases from cassava and their involvement in abiotic stress-mediated responses. *Planta*, 232, 1251–1262. doi:10.1007/s00425-010-1250-6.

- Ariviani, S., Atmaka, W., & Raharjo, S. (2018). Karakterisasi dan uji stabilitas digestif nanoemulsi β -karoten yang dibuat dengan metode emulsifikasi spontan. *agriTECH*, 38(1), 30–38.
- Ayegtibo, O., Latif, S., Abass, A., & Muller, J. (2018). Comparing characteristics of root and starch of biofortified yellow flesh and white flesh cassava variant and sustainability considerations: a review. *Sustainability*, 10 (3089), 1–32.
- Bahtera, E. (2019). Terbesar kedua di dunia, keanekaragaman hayati di Indonesia baru tergarap 5%. *Berita Universitas Padjajaran*. Diakses pada 6 Desember 2019 dari <http://news.unpad.ac.id/?p=36173>.
- Balai Penelitian Tanaman Aneka Kacang dan Umbi (Balitkabi). (2015). *Ubi jalar kaya beta karoten*. Diakses pada 3 Oktober 2019 dari <https://balitkabi.litbang.pertanian.go.id/profil/ubi-jalar>.
- Balai Penelitian Tanaman Aneka Kacang dan Umbi. (2016). *Deskripsi varietas unggul ubikayu*. Diakses pada 5 Desember 2019 dari http://balitkabi.litbang.pertanian.go.id/images/stories/uploads/publikasi/juknis/2016_deskripsi/ubikayu.pdf.
- Balai Penelitian Tanah. (2016). *Laporan kinerja tahun 2015*. Kementerian Pertanian.
- Bartley, G. E., & Scolnik, P. A. (1995). Plant carotenoids: pigments for photo-protection, visual attraction, and human health. *The Plant Cell* 7, 1027–1038.
- Bauernfeind, J.C. (1981). *Carotenoids as colorants & vitamin A precursors*. Academic Press.
- Beyene, G., Solomon, F. R., Chauhan, R. D., Gaitán-Solis, E., Narayanan, N., Gehan, J., Sriritunga, D., Steven, R.L., Jifon, J., Van Eck, J., Linsler, E., Gehan, M., Ilyas, M., Fregene, M., Sayre, R.T., Anderson, P., Taylor, N.J., & Cahoon, E. B. (2018). Provitamin A biofortification of cassava enhances shelf life but reduces dry matter content of storage roots due to altered carbon partitioning into starch. *Plant Biotechnology Journal*, 16, 1186–1200. doi:10.1111/pbi.12862.
- Bintarti, A.F. (2015). Perkembangan kultur in vitro pada tanaman karet (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.) di CIRAD Perancis. *Warta Perkaratan*, 34(1), 1–10.



- Bohn, T. (2017). Bioactivity of carotenoids - chasms of knowledge. *International Journal for Vitamin and Nutrition Research*, 87(1–2), 5–9.
- Bordallo, P. N., Silva, D. H., Maria, J., Cruz, C. D., & Fontes, E. P. (2004). Somaclonal variation on *in-vitro* callus culture potato cultivar. *Hortic. Bras.* 22(2), 300–304.
- Brithaupt, D. E., Bamedi, A., & Wirt, U. (2002). Carotenol fatty acid esters: easy substrates for digestive enzymes. *Comp. Biochem. Physiol. B. Biochem. Mol. Biol* 132(4), 721–8.
- Britton, G., Liaaen-Jensen, S. & Pfander, H. (1996). *Carotenoids vol. 2, synthesis*. Birkhauser: Basel.
- Cazzonelli, C. I., & Pogson, B. J. (2010). Source to sink: regulation of carotenoid biosynthesis in plants. *Trends in plant science*, 15(5), 266–274. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2010.02.003>.
- Carvalho, L. M. J., Oliveira, A. R. G., Godoy, R. L. O., Pacheco, S., Nutti, M.R., Carvalho, J.L.V., Pereira, E.J., & Fukuda, W.G. (2012). Retention of total carotenoid and beta carotene in yellow sweet cassava (*Manihot esculenta* Crantz) after domestic cooking. *Food Nutr Res.* 56, 1–8.
- Carvalho, L. J. C. B., Almeida, J. D., Anderson, J. V., Vieira, E. A., Chen, S., Souza, B.D., Fuhrmann, E., & Silva, J. P. (2013). Studies on variation of carotenoid-proteins content in cassava (*Manihot esculenta* Crantz) storage root reveal implications for breeding and the use of induced mutations. *Plant Mutation Report*, 3(1), 25–36.
- Carvalho, L. J. C. B., Agustini, M. A. V., Anderson, J. V., Vieira, E. A., de Souza, C. R. B., Chen, S., Schaal, B. A., & Silva, J. P. (2016). Natural variation in expression of genes associated with carotenoid biosynthesis and accumulation in cassava (*Manihot esculenta* Crantz) storage root. *BMC Plant Biology*, 16, 133. doi:10.1186/s12870-016-0826-0.
- Ceballos, H., Davrieux, F., Talsma, E. F., Belalcazar, J., Chavarriaga, P., & Anderson, M. S. (2017). Carotenoids in cassava roots. *Book's Chapter 12 Intech Open*, 189–221.
- Cervantes-Paz, B., Ornelas-Paz, J. d. J., Ruiz-Cruz, S., Rios-Velasco, C., Ibarra-Junquera, V., Yahia, E. M., & Gardea-Béjar, A. A. (2017). Effects

- of pectin on lipid digestion and possible implications for carotenoid bioavailability during pre-absorptive stages: A review. *Food Research International*, 99, 917–927.
- Chacón-Ordóñez, T., Carle, R., & Schweiggert, R. (2019). Bioaccessibility of carotenoids from plant and animal foods. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(7), 3220–3239.
- Chandrasekara, A., & Kumar, T. J. (2016). Roots and tuber crops as functional foods: a review on phytochemical constituents and their potential health benefits. *International Journal of Food Science*, 1–16.
- Chavez, A. L., Bedoya, J. M., Sánchez, T., Iglesias, C., Ceballos, H., & Roca, W. (2000). Iron carotene, and ascorbic acid in cassava roots and leaves. *Food Nutr. Bull.*, 21, 410–413.
- Chávez, A. L., Sánchez, T., Jaramillo, G., Bedoya, M., Echeverry, J., Bolanos, E. A., Ceballos, H., & Iglesias, C. A. (2005). Variation of quality traits in cassava roots evaluated in landraces and improved clones. *Euphytica*, 143, 125–133.
- Chen, Y., Li, F., & Wurtzel, E. T. (2010). Isolation and characterization of the Z-ISO gene encoding a missing component of carotenoid biosynthesis in plants. *Plant Physiology*, 153(1), 66–79. <https://doi.org/10.1104/pp.110.153916>.
- Cindy. (2016). Sweet potato vs Yam. Diakses pada 4 Oktober 2019 dari <https://www.eatbydate.com/sweet-potato-vs-yam/>.
- Colorado, J. A. M., Ramírez, H., & Fregene, M. (2009). Genetic mapping and QTL analysis for carotenes in population of cassava. *J. Acta Agronómica*, 58, 15–2.
- Creutzberg, P., & Laanen, J. T. M. (1987). *Sejarah statistik ekonomi Indonesia*. Jakarta: Yayasan Obor Indonesia.
- Cunningham, F.X., & Gantt, E. (1998). Genes and enzymes of carotenoid biosynthesis in plant. *Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 49, 557–583.
- Demirkiran, A., Marakli, S., Temel, A., & Gozukirmizi, N. (2013). Genetic and epigenetic effects of salinity on *in-vitro* growth of barley. *Genetic Molecular Biology*. 36(4), 566–570.



- Dibley, M. J., & Jeacocke, D. A. (2001). Safety and toxicity of vitamin A supplements in pregnancy. *Food and Nutrition Bulletin*, 22(3), 248–266. doi:10.1177/156482650102200304.
- Diretto, G., Tavazza, R., Welsch, R., Pizzichini, D., Mourgues, F., Papacchioli, V., Beyer, P., & Giuliano, G. (2006). Metabolic engineering of potato tuber carotenoids through tuber-specific silencing of lycopene epsilon cyclase. *BMC Plant Biology*, 6, 13. <https://doi.org/10.1186/1471-2229-6-13>.
- Dwiatmini, K., Kartikaningrum, S., & Sulyo, Y. (2009). Induksi mutasi kecombrang (*Etilingera elatior*) menggunakan iradiasi sinar gama. *Jurnal hortikultura*, 19(1), 1–5. doi: <http://dx.doi.org/10.21082/jhort.v19n1.p%25p>.
- Edoh, N., Adiele, J., Ndukwe, I., & Ogbokiri, H. (2016). Evaluation of cassava genotypes at advanced trial in Nigeria. *The Open Conference Proceedings Journal*, 7, 144–148.
- Eggersdorfer, M., & Wyss, A. (2018). Carotenoids in human nutrition and health. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 652, 18–26. doi:<https://doi.org/10.1016/j.abb.2018.06.001>
- Ehsanpour, A. A., Madani, S., Hosein, M. (2007). Detection of somaclonal variation in potato callus by UV-C radiation using RAPD-PCR. *Gen. Appl. Plant Physiology* 33(1–2), 3–11.
- Eitenmiller, R. R., Ye, L., & Landen Jr., W. O. (2008). *Vitamin analysis for the health and food sciences* (2nd ed.). CRC Press. Taylor & Francis Group.
- Englberger, L., Schierle, J., Kraemer, K., Aalbersberg, W., Dolodolowatake, U., Humphries, J.M., Graham, R., Reid, A. P., Lorens, A., Albert, K., Levedusky, A., Johnson, E., Paul, Y., & Sengebau, F. (2008). Carotenoid and mineral content of Micronesian giant swamp taro (*Cyrtosperma*) cultivars. *Journal of Food Composition and Analysis*, 21: 93–106.
- Esuma, W., Herselman, L., Labuschagne, M. T., Ramu, P., Lu, F., Baguma, Y., Buckler, E.S., Kawuki, R. S. (2016). Genome-wide association mapping of provitamin A carotenoid content in cassava. *Euphytica*, 212(1), 97–110.

- Evans, D. E., Coleman, J. O. D., Kearns, A. (2003). *Plant cell culture*. London (UK): Bios Scientific Publishers.
- Fajar, J. (2014). Sia-siakan keanekaragaman sumber pangan indonesia terjebak kebijakan pangan monokultur beras. Diakses pada 12 Desember 2019 dari <https://www.mongabay.co.id/2014/10/24/sia-siakan-keanekaragaman-sumber-pangan-indonesia-terjebak-kebijakan-pangan-monokultur-beras/>.
- FAO. (2018). Food outlook - Biannual report on global food markets - November 2018. Rome. 104 pp. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
- Felemban, A., Braguy, J., Zurbriggen, M. D., & Al-Babili, S. (2019). Apocarotenoids involved in plant development and stress response. *Frontiers in Plant Science*, 10(1168), 1–16.
- Fitriani, H., Rahman, N., & Hartati, N. S. (2017). Induksi tunas majemuk ubi kayu in vitro tinggi beta karoten genotip Mentega 2 dan Ubi Kuning asal regenerasi dari embrio somatik berdasarkan variasi konsentrasi CuSO_4 . *Prosiding Semnas PERIPI*. Bogor, 3 Oktober 2017.
- Fitriani, H., Fathoni, A., & Hartati, N. S. (2016). Pengaruh media, waktu kultur, pikloram, dan pencahayaan terhadap proliferasi embrio somatik sekunder (ESS) pada ubi kayu genotip Mentega 2. *Prosiding Seminar Nasional XIX Kimia dalam Pembangunan*. Yogyakarta.
- Fraser, P. D., & Bramley, P. M. (2004). The biosynthesis and nutritional uses of carotenoids. *Progress in Lipid Research*, 43(3), 228–65. <https://doi.org/10.1016/J.PLIPRES.2003.10.002>.
- Fukuda, W. M. G., Guevara, C. L., Kawuki, R., & Ferguson, M. E. (2010). Selected morphological and agronomic descriptors for the characterization of cassava. *International Institute of Tropical Agriculture (IITA)*. 1–28.
- Galanakis, C. (2017). What is the difference between bioavailability, bioaccessibility, and bioactivity of food components? Elsevier SciTech Connect. Diakses pada 6 Desember 2019 dari <http://scitechconnect.elsevier.com/bioavailability-bioaccessibility-bioactivity-food-components/>.



- Giovanni, G., Tavazza, R., Diretto, G., Beyer, P., & Taylor, M. A. (2008). Metabolic engineering of carotenoid biosynthesis in plants. *Trends in Biotechnology*, 26(3), 139–45. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2007.12.003>.
- Gao, H., Xu, H., Liu, X., Liu, B., & Deng, X. (2011). Light effect on carotenoids production and expression of carotenogenesis genes in citrus callus of four genotypes. *Acta Physiol Plant*, 33, 2485–2492. doi:10.1007/s11738-011-0793-x.
- Giuliano, G., Tavazza, R., Diretto, G., Beyer, P., & Taylor, M. A. (2008). Metabolic engineering of carotenoid biosynthesis in plants. *Trends in Biotechnology*, 26(3), 139–145. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2007.12.003>
- Goldberg, I. (1994). *Functional food: designer foods, pharmafoods, nutraceuticals*. Springer.
- Goodstein, D.M., Shu, S., Howson, R., Neupane, R., Hayes, R.D., Fazo, J., Mitros T., Dirks W., Hellsten U., Putnam N., & Rokhsar, D.S. (2012). Phytozome: A comparative platform for green plant genomics. *Nucleic Acids Research*. <https://doi.org/10.1093/nar/gkr944>.
- Goodwin, T. W. (1980). Nature and distribution of carotenoids. *Food Chemistry*, 5, 3–13.
- Griffiths, A. J. F., Wessler, S. R., Carroll, S. B., Doebley, J. (2012). *Introduction to genetic analysis international tenth edition*. New York (AS): W. H Freeman and Company.
- Grozeva, S. (2015). Effect of copper levels in the culture medium on shoot regeneration in pepper. *Banat's Journal of Biotechnology*. 12, 86–91.
- Gu, B., Yao, Q. Q., Li, K. M., & Chen, S. B. (2013). Change in physicochemical traits of cassava roots and starches associated with genotypes and environmental factors. *Starch-Stärke*, 65, 253–263.
- Guritno, B., Sitompul, S. M., Soetono, & de Bruijn, G. H. (1988). The agronomy of mukibat cassava. 6th *Symposium Proceeding*, Sixth Symposium of the International Society for Tropical Root Crops/diselenggarakan oleh CIP di Lima, Peru, 21–26 Februari 1983.

- Ha, K. S., Kim, Y. H., Ahn, Y. O., Ahn, M. J., Jeong, J. C., Lee, H. S., & Kwak, S. S. (2013). Downregulation of the lycopene ϵ -cyclase gene increases carotenoid synthesis via the beta-branch-specific pathway and enhances salt-stress tolerance in sweetpotato transgenic calli. *Physiologia Plantarum*, 147(4), 432–42. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2012.01688.x>.
- Hagenimana, V., Carey, E. E., Gichuki, S. T., Oyunga, M. A., & Imungi, J. K. (1999). Carotenoid contents in fresh, dried and processed sweet potato products. *Ecology of Food and Nutrition*, 37, 455–473.
- Hannoufa, A., & Hossain, Z. (2012). Regulation of carotenoid accumulation in plants. *Biocatal. Agric. Biotechnol.* 1(3), 198–202. doi : 10.1016/j.bcab.2012.03.004.
- Hartati, N.S., Sudarmonowati, E., Rahman, N., Hartati, R., Hartati, Damayanti, T., & Rijadi, S. (2003). *Seleksi genotip ubi kayu Indonesia untuk kadar beta karoten berdasarkan marka genetik*. Laporan Teknik Proyek Penelitian Bioteknologi Tahun anggaran 2002. Pusat Penelitian Bioteknologi LIPI.
- Hartati, N. S., Fitriani, H., Supatmi., & Sudarmonowati, E. (2012). Karakter umbi dan nutrisi tujuh genotip ubi kayu (*Manihot esculenta*). *Jurnal Agricola*, 2(2), 101–110.
- Hartati, N. S., Aryaningrum, P., & Sudarmonowati, E. (2016). Isolasi fragmen gen phytoene synthases (PSY), beta carotene hydroxylase (BCH) dan granule bound starch synthase (GBSS) talas Mentega dan Bentul. *Prosiding Kongres Teknologi Nasional 2016*, 843–848.
- Hartati & Hartati, N. S. (2016). Efisiensi grafting enam genotip ubi kayu hasil seleksi untuk mendukung peningkatan produksi. *Prosiding Kongres Teknologi Nasional 2016*. Jakarta 25–27 Juli 2016.
- Hatmi, R.U., & Djaafar, T.F. (2014). Keberagaman umbi-umbian sebagai pangan fungsional. *Prosiding Seminar Hasil Penelitian Tanaman Aneka Kacang dan Umbi 2014*, 22, 950–960.
- Henriquez, M. A., Soliman, A., Li, G., Hannoufa, A., Ayele, B. T., & Daayf, F. (2016). Molecular cloning, functional characterization and expression of potato (*Solanum tuberosum*) 1-Deoxy-d-Xylulose 5-Phosphate



- Synthase 1 (StDXS1) in response to *Phytophthora infestans*. *Plant Science*, 243, 71–83. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2015.12.001>.
- Hotz, C., & McClafferty, B. (2007). From harvest to health: challenges for developing biofortified staple foods and determining their impact on micronutrient status. *Food and Nutrition Bulletin*, 28(2), 271–279.
- Huang, A. S., Tanudjaja, L., & Lum, D. (1999). Content of alpha-, betacarotene, and dietary fiber in 18 sweet potato varieties grown in Hawaii. *Journal of Food Composition and Analysis*, 12, 147–151.
- Hussain, A., Qarshi, I. A., Nazir, H., & Ullah, I. (2012). Plant tissue culture: current status and opportunities. Dalam A. Leva & L. M. R. Rinaldi (eds.), *Recent advances in plant in vitro culture*, IntechOpen, 17 Oktober 2012.
- Ilova, P., Bouis, H.E., Palenberg, M., Moursi, M., & Oparinde, A. (2017). Vitamin a cassava in Nigeria: crop development and Delivery. *Afr J. Dood Agric. Nutr. Dev.*, 17(2), 12000–12025.
- Institute of Medicine (IOM). (2001). Vitamin A. Dalam Institute of Medicine (IOM) (Ed.), *Dietary reference intakes for vitamin A, vitamin K, arsenic, boron, chromium, copper, iodine, iron, manganese, molybdenum, nickel, silicon, vanadium, and zinc* (pp. 82–161). Washington, DC: National Academy Press.
- Isaacson, T., Ohad, I., Beyer, P., & Hirschberg, J. (2004). Analysis in vitro of the enzym CRTISO establishes a poly-cis-carotenoid biosynthesis pathway in plants. *Plant Physiology*, 136, 4246–4255. doi:10.1104/pp.104.052092.
- Ishida, B.K., & Chapman, M.H. (2009). Carotenoid extraction from plants using a novel, environmentally friendly solvent. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(3), 1051–1059.
- Islam, S.N., Nusrat, T., Begum, P., & Ahsan, M. (2016). Carotenoids and beta carotene in orange fleshed sweet potato: a possible solution to vitamin A deficiency. *Food Chemistry*, 199, 628–631.
- Isler, O. (1971). *Carotenoids*. Stuttgart, Germany: Birkhäuser Verlag Basel.

- Jaarsveld, P. J., Marais, D. W., Harmse, E., Nestel, P., & Rodriguez-Amaya, D. B. (2006). Retention of beta carotene in boiled, mashed orange fleshed sweet potato. *J. Food Composition and Analysis*, 19, 321–329.
- Jarvis, P., & Lopez-Juez, E. (2013). Biogenesis and homeostasis of chloroplasts and other plastids. *Nat. Rev. Mol. Cell Biol.*, 14, 787–802.
- Kang, C., Zhai, H., Xue, L., Zhao, N., He, S., & Liu, Q. (2018). A lycopene beta-cyclase gene, *IbLCYB2*, enhances carotenoid contents and abiotic stress tolerance in transgenic sweetpotato. *Plant Science*, 27, 243–54. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2018.05.005>.
- Katirae, L. (2015). Crop modification techniques. Diakses pada 6 Desember 2019 dari <https://biofortified.org/portfolio/crop-modification-techniques>.
- Kemenperin. (2018). *Laporan kinerja ekonomi & sektor industri tahun 2017*. Jakarta: Kementerian Perindustrian.
- Kementerian Perindustrian. (2017). Industri makanan dan minuman masih jadi andalan. Siaran Pers. Diakses pada 5 Desember 2019 di <https://kemenperin.go.id/artikel/18465/Industri-Makanan-dan-Minuman-Masih-Jadi-Andalan>.
- Kim, S. H., Ahn, Y. O., Ahn, M. J., Lee, H. S., & Kwak, S. S. (2012). Down-regulation of beta-carotene hydroxylase increases beta-carotene and total carotenoids enhancing salt stress tolerance in transgenic cultured cells of sweetpotato. *Phytochemistry*, 74, 69–78. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2011.11.003>.
- Klein, T.M., Wolf, E.D., Wu, R., & Sanford, J.C. (1987). High-velocity microprojectiles for delivering nucleic acids into living cells. *Nature* 327, 70–73.
- K'osambo, L. M., Carey, E. E., Misra, A. K., Wilkes, J., & Hagenimana, V. (1998). Influence of age, farming site, and boiling on pro-vitamin content in sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) storage roots. *Journal of Food Composition and Analysis*, 11, 305–321.
- Kowalewska, Ł., Mazur, R., Suski, S., Garstka, M., & Mostowska, A. (2016). Three-dimensional visualization of the tubular-lamellar transformation of the internal plastid membrane network during runner bean chloro-



- plast biogenesis. *Plant Cell*, 28, 875–891. doi: <https://doi.org/10.1105/tpc.15.01053>.
- Kumar, S., Stecher, G., Li, M., Knyaz, C., & Tamura, K. (2018). MEGA X: molecular evolutionary genetics analysis across computing platforms. *Molecular Biology and Evolution*, 35(6), 1547–1549. <https://doi.org/10.1093/molbev/msy096>.
- Kurniajati, W. S. (2017). *Perakitan keragaman bawang merah (Allium cepa L. kelompok Aggregatum) dengan induksi mutasi sinar gama* [tesis]. Sekolah Pascasarjana IPB, Bogor.
- Lancaster, J. E., Lister C. E., Reay P. F., & Triggs C. M. (1997). Influence of pigment composition on skin color in a wide range of fruit and vegetables. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 122, 594–598.
- La Franco, M. R., Woodhouse, L. R., Burnett, D. J., & Burri, B. J. (2013). Biofortified cassava increases β -carotene and vitamin a concentrations in the tag-rich plasma layer of American women. *Br. J. Nutr*, 110, 310–320.
- Lestari, E. G., Purnamaningsih, R., Syukur, M., & Yunita, R. (2010). Keragaman somaklonal untuk perbaikan tanaman Artemisia (*Artemisia annua* L.) melalui kultur *in vitro*. *AgroBiogen* 6(1): 26–32.
- Li, R., Kang, C., Song, X., Yu, L., Liu, D., He, S., Zhai, H., Liu, Q. (2017). A ζ -carotene desaturase gene, IbZDS, increases beta-carotene and lutein contents and enhances salt tolerance in transgenic sweetpotato. *Plant Science*, 262, 39–51. <https://doi.org/10.1016/J.PLANTSCI.2017.05.014>.
- Maass, D., Arango, J., Wüst, F., Beyer, P., & Welsch, R. (2009). Carotenoid crystal formation in arabidopsis and carrot roots caused by increased phytoene synthase protein levels. *PLoS ONE* 4(7), e6373. doi:10.1371/journal.pone.0006373.
- Maheshwari, P. & Kovalchuk, I. (2016). Genetic transformation of crops for oil production. Dalam *Industrial oil crops* (pp. 379–412). Urbana, IL.: AOCS Press.
- Manghwar, H., Lindsey, K., Zhang, X., & Jin, S. (2019). CRISPR/cas system: recent advances and future prospects for genome editing. *Trends Plant Sci.*, 24, 1102–1125.

- Mann, V., Harker, M., Pecker, I., & Hirschberg, J. (2000). Metabolic engineering of astaxanthin production in tobacco flowers. *Nat Biotechnol.* 18, 888–892. <https://doi.org/10.1038/78515>.
- Mariscal, A. M., Bergantin, R. V., & Troyo, A. D. (2001). Cassava breeding and dissemination in the Philipphines-Major achievements in the past 20 years. Dalam R. H. Howler & S. L. Tan (eds.), *Cassava's potential in asia in the 21st century: present situation and future research and development needs*, 193–203. Proc. 6th Regional Workshop. Ho Chimin City, Vietnam 21–25 Februari.
- Mariska, I., & Lestari, E. G. (2003). Pemanfaatan kultur *in vitro* untuk meningkatkan keragaman genetik tanaman nilam. *Litbang Pertanian* 22(2), 64–69.
- Maziya-Dixon, B., Alamu, E. O., & Dixon, A. G. O. (2016). Variation in the evaluation of cis- and trans-beta-carotene in yellow-fleshed cassava (*Manihot esculenta* Crantz) varieties as a function of the storage root portion and sampling method. *LWT – Food Science and Technology*, 70, 296–301.
- Maziya-Dixon, B., Adebowale, A. A., Onabanjo, O. O., & Dixon, A. G. O. (2005). Effect of variety and drying methods on physico-chemical properties of high quality cassava flour from yellow cassava roots. Dalam *African Crop Science Conference Proceedings*. African Crop Science Society: Kampala, Uganda, 635–641.
- Mcgilvery, R. W., & Goldstein, G. W.. (1996). *Biokimia: suatu pendekatan fungsional*. Sumarno DSBK, T. M. (penerj.). Surabaya: Airlangga University Press.
- McWeeny, D.J. (1968). Deterioration of β -carotene in certain hydrogenated fats. I.—Incidence of green discoloration during storage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 19(5), 250–253.
- Mgbeze, G. C., & Iserhienrhien, A. (2014). Somaclonal variation associated with oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq) clonal proagation: a review. *Afr. J. Biotechnol.*, 13(9), 989–997.
- Montagnac, J. A., Davis, C. R., & Tanumihardjo, S. A. (2009). Nutritional value of cassava for use as a staple food and recent advances for improve-



- ment. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 8(3), 181–194. doi:10.1111/j.1541-4337.2009.00077.x.
- Moorthy, S. N., Jos, S. S., Nair, R. B., & Sreekumari, M. T. (1990). Variability of beta-carotene content in cassava germplasm. Technical Note. *Food Chemistry*, 36, 233–236.
- Moreno, J. C., Pizarro, L., Fuentes, P., Handford, M., Cifuentes, V., & Stange, C. (2013). Levels of Lycopene beta-Cyclase 1 modulate carotenoid gene expression and accumulation in *Daucus carota*. *PLoS ONE*, 8(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0058144>.
- Moresco, R., Uarrota, V.G., Pereira, A., Tomazzoli, M., Nunes, E.C., Peruch, L.A.M., Costa, C., Rocha, M., & Maraschin, M. (2015). Carotenoid analysis of cassava genotypes roots in Southern Brazil using chemometric tools. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 375, 11–18. doi:10.1007/978-3-319-19776-0_2.
- Morris, W. L., Ducreux, L. J. M., Hedden, P., Millam, S., & Taylor, M. A. (2006). Overexpression of a bacterial 1-deoxy-D-xylulose 5-phosphate synthase gene in potato tubers perturbs the isoprenoid metabolic network: implications for the control of the tuber life cycle. *Journal of Experimental Botany*, 57(12), 3007–18. <https://doi.org/10.1093/jxb/erl061>.
- Muchtadi, T.R. (1992). *Karakterisasi komponen intrinsik utama buah sawit (Elaeis guineensis, Jacq.) dalam rangka optimalisasi proses ekstraksi minyak dan pemanfaatan provitamin A*. (Disertasi), Fakultas Pasca-sarjana. Institut Pertanian Bogor. Bogor.
- Munemasa, S., Hauser, F., Park, J., Waadt, R., Brandt, B., & Schroeder, J. I. (2015). Mechanisms of abscisic acid-mediated control of stomatal aperture. *Current Opinion in Plant Biology*. Amsterdam: Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2015.10.010>
- Nambara, E., & Marion-Poll, A. (2005). Abscisic acid biosynthesis and catabolism. *Annu. Rev. Plant Biol.*
- Nagarajan, J., Ramanan, R. N., Raghunandan, M. E., Galanakis, C. M., & Krishnamurthy, N. P. (2017). Chapter 8 - Carotenoids. Dalam C. M. Galanakis (Ed.), *Nutraceutical and functional food components* (pp. 259–296). Academic Press.

- Nassar, N., Vizzotto, C.S., Schwartz, C.A., & Pires Júnior, O.R. (2007). Cassava diversity in Brazil: the case of carotenoid-rich landraces. *Genetics and Molecular Research*, 6(1), 116–121.
- Nassar, N., Junior, O., Sousa, M., & Ortiz, R. (2009). Improving carotenoids and amino-acids in cassava. *Recent Patents on Food, Nutrition & Agriculture*, 1, 32–38.
- Nassar, N. M. A., Fernandes, P. C., Melani, R. D., & Pires Júnior, O. R. (2009). Amarelinha do Amapa: a carotenoid-rich cassava cultivar. *Genet. Mol. Res*, 8(3), 1051–1055.
- Nisar, N., Li, L., Lu, S., Khin, N. C., & Pogson, B. J. (2015). Carotenoid metabolism in plants. *Molecular Plant*, 8(1), 68–82. <https://doi.org/10.1016/J.MOLP.2014.12.007>.
- Nishino, H. (1998). Chapter 6 Carotenoids, as Promising Factor for Functional Foods. Dalam *Functional Foods for Disease Prevention I* 701, 59–70. American Chemical Society.
- Niu, F. X., Lu, Q., Bu, Y. F., & Liu, J. Z. (2017). Metabolic engineering for the microbial production of isoprenoids: carotenoids and isoprenoid-based biofuels. *Synthetic and Systems Biotechnology*, 2, 167–175. <http://dx.doi.org/10.1016/j.synbio.2017.08.001>.
- Njoku, D. N., Vernon, G., Egesi, C. N., Asante, I., Offei, S. K., Okogbenin, E., Kulakow, P., Eke-okoro, O.N., Ceballos, H. (2011). Breeding for enhanced β -carotene content in cassava: Constraints and accomplishments. *Journal of Crop Improvement*, 25(5), 560–571.
- Pusdatin Kementerian Pertanian. (2019). Situs basis data statistik pertanian. Diakses pada 1 Maret 2020 dari <https://aplikasi2.pertanian.go.id/bdsp>.
- Olaya, A. O., Salami, A. O., Bodunde, J. G., Iluebbey, P., & Hamed, L. A. (2016). Field evaluation of yellow cassava varieties as affected by fertilizer types and rates in two agroecologies of Nigeria. *African Journal of Agricultural Science and Technology*, 4(2), 500–510.
- Oliveira, M., Carvalho, L., Nutti, R., Carvalho, J., & Fukuda, W. (2010). Assessment and degradation study of total carotenoid and β -carotene in bitter yellow cassava (*Manihot esculenta* Crantz) varieties. *African Journal of Food Science* 4(4), pp. 148–155.



- Omodamiro, R. M., Oti, E., Etudaiye, H. A., Egesi, C., Olasanmi, B., & Ukpabi, U. J. (2012). Production of fufu from yellow cassava roots using the odorless flour technique and the traditional method: evaluation of carotenoids retention in the fufu. *Adv. Appl. Sci. Res.*, 3, 2566–2572.
- Ovalle, T., Perea, C., Pizarro, M., Morante, N., Ceballos, H., Dufour, D., Meike, A., López-Lavalle, A. B. (2016). Elucidating high betacarotene accumulation in cassava, based on next generation sequencing. *Poster Presentation World Congress on Root and Tuber Crops*. Nanning, Guangxi, China, 18–22 Januari 2016.
- Paust, R., Hemaiswarya, S., & Rengasamy, R. (2007). Exploitation of *Dunaliella* for β -carotene production. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 74, 5171–523.
- Perera, C. O., & Yen, G. M. (2007). Functional properties of carotenoids in human health. *International Journal of Food Properties*, 10(2), 201–230. doi:10.1080/10942910601045271.
- Pulido, P., Perello, C., & Rodriguez-Concepcion, M. (2012). New insights into plant isoprenoid metabolism. *Molecular Plant*, 5(5), 964–67. <https://doi.org/10.1093/MP/SSS088>.
- Raemakers C., Sofiari E., Taylor, N., Henshaw G., Jacobsen, E., & Visser, R. (1996). Production of transgenic cassava (*Manihot esculenta* Crantz) plants by particle bombardment using luciferase activity as selection marker. *Molecular Breeding*, 2, 339–349.
- Raja, R., Hemaiswarya, S., & Rengasamy, R. (2007). Exploitation of *Dunaliella* for beta-carotene production. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 74(3), 517–523. doi: 10.1007/s00253-006-0777-8.
- Rajendran, P. G., Nair, S. G., Easwari Amma, C. S., & Sreekumari, M. T. (1993). Recent progress in cassava varietal improvement in India. Dalam R. H. Howeler (ed.), *Cassava breeding, agronomy research and technology transfer in Asia*. Proceeding of the fourth Regional Workshop Held in Trivandrum, Kerala, India, 2–6 November 1993.
- Rahmadi, A., & Yusuf, B. (eds). (2018). *Pangan fungsional berkhasiat antioksidan*. Samarinda: Mulawarman University Press.

- Ribeiro, B., Barreto, D., & Coelho, M. (2011). Technological aspects of β -carotene. *Food and Bioprocess Technology*, 4, 693–701. doi:10.1007/S11947-011-0545-3.
- Reboul, E. (2019). Mechanisms of carotenoid intestinal absorption: where do we stand? *Nutrients*, 11(4), 838.
- Rodríguez-Concepción, M. (2010). Supply of precursors for carotenoid biosynthesis in plants. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 504(1), 118–22. <https://doi.org/10.1016/J.ABB.2010.06.016>.
- Rodríguez-Villalón, A., Gas, E., & Rodríguez-Concepción. (2009). Phytoene synthase activity controls the biosynthesis of carotenoids and the supply of their metabolic precursors in dark-grown Arabidopsis seedlings. *The Plant Journal*, 60, 424–435. doi: 10.1111/j.1365-313X.2009.03966.x.
- Rodriguez-Concepcion, M. (2002). Elucidation of the methylerythritol phosphate pathway for isoprenoid biosynthesis in bacteria and plastids: a metabolic milestone achieved through genomics. *PLANT PHYSIOLOGY*, 130(3), 1079–89. <https://doi.org/10.1104/pp.007138>.
- Sahu, P.P., Pandey, G., Sharma, N., Puranik, S., Muthamilarasan, M., Prasad, M. (2013). Epigenetic mechanisms of plant stress responses and adaption. *Plant Cell Reports*, 32, 1151–1159.
- Saini, R. K., Nile, S. H., & Park, S. W. (2015). Carotenoids from fruits and vegetables: chemistry, analysis, occurrence, bioavailability and biological activities. *Food Research International*, 76, 735–750.
- Saltzman, A., Birol, B., Bouis, H. E., Boy, E., De Moura, F. F., Islam, Y., & Pfeiffer, W. H. (2013). Biofortification: progress toward a more nourishing future. *Glob. Food Secur.*, 2, 9–17.
- Sánchez, T., Chávez, A., Ceballos, H., Rodriguez-Amaya, D., Nestel, P., & Ishitani, M. (2006). Reduction or delay of post-harvest physiological deterioration in cassava roots with higher carotenoid content. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86(4), 634–639. doi:10.1002/jsfa.2371.
- Sánchez, T., Ceballos, H., Dufour, D., Ortiz, D., Morante, N., Calle, F., Zum Felde, T., Dominguez, M., & Davrieux, F. (2014). Prediction of

- carotenoids, cyanide and dry matter contents in fresh cassava root using NIRS and hunter color techniques. *Food Chem.*, 151, 444–451.
- Sandmann, G., Römer, S., & Fraser, P. D. (2006). Understanding carotenoid metabolism as a necessity for genetic engineering of crop plants. *Metabolic Engineering*, 8, 291–302. doi:10.1016/j.ymben.2006.01.005.
- Sayre, R., Beeching, J.R., Cahoon, E.B., Egesi, C., Fauquet, C., Fellman, J., Fregene, M., Gruissem, W., Mallowa, S., Manary, M., Dixon, B.M., Mbanaso, A., Schachtman, D.P., Siritunga, D., Taylor, N., Vanderschuren, H., Zhang, P. (2011). The Biocassava plus program: Biofortification of cassava for sub-Saharan Africa. *Annu. Rev. Plant Biol.*, 62, 251–272.
- Schaub, P., Rodriguez-Franco, M., Cazzonelli, C. I., Álvarez, D., & Wüst, F. (2018). Establishment of an Arabidopsis callus system to study the interrelations of biosynthesis, degradation and accumulation of carotenoids. *PLOS ONE*, 13(2), e0192158. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0192158>.
- Schierle, J., Pietsch, B., Ceresa, A., Fizet, C., & Waysex, E. H. (2004). Method for the determination of beta-carotene in supplements and raw materials by reserved-phase liquid chromatography: single laboratory validation. *Journal of AOAC International*, 87(5), 1070–1082.
- Sies, H., Stahl, W., & Sundquist, A. R. (1992). Antioxidant functions of vitamins. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 669(1), 7–20. doi:10.1111/j.1749-6632.1992.tb17085.x.
- Simpson, K., Fuentes, P., Quiroz-Iturra, L. F., Florez-Ortiz, C., Contreras, R., Handford, M., & Stange, C. (2018). Unraveling the induction of phytoene synthase 2 expression by salt stress and abscisic acid in *Daucus carota*. *Journal of Experimental Botany*, 69(16), 4113–4126. doi:10.1093/jxb/ery207.
- Simpson, K., Quiroz, L. F., Rodriguez-Concepción, M., & Stange, C. R. (2016). Differential contribution of the first two enzymes of the mep pathway to the supply of metabolic precursors for carotenoid and chlorophyll biosynthesis in carrot (*Daucus carota*). *Frontiers in Plant Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01344>.

- Smulders, M. J. M., & Klerk, G. J. (2011). Epigenetics in plant tissue culture. *Plant Growth Regulation*, 63, 137.
- Song, X.-y., Zhu, W. -j., Tang, R.-m., Cai, J.-h., Chen, M., & Yang, Q. (2016). Over-expression of *StLCYb* increases beta-carotene accumulation in potato tubers. *Plant Biotechnology Reports*, 10(2), 95–104. <https://doi.org/10.1007/s11816-016-0390-y>.
- Soniya, E. V., Banerjee, N. S., & Das, M. R. (2001). Genetic analysis of somaclonal variation among callus derived plants of tomato. *Research Communications*, 80(9), 1213–1215.
- Stahl, W., & Sies, H. (2003). Antioxidative activity of carotenoids. *Mol. Asp. Med.*, 24, 345–351.
- Stahl, W., & Sies, H. (2005). Bioactivity and protective effects of natural carotenoids. *Biochimica et biophysica acta (BBA) - Molecular basis of disease*, 1740(2), 101–107.
- Stange, C., & Flores, C. (2012). Carotenoids and photosynthesis – regulation of carotenoid biosynthesis by photoreceptors. Dalam Dr. Mohammad Najafpour (Ed.), *Advances in photosynthesis–Fundamental aspects*. ISBN: 978-953-307-928-8, InTech. Diakses pada 5 Desember 2019 dari <http://www.intechopen.com/books/advances-inphotosynthesis-fundamental-aspects/carotenoids-and-photosynthesis-regulation-of-carotenoid-biosynthesis-byphotoreceptors>.
- Subagio, A. (2007). *Industrialisasi modified cassava flour (Mocaf) sebagai bahan baku industri pangan untuk menunjang diversifikasi pangan pokok nasional*. Jember: Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Jember.
- Sudarmonowati, E., & Henshaw, G. G. (1996). The Use of picloram and dicamba to induce somatic embryogenesis in cassava. *Annales Bogorienses n.s.* 4(1), 27–34.
- Sudarmonowati, E., Hartati, N. S., Sugiharti, S., Rahman, S., Fitriani, H., Hartati, & Wahyuni. (2008). *Seleksi tanaman unggul menggunakan penanda RAPD (Random Amplified Polymorphic DNA)*. Laporan Teknik Pusat Penelitian Biologi LIPI 2008.



- Sudarmonowati, E. Hartati, N. S., Fathoni, A., & Hartati. (2018). Biodiversitas, perakitan klon unggul dan pemanfaatan bioresources ubi kayu untuk menunjang ketahanan pangan. Jakarta: LIPI Press.
- Sudhir, K., Stecher, G., Li, M., Knyaz, C., & Tamura, K. (2018). MEGA X: molecular evolutionary genetics analysis across computing platforms. Dalam F. U., Battistuzzi, (Ed.). *Molecular Biology and Evolution*, 35(6), 1547–49. <https://doi.org/10.1093/molbev/msy096>.
- Sun, S., Zhong, J., Li, S., & Wang, X. (2013). Tissue culture-induced somaclonal variation of decreased pollen viability in torenia (*Torenia fournieri* Lind.). *Botanical Studies*, 54(1), 36. doi: 10.1186/1999-3110-54-36.
- Sun, T., Yuan, H., Cao, H., Yazdani, M., Tadmor, Y., & Li, L. (2018). Carotenoid metabolism in plants: the role of plastids. *Molecular Plant*, 11(1), 58–74. doi:10.1016/j.molp.2017.09.010.
- Supatmi, & Sudarmonowati, E. (2012). Improved regeneration: acclimatization and shoot cutting production of “gebang” cassava derived from irradiated *in vitro* shoots. *Annales Bogorienses*, 16(2), 7–12.
- Supatmi, Fitriani, H., Rahman, N., Hartati, N. S., & Sudarmonowati, E. (2017). Robust *in vitro* propagation and regeneration of ubi kuning high beta carotene cassava genotype through somatic embryogenesis. *Nusantara Bioscience*, 9(4), 352–360.
- Supatmi, Rahman, N., & Hartati, N. S. (2018). Growth and proline content of irradiated *in vitro* shoots of ubi kuning cassava genotype cultured at different temperatures. *Annales Bogorienses*, 22(1), 35–45.
- Syahid, S. F. (2008). Keragaman morfologi pertumbuhan produksi mutu dan fitokimia keladi tikus (*Typonium flagelliforme* Lodd.) Blume asal variasi somaklonal. *Litri*, 14(3), 113–118.
- Syukur, M., Sastrosumarjo, S., Wahyu, Y., Aisyah, S. I., Sujiprihati, S., & Yunianti, R. (2013). *Sitogenetika tanaman*. Bogor: IPB Press.
- Takahata, Y., Noda, T., & Nagata, T. (1993). HPLC determination of beta carotene content of sweet potato cultivars and its relationships with color value. *Japan J. Breed*, 43, 421–427.

- Talsma, E. F. (2014). *Yellow cassava: efficiency of provitamin A rich cassava on improvement of vitamin A status in Kenyan schoolchildren* (Ph.D. Thesis). Wageningen University, Wageningen, Belanda, 3 Juli 2014.
- Taylor, N. J., Edwards, M., Kiernan, R. J., Davey, C., Blakesley, D., & Henshaw, G. G. (1996). Development of friable embryogenic callus and embryogenic suspension culture systems in cassava (*Manihot esculenata* Crantz). *Nat. Biotechnol*, 14, 726–730.
- Taylor, N. J., Masona, M. V., Carcamo, R., Ho, T., Schopke, C., & Fauquet, C. M. (2001). Production of embryogenic tissues and regeneration of transgenic plants in cassava (*Manihot esculenta* Crantz). *Euphytica*, 210, 25–34.
- Taylor, M., & Ramsay, G. (2005). Carotenoid biosynthesis in plant storage organs: recent advances and prospects for improving plant food quality. *Physiologia Plantarum*, 124(2), 143–151. doi:10.1111/j.1399-3054.2005.00509.x.
- Temesgen, M., Retta, N., & Tesfaye, E. (2016). Effect of pre-curdling on nutritional and anti-nutritional composition of taro (*Colocasia esculenta* L.) leaf. *International Journal of Food Science and Nutrition*, 1(1), 5–11.
- Transparency Market Research (TMRGL1090). (2018). Food & beverages - Market research report - Carotenoids Market. Diakses pada 5 Desember 2019 dari <https://www.transparencymarketresearch.com/carotenoids-market.html>.
- Tuan, P.A., Thwe, A.A., Kim, Y.B., Kim, J.K., Kim, S.J., Lee, S., Chung, S.O., & Park, S.U. (2012). Effect of white, blue, and red light-emitting diodes on carotenoid biosynthetic gene expression levels and carotenoid accumulation in sprouts of Tartary Buckwheat (*Fagopyrum tataricum* Gaertn.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61, 12356–12361. dx.doi.org/10.1021/jf4039937.
- Tumuhimbise, G. A., Namutebi, A., & Muyonga, J. H. (2009). Microstructure and in vitro beta carotene bioaccessibility of heat processed orange fleshed sweet potato. *Plant Food Human Nutrition*, 64, 312–318.
- Ukenye, E., Ukpabi, U. J., Chijoke, U., Egesi, C., & Njoku, S. (2013). Physicochemical, nutritional and processing properties of promising



- newly bred white and yellow fleshed cassava genotypes in Nigeria. *Pak. J. Nutr.*, *12*, 302–305.
- Van Eck, J., Conlin, B., Garvin, D. F., Mason, H., Navarre, D. A., & Brown, C. R. (2007). Enhancing beta-carotene content in potato by RNAi-mediated silencing of the beta-carotene hydroxylase gene. *American Journal of Potato Research*, *84*(4), 331–342. <https://doi.org/10.1007/BF02986245>.
- Vimala, B., Nambisan, B., & Hariprakash, B. (2011). Retention of carotenoids in orange flesh sweet potato during processing. *J. Food Sci. Technol.*, *48*(4), 520–524.
- Vimala, B., Sreekanth, A., Binu, H. & Gruneberg, W. (2011). Variability in 42 orange-fleshed sweet potato hybrids for tuber yield and carotene and dry matter content. *Gene Conserve*, *40*, 190–200.
- Vimala, B., Nambisan, B., Thushara, R., & Unnikrishnan, M. (2009). Variability of carotenoids in yellow-fleshed cassava (*Manihot esculenta* Crantz) clones. *Gene Conserve*, *31*, 676–685. 20.
- Vishnevetsky, M., Ovadis, M., & Vainstein, A. (1999). Carotenoid sequestration in plants: the role of carotenoid-associated proteins. *Trends Plant Sci*, *4*(6), 232–235. doi:10.1016/s1360-1385(99)01414-4.
- Vishwakarma, K., Upadhyay, N., Kumar, N., Yadav, G., Singh, J., Mishra, R. K., Kumar, V., Verma, R., Uphaday, R.G., Pandey, M., Sharma, S. (2017). Abscisic acid signaling and abiotic stress tolerance in plants: A review on current knowledge and future prospects. *Frontiers in Plant Science*. Frontiers Research Foundation. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00161>.
- Von Lintig, J., Welsch, R., Bonk, M., Giuliano, G., Batschauer, A., & Kleinig, H. (1997). Light-dependent regulation of carotenoid biosynthesis occurs at the level of phytoene synthase expression and is mediated by phytochrome in *Sinapis alba* and *Arabidopsis thaliana* seedlings. *Plant J.*, *12*, 625–634.
- Wahid, R. A. (2001). Efek radiasi sinar gama dosis rendah pada pertumbuhan kultur jaringan tanaman ciplukan (*Physalis angulata* L.). Dalam KPTP PAIR, (Ed.) *Risalah Pertemuan Ilmiah Penelitian dan Pengembangan*

- Aplikasi Isotop dan Radiasi*. 6–7 November 2001, Jakarta, Indonesia. Jakarta: PUSLITBANG Teknologi, Isotop dan Radiasi. Hlm. 235–240.
- Wahyuni, T., Jusuf, M., & Rahayuningsih, A. (2007). Akses plasma nutfah ubi jalar berkandungan beta-karoten tinggi. *Prosiding Seminar Hasil Penelitian Tanaman Kacang-kacangan dan Umbi-umbian: Inovasi Teknologi Kacang-kacangan dan Umbi-umbian Mendukung Kemandirian Pangan dan Kecukupan Energi*. Malang, 9 November 2007.
- Walford, J. (1980). *Development in food colours*. London: Applied Science Publishers, Ltd.
- Wattimena, G. A., Wiendi, N. M. A., Purwito, A., Efendi, D., Purwoko, B. S., & Khumaida, N. (2011). *Bioteknologi dalam pemuliaan tanaman*. Bogor: IPB Press.
- Welsch, R., Arango, J., Bär, C., Salazar, B., Al-Babili, S., Beltrán, J., Chavarriaga, P., Ceballos, H., Tohme, J., & Beyer, P. (2010). Provitamin A accumulation in cassava (*Manihot esculenta*) roots driven by a single nucleotide polymorphism in a phytoene synthase gene. *The Plant Cell*, 22, 3348–3356. www.plantcell.org/cgi/doi/10.1105/tpc.110.077560.
- Welsch, R., Beyer, P., Huqueney, P., Kleinig, H., & von Lontig, J. (2000). Regulation and activation of phytoene synthase, a key enzyme in carotenoid biosynthesis, during photomorphogenesis. *Planta*, 211, 846–854.
- WINA. (2019). Global demand for instant noodles. Diakses pada 12 Desember 2019 dari <https://instantnoodles.org/en/noodles/market.html>.
- Wu, X., Sun, C., Yang, L., Zeng, L., Liu, Z., & Li, Y. (2008). Beta Carotene content in sweet potato varieties from China and the effect of preparation on beta carotene retention in the Yanshu No 5. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 9, 581–586.
- Wurtzel, E. T. (2019). Changing form and function through carotenoids and synthetic biology. *Plant Physiology*, 179(3), 830–43. <https://doi.org/10.1104/pp.18.01122>.

- Younis, A., Siddique, M. I., Kim, C. K., & Lim, K. B. (2014). RNA interference (RNAi) induced gene silencing: a promising approach of hi-tech plant breeding. *Int. J. Biol. Sci.*, *10*, 1150–1158.
- Yu, B., Lydiate, D.J., Young, L.W., Schafer, U.A., & Hannoufa, A. (2008). Enhancing the carotenoid content of *Brassica napus* seeds by down-regulating lycopene epsilon cyclase. *Transgenic Res*, *17*, 573–585. doi:10.1007/s11248-007-9131-x.
- Yu, Q., Ghisla, S., Hirschberg, J., Mann, V., & Beyer, P. (2011). Plant carotene cis-trans isomerase CRTISO: A new member of the FAD_{RED}-dependent flavoproteins catalyzing non-redox reactions. *The Journal of Biological Chemistry*, *286*(10), 8666–76. <https://doi.org/10.1074/jbc.M110.208017>.
- Yuan, H., Zhang, J., Nageswaran, D., & Li, L. (2015). Carotenoid metabolism and regulation in horticultural crops. *Horticulture Research*, *2*, 15036. doi:10.1038/hortres.2015.36.
- Yunita R. (2009). Pemanfaatan variasi somaklonal dan seleksi in vitro dalam perakitan tanaman toleran cekaman abiotik. *Jurnal Litbang Pertanian*. *28*(4), 142–148.
- Yusuf, M., Khan, R. A., Khan, M., & Ahmed, B. (2012). Plausible antioxidant biomechanics and anticonvulsant pharmacological activity of brain-targeted beta-carotene nanoparticles. *International Journal of Nanomedicine*, *7*, 4311–4321. doi:10.2147/IJN.S34588.
- Zhang, L., Ma, G., Yamawaki, K., Ikoma, Y., Matsumoto, H., Yoshioka, T., Ohta, S., & Kato, M. (2015). Effect of blue LED light intensity on carotenoid accumulation in citrus juice sacs. *Journal of Plant Physiology*, *188*, 58–63. doi:10.1016/j.jplph.2015.09.006.
- Zhao, L., Chang, W. C., Xiao, Y., Liu, H. W., & Liu, P. (2013). Methylerythritol phosphate pathway of isoprenoid biosynthesis. *Annual Review of Biochemistry*, *82*(1), 497–530. <https://doi.org/10.1146/annurev-biochem-052010-100934>.
- Zinati, Z., Nazari, L., Bagnaresi, P., & Ravash, R. (2017). In silico identification of transcription factors associated with the biosynthesis of carotenoids in corn (*Zea mays* L.). *BioTechnologia*, *98*(1), 41–51. <http://doi.org/10.5114/bta.2017.66616>.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Daftar Singkatan



ABA	<i>Absciscic acid</i>
ALG	Acuan label gizi
Balitkabi	Balai Penelitian Tanaman Aneka Kacang dan Umbi
BAP	<i>Benzyl Amino Purine</i>
BCH	<i>beta-Hydroxylases</i>
CATAS	Chinese Academy of Tropical Agricultural Science
CGIAR	Consultative Group on International Agricultural Research
CIAT	<i>Centro Internacional de Agricultura Tropical</i>
CRTISO	<i>Carotenoid isomerase</i>
CTCRI	Central Tuber Crops Research Institute
DAD	<i>diode array detector</i>
DMAPP	<i>dimethylallyl diphosphate</i>
DMC	<i>dry matter content</i>
DXP	<i>deoxy-D-xylulose 5-phosphate</i>
DXR	<i>DXP reductoisomerase</i>
DXS	<i>DXP synthase</i>
EMBRAPA	Brazilian Agricultural Research Corporation
ESS	embrio somatik sekunder

FAD	<i>flavin adenine dinucleotide</i>
GGPP	<i>geranylgeranyl diphosphate</i>
GMMJBT	Genetika Molekuler dan Modifikasi Jalur Biosintesis Tanaman
HMG-CoA	Asetil-CoA ke 3-hidroksi-3-metil glutaryl CoA
HPLC	<i>High Performance Liquid Chromatography</i>
IITA	International Institute of Tropical Agriculture
IPP	<i>isopentenyl diphosphate</i>
IU	<i>International Unit</i>
LCYE	<i>lycopene-epsilon-cyclase</i>
LYCB	<i>lycopene-beta-cyclase</i>
MEP	<i>Methylerythritol 4-phosphate</i>
MVA	<i>Mevalonat acid</i>
NCED	<i>Nine-cis-epoxy-dioxygenase</i>
NCRI	Nigeria's National Root Crop Research Institute
POD	<i>peroxidase</i>
PDS	<i>phytoene desaturase</i>
PEG	<i>Polyethylene glycol</i>
PSY	<i>phytoene synthase</i>
QTL	<i>quantitative trait loci</i>
RAE	<i>Retinol Activity Equivalent</i>
RE	<i>Retinol Equivalent</i>
ROS	<i>reactive oxygen species</i>
SNP	<i>single nucleotide polymorphism</i>
SOD	<i>superoxide dismutase</i>
SSR	<i>simple sequence repeat</i>
TCC	<i>total carotenoid content</i>
TCRC	Tobacco Control and Research Cell
TDZ	Thidiazuron
USDA	United States Department of Agriculture
ZEP	<i>Zeaxanthin epoxidase</i>

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Glosarium



Alel	bentuk varian dari gen atau gen yang memiliki lokus (posisi pada kromosom) yang sama, tetapi memiliki sifat/bentuk yang bervariasi karena mutasi pada gen asli pada posisi kromosom yang sama.
Analisis proksimat	metode analisis kimia untuk mengidentifikasi kandungan nutrisi dari bahan pakan atau pangan, seperti protein, karbohidrat, lemak, dan serat pada suatu zat makanan.
Antioksidan	molekul yang mampu memperlambat atau mencegah proses oksidasi molekul lain. Oksidasi adalah reaksi kimia yang dapat menghasilkan radikal bebas sehingga memicu reaksi berantai yang dapat merusak sel.
Apokarotenoid	senyawa organik yang diperoleh dari karotenoid melalui pemotongan situs oksidasi yang dikatalisis oleh <i>carotenoid oxygenases</i> .

Beta karoten	pigmen berwarna dominan merah-jingga yang ditemukan secara alami pada tumbuhan dan buah-buahan; senyawa organik dari golongan isoterpenoid yang disintesis dari <i>geranylgeranyl pyrophosphate</i> ; senyawa yang dicirikan dengan dua cincin beta pada ujung molekulnya.
Biodiversitas	keanekaragaman organisme yang menunjukkan keseluruhan variasi gen, jenis, dan ekosistem pada suatu daerah.
Biofortifikasi	Peningkatan kandungan nutrisi pada tanaman melalui metode konvensional ataupun melalui penerapan bioteknologi.
<i>Biolistic</i>	metode untuk pengiriman asam nukleat ke sel dengan pemboman partikel berkecepatan tinggi
Bioreaktor	peralatan atau sistem yang mampu menyediakan sebuah lingkungan biologis terkontrol yang dapat menunjang untuk pertumbuhan mikroorganisme atau tempat terjadinya reaksi biokimia dari bahan mentah yang melibatkan mikroorganisme menjadi bahan yang dikehendaki.
Biosintesis	suatu proses sintesis yang terjadi dalam organisme hidup, substratnya umumnya terdiri atas beberapa tahap, dan produk dari satu tahap akan menjadi substrat bagi tahap berikutnya.
<i>Celiac disease</i>	penyakit autoimun yang terjadi akibat mengonsumsi gluten.
Delesi	kehilangan pasangan nukleotida pada gen disebabkan oleh mutasi.
Diploid	individu yang memiliki sel dengan dua set genom.
Dosis letal	pemancaran dan kerambatan gelombang yang membawa tenaga melalui ruang atau zantara,



	misalnya, pemancaran dan perambatan gelombang elektromagnetik, gelombang bunyi, gelombang lenting, dan penyinaran.
Eksplan	bagian dari tanaman yang dijadikan sumber perbanyakan secara <i>in vitro</i> atau kultur jaringan, seperti tunas, akar, biji, dan bunga.
Ekspresi gen	rangkaian proses penggunaan informasi dari suatu gen untuk sintesis produk gen fungsional
Elektroforasi	penggunaan kejutan listrik untuk memperbesar pori-pori membran sel sehingga dapat meningkatkan permeabilitas membran.
Embriogenesis somatik	proses saat sel somatik (baik haploid maupun diploid) berkembang membentuk tanaman baru melalui tahap perkembangan seperti embrio zigotik tanpa melalui fusi gamet.
Enzim restriksi	enzim yang memotong molekul DNA.
Epigenetik	studi tentang perubahan fenotip atau ekspresi genetika yang disebabkan oleh mekanisme selain perubahan sekuens DNA dasar.
Epoksidasi	reaksi oksidasi ikatan rangkap oleh oksigen aktif membentuk senyawa epoksida.
Etioplas	Kloroplas yang tidak terkena sinar matahari.
Fitokimia	segala jenis zat kimia atau nutrien yang diturunkan dari sumber tumbuhan, termasuk sayuran dan buah-buahan.
Flavin	gugus senyawa organik berbasis pteridina, yang dibentuk oleh isoaloksazin heterosiklis trisiklik. Sumber biokimianya adalah vitamin riboflavin
Fortifikasi	proses penambahan mikronutrien (vitamin dan unsur renik esensial) pada makanan.
Fusi protoplas	metode hibridisasi tanaman menggunakan protoplas dari spesies tanaman yang sama atau dari spesies yang berbeda.

Genom	keseluruhan informasi genetik yang dimiliki suatu sel atau organisme, atau khususnya keseluruhan asam nukleat yang memuat informasi tersebut.
<i>Genome editing</i>	adalah salah satu bentuk rekayasa genetik berupa penyisipan, penggantian, atau pembuangan (sebagian) DNA pada genom suatu organisme hidup dengan menggunakan enzim-enzim nuklease yang sudah direkayasa untuk memotong dan menyambungkannya.
Genotip	istilah yang dipakai untuk menyatakan keadaan genetik dari suatu individu atau sekumpulan individu populasi. Genotip dapat merujuk pada keadaan genetik suatu lokus maupun keseluruhan bahan genetik yang dibawa oleh kromosom (genom). Genotip dapat berupa homozigot atau heterozigot.
<i>Grafting</i>	menggabungkan dua bagian tanaman (organ dan jaringannya) yang masih hidup sedemikian rupa sehingga keduanya dapat tumbuh menjadi satu tanaman yang utuh yang memiliki sifat kombinasi antara dua organ atau jaringan yang digabungkan tadi.
<i>Gray (Gy)</i>	satuan yang digunakan untuk mengukur dosis radiasi.
<i>In vitro</i>	kultur suatu sel, jaringan, atau bagian organ tertentu secara aseptik di dalam laboratorium.
Indeks glikemik	angka yang menunjukkan potensi peningkatan gula darah dari karbohidrat yang tersedia pada suatu pangan atau secara sederhana dapat dikatakan sebagai tingkatan atau peringkat pangan menurut efeknya terhadap kadar glukosa darah.



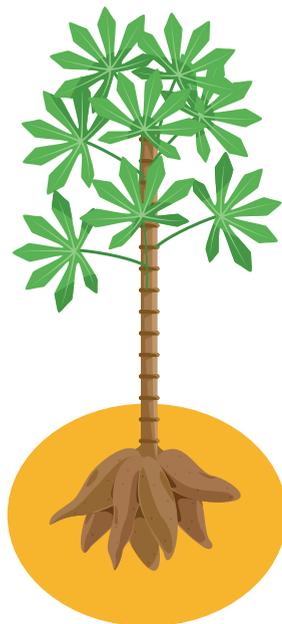
Induksi tunas majemuk	merangsang pertumbuhan tunas baru lebih dari satu dari kecambah, bakal tunas, atau organ lain dalam media kultur <i>in vitro</i> .
Kalus	sekumpulan sel amorphous (tidak berbentuk atau belum terdiferensiasi) yang terbentuk dari sel-sel yang membelah terus-menerus secara <i>in vitro</i> atau di dalam tabung.
Kalus embriogenik	Kumpulan sel-sel yang lebih terstruktur dengan tahapan menyerupai embrio zigotik, tetapi dari jaringan somatik.
Karotenoid	pigmen organik dalam kloroplas dan kromoplas tumbuhan dan kelompok organisme lain, seperti alga, sejumlah bakteri fotosintetis maupun tidak dan beberapa fungi (non-fotosintetis).
Kultur Jaringan tanaman	metode pembiakan (perbanyak) dengan cara mengisolasi bagian dari tanaman, seperti sekelompok sel, jaringan, atau organ yang ditumbuhkan dalam kondisi aseptik.
Marker	penanda dalam proses seleksi terkait sifat tanaman yang ingin diseleksi dan juga merupakan alat untuk menduga dan membantu seleksi fenotip sifat yang menjadi target pemuliaan.
Metilasi DNA	peristiwa penambahan gugus metil pada atom C nomor 5 dari cincin pirimidina sitosina atau nitrogen nomor 6 dari cincin purina adenina sebagai bagian dari molekul DNA.
Mikropropagasi	perbanyak galur tanaman yang terpilih melalui teknik kultur jaringan.
Mocaf	tepung berbahan baku singkong atau ubi kayu yang dimodifikasi dengan teknik fermentasi menggunakan mikroorganisme.

Morfogenesis	proses pertumbuhan dan diferensial sel-sel individu menjadi jaringan, kemudian menjadi organ dan akhirnya menjadi organisme.
Morfologi	ilmu yang mengkaji berbagai organ tumbuhan, baik bagian-bagian, bentuk maupun fungsinya.
Multiplikasi	tindakan atau proses memperbanyak.
Mutagen	sesuatu yang menjadi sebab (misalnya zat kimia, cahaya, gas, virus) terjadinya mutasi.
Mutagenesis	zat penyebab terjadinya mutasi.
Mutagenesis	proses terjadinya peristiwa mutasi.
Mutan	organisme yang mengalami perubahan genetik akibat mutasi.
Mutasi	perubahan informasi genetik akibat perubahan pada urutan basa nukleotida pada taraf tingkatan gen maupun pada tingkat kromosom.
<i>Off type</i>	benih atau tanaman yang mempunyai satu atau lebih karakteristik menyimpang berbeda dari kultivar asalnya dapat berupa warna bunga, tinggi dan bentuk, benih termasuk yang dihasilkan dari penyerbukan silang.
Pangan fungsional	makanan dan bahan pangan yang dapat memberikan manfaat tambahan di samping fungsi gizi dasar pangan tersebut.
<i>Particle bombardment</i>	metode fisik dalam bentuk penembakan partikel untuk memasukkan /transfer DNA asing pada proses transformasi tanaman.
Pati	polisakarida yang mengandung amilosa dan amilopektin.
Petiol	tangkai daun.
<i>Phytoene synthase</i>	enzim transferase yang terlibat dalam biosintesis karotenoid.

<i>Phytohormone</i>	sekumpulan senyawa organik bukan hara (nutrien), baik yang terbentuk secara alami maupun dibuat oleh manusia, yang dalam kadar sangat kecil mampu mendorong, menghambat, atau mengubah pertumbuhan, perkembangan, dan pergerakan (taksis) tumbuhan.
<i>Planlet</i>	tanaman lengkap (memiliki daun, batang, dan akar) untuk memperbanyak hasil perkembangan kalus atau proliferasi tunas secara <i>in vitro</i> .
Promotor	urutan DNA spesifik yang berperan dalam mengendalikan transkripsi <i>gen</i> struktural dan terletak di daerah <i>upstream</i> <i>gen</i> .
Propagasi	perbanyak tanaman.
Proteomik	kajian secara molekuler terhadap keseluruhan protein yang dihasilkan dari ekspresi <i>gen</i> di dalam sel, terutama mengenai struktur dan fungsinya.
Radiasi	pemancaran dan kerambatan gelombang yang membawa tenaga melalui ruang atau antara, misalnya, pemancaran dan perambatan gelombang elektromagnetik, gelombang bunyi, gelombang lenting, dan penyinaran
Rekayasa genetika	aplikasi bioteknologi yang dapat meliputi manipulasi <i>gen</i> , kloning <i>gen</i> , DNA rekombinan, teknologi modifikasi genetika, dan genetika modern dengan menggunakan berbagai macam prosedur.
ROS	kependekan dari spesi oksigen reaktif (<i>reactive oxygen species</i>), yaitu senyawa organik yang memiliki gugus fungsional dengan atom oksigen yang bermuatan elektron lebih.
Spesies	individu yang mempunyai persamaan secara morfologis, anatomis, fisiologis, dan mampu saling kawin dengan sesamanya (interhibridisasi)

	yang menghasilkan keturunan yang fertil (subur) untuk melanjutkan generasinya.
<i>Starter</i>	media berisi mikroba tertentu dan digunakan untuk memacu tumbuhnya mikroba; <i>starter</i> merupakan media berisi mikroba tertentu dan digunakan untuk memacu tumbuhnya mikroba.
Sterilisasi	pemusnahan atau eliminasi semua mikroorganisme, termasuk spora bakteri, yang sangat resisten.
Stres oksidatif	suatu kondisi yang terjadi karena adanya ketidakseimbangan antara produksi radikal bebas dengan sistem pertahanan antioksidan.
Superoksida	senyawa yang memiliki anion superoksida dengan rumus kimia O_2^- .
Tekanan osmosis	tekanan yang diperlukan untuk menghentikan osmosis, yaitu gerakan molekul pelarut melewati membran semipermeabel ke larutan yang lebih pekat.
Totipotensi	kemampuan suatu sel untuk dapat memperbanyak diri dalam seluruh kemungkinan perkembangan yang ada.
Transkriptomik	bagian dari biologi molekuler yang mengkaji tentang produk transkripsi secara keseluruhan (transkriptom).
Vitamin A	vitamin larut dalam lemak yang berperan penting dalam pembentukan sistem penglihatan yang baik, yang terdiri dari beberapa senyawa, di antaranya retinol, retinil, plamitat, dan retinil asetat.

Indeks



- ABA, 17, 25, 26, 100, 103, 106–08, 173
- Adaptasi, 3, 80, 81
- Agrobacterium, 84, 87–91, 93, 104, 144
- Aktivitas, 5, 11, 18, 24, 27, 65, 91, 93, 98, 101, 103, 105, 112, 113, 118, 192
- Akumulasi, 17–20, 26, 65, 69, 77, 78, 84, 93, 103, 108
- Aldehida, 34, 35
- Alel, 26, 80
- Alfa karoten, 5, 15, 25, 30, 36, 101, 102, 104, 112
- ALG, 40, 173
- Amiloplas, 18, 19
- Analisis proksimat, 131
- Antioksidan, 5, 6, 17, 18, 113, 126, 135, 163, 182
- Apokarotenoid, 15, 21, 121
- Asetosiringon, 88, 90
- Asupan, 3, 4, 52, 82, 111, 112, 117, 121
- Auksin, 62
- Autis, 127
- BASF, 34, 35, 36
- Beta karoten, 5, 6, 8–13, 15–17, 20, 21, 25, 26, 29–37, 39, 40, 42–4, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 56, 59, 60, 62, 65, 66, 67, 68, 69, 72, 74, 78, 81, 82, 84, 85, 86, 93, 94, 95, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 111, 112, 113, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 123, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 154, 189, 192
- Beta karoten ketolase, 20
- Beta ring, 25, 101, 102
- Bibit, 8, 9, 10, 11, 13, 40, 41, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 58, 59, 60, 61, 62, 65, 66, 72, 73, 77, 78, 141
- Bioaksesibilitas, 11, 13, 111, 118, 119, 120, 123, 143
- bioaktivitas, 9, 12, 13, 111, 143
- bioavailabilitas, 111, 121
- biofortifikasi, 39, 40, 50, 68, 82

biolistic, 87
 bioreaktor, 62, 65
 breeding, 10, 69, 70, 160, 171

celliac, 127
 cis-, 30, 31, 81, 100, 160
 coding, 76
 colchicin, 75
 cork borer, 82
 crown gall, 88, 89
 CrtO, 20

daya hasil, 43, 50, 51, 52, 56, 57
 dehalogenisasi, 35
 delesi, 70, 71, 76, 104
 desaturasi, 24, 99, 100
 destilasi, 35
 diphosphate, 22, 95, 98, 173, 174
 diploid, 61, 177
 distal, 81
 down-regulasi, 86, 103, 104, 105
 DXP synthase, 23, 95, 173

eksplan, 58, 59, 61, 62, 65, 77, 78
 ekspresi, 26, 27, 28, 41, 65, 70, 86,
 91, 93, 96, 98, 100, 103, 106,
 112, 116, 177, 181, 191
 elektromagnetik, 73, 177, 181
 elektroporasi, 87
 embriogenesis, 10, 58, 61, 62
 embrio somatik, 61, 62, 65, 154,
 173
 enol, 34
 enzim, 21, 23, 24, 25, 65, 86, 89, 91,
 93, 94, 95, 96, 98, 100, 101,
 102, 103, 105, 106, 108, 111,
 112, 117, 118, 178, 180
 enzim restriksi, 86, 91
 epigenetik, 76, 78

epoksidasi, 102, 106
 etioplas, 18
 Euphorbiaceae, 97, 99, 106

fenolik, 5, 88, 90
 fisiologis, 4, 5, 11, 12, 16, 17, 77, 78,
 100, 108, 138, 139, 181
 fitokimia, 2, 5, 75, 167
 flavin, 24, 174
 flavonoid, 5
 fotosintesis, 15, 16, 17, 24, 25, 27,
 34, 95
 fragmen, 68, 86, 89, 91, 156
 fungsional, xv, xvii, 1, 2, 3, 4, 5, 6,
 9, 10, 11, 12, 13, 40, 44, 123,
 124, 126, 127, 135, 137, 138,
 139, 140, 141, 142, 143, 144,
 145, 146, 149, 160, 163, 177,
 180, 181
 fusi protoplas, 75

gamma karoten, 5, 15, 36
 gaplek, 39, 125, 126
 genetik, 10, 11, 13, 26, 27, 40, 41,
 58, 65, 67, 68, 70, 71, 72, 73,
 75, 76, 77, 78, 80, 81, 83, 84,
 85, 86, 87, 93, 106, 137, 160,
 178, 180, 181
 genom, 26, 65, 70, 80, 86, 87, 88,
 90, 91, 93, 96, 97, 99, 101,
 102, 103, 104, 105, 176, 178
 genome editing, 93, 103, 104, 144
 genotip, 6, 29, 30, 31, 40, 41, 43, 50,
 52, 53, 54, 59, 60, 61, 62, 70,
 93, 140, 154, 156
 gizi, 4, 5, 12, 29, 40, 52, 68, 125,
 127, 128, 134, 138, 140, 173,
 180
 globular, 62



grafting, 56, 57
 Gresshoff dan Doy, 61, 65

haploid, 61, 177
 hibridisasi, 67, 83, 177
 hidrokarbon, 15, 98
 hidroksilasi, 102, 106
 HPLC, 20, 30, 33, 34, 42, 167, 174

indeks glikemik, 4, 10
 induksi, 9, 11, 25, 44, 59, 60, 61, 62, 68, 73, 74, 76, 88, 144, 159
 inkompatibilitas, 80, 83
 insersi, 70, 71, 76, 104
 in silico, 26
 ion channel, 108
 isomer, 22, 24, 31
 isopentenyl, 22, 174
 isoprena, 5, 16, 22, 95

kalus remah, 61, 62
 karotenogenesis, 21, 26, 28
 karotenoid, 5, 6, 10, 13, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 36, 40, 41, 42, 43, 50, 51, 69, 81, 84, 94, 95, 96, 98, 100, 101, 102, 103, 104, 106, 108, 111, 112, 113, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 135, 175, 180
 katalisis, 25
 keanekaragaman, 18, 25, 67, 70, 72, 73, 75, 80, 81, 84, 124, 134, 138, 150, 176
 klon, 29, 30, 51, 140, 142, 167
 klorinasi, 35
 kloroplas, 18, 19, 20, 23, 87, 95, 96, 108, 179
 kofaktor, 24

kognitif, 113
 koleksi, 9, 31, 40, 41, 42, 47, 48, 55, 69, 147, 192
 konsumen, 50, 51, 138
 konvensional, 9, 10, 11, 50, 66, 67, 68, 69, 71, 72, 77, 83, 176
 kotiledon, 62, 65
 kriptoksantin, 5, 15, 30, 102, 112
 kromoplas, 18, 19, 20, 179
 kuliner, 2, 3, 134
 kultivar, 27, 30, 31, 46, 69, 87, 180
 kultur jaringan, 10, 11, 58, 59, 62, 65, 76, 77, 78, 86, 93, 141, 169, 177, 179

landrace, 20
 lansia, 4, 140
 ligase, 86, 91
 likopen, 5, 15, 17, 24, 25, 27, 30, 31, 99, 100, 101, 102, 104, 118, 120
 liposoluble, 16
 lokus, 69, 175, 178

marka molekuler, 9, 70, 81
 marker assisted, 70
 media, 58, 59, 60, 61, 62, 65, 66, 88, 154, 179, 182
 metabolisme, 16, 19, 25, 103, 111, 112, 120, 121, 143
 metabolit sekunder, 16, 29, 65, 88
 metilasi DNA, 76
 mevalonat, 21, 23
 mikronutrien, 10, 58, 68, 82, 83, 117, 144, 177
 mocaf, xv, 8, 10, 12, 43, 44, 45, 59, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 137, 140, 141, 143, 145,

- 192, 193
- modifikasi, 10, 27, 68, 80, 106, 181, 193
- molekuler, 9, 68, 70, 75, 81, 88, 106, 108, 119, 142, 181, 182, 190, 191, 192, 193
- morfogenesis, 76, 112
- morfologi, 27, 62, 70, 73, 76, 78, 167, 192
- multiplikasi, 58, 59, 77
- Murashige dan Skoog, 61
- mutagen, 73, 75, 76
- mutasi, 9, 11, 68, 69, 70, 72, 73, 74, 75, 76, 78, 103, 104, 144, 153, 159, 175, 176, 180
- noncoding, 76
- nutrisi, xvii, 2, 4, 5, 9, 10, 11, 16, 30, 31, 40, 44, 50, 52, 68, 84, 111, 121, 138, 139, 143, 156, 175, 176
- overekspresi, 70, 95, 96, 103
- pangan, xv, xvii, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 29, 39, 40, 43, 44, 46, 58, 68, 72, 80, 82, 83, 111, 117, 118, 119, 120, 121, 123, 124, 125, 126, 127, 132, 133, 134, 135, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 167, 175, 178, 180
- pangan fungsional, xv, xvii, 1, 2, 4, 5, 6, 9, 10, 11, 12, 13, 40, 44, 123, 124, 126, 127, 135, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146
- pangan olahan, 8, 12, 123, 124, 126, 132, 134, 135
- parenkim, 29, 30
- pascapanen, 9, 11, 12, 100, 108, 138, 146, 192
- patatin, 84
- pati, 19, 29, 43, 45, 46, 50, 51, 82, 84, 109, 117
- penguapan, 108
- penyerapan, 108, 111, 112, 117, 118, 120, 121, 122, 144
- persilangan, 27, 40, 50, 51, 67, 69, 72, 80, 81, 83
- phosgene, 35
- phytoene synthase, 24, 25, 26, 65, 70, 84, 96, 98, 165, 169, 170, 174
- phytohormone, 95, 193
- pigmen, 16, 18, 19, 25, 117, 176, 179
- pikloram, 61, 62, 76, 154
- planlet, 11, 58, 65, 77
- PlantCARE, 26
- PlantPAN, 26
- PlantTFDB, 26
- plasebo, 113
- plasma nutfah, 3, 39, 40, 42, 44, 49, 51, 81, 84, 138, 192
- plastid, 18, 19, 20, 23, 26, 158
- poliena, 34, 35
- polimorfisme, 26, 27, 70
- populasi superior, 70
- preferensi, 50, 140
- prekursor, xv, xvii, xviii, 19, 21, 23, 26, 30, 34, 68, 96, 98, 106, 112, 117
- proksimal, 81
- promotor, 26
- propagasi, 58, 60, 66, 70, 77
- proplastid, 18
- protoplas, 11, 75, 87, 177



provitamin A, 15, 27, 29, 31, 69,
 112, 120, 139, 149, 168

QTL, 69, 152, 174

query, 97, 98, 101, 105

radiasi, 9, 11, 68, 69, 72, 73, 74, 75,
 144, 146, 169, 178

radikal bebas, 5, 6, 113, 116, 135,
 175, 182

RAE, 112, 174

RE, 112, 122, 174

regenerasi, 58, 60, 61, 86

regulasi, 23, 25, 26, 28, 86, 103, 104,
 105, 124, 191

rekombinan, 27, 181

restriksi, 86, 91, 177

retina, 35, 113

retinol, 112, 114, 182

rodopsin, 113

rootstock, 56

ROS, 113, 174, 181

scion, 56

sekuens, 73, 84, 89, 97, 99, 101, 102,
 103, 104, 105, 177

seleksi, 9, 11, 50, 51, 73, 80, 81, 93,
 125, 140, 141, 144, 171, 179

seluler, 80, 83

sensori, 5, 11, 130, 131

sinar gamma, 9, 11, 68, 72, 73, 74,
 75, 153, 159, 169

sintesis, 20, 21, 23, 26, 34, 36, 96,
 100, 104, 106, 176, 177

sitokinin, 59, 62

SNP, 98, 174

somatik, 10, 58, 60, 61, 62, 65, 75,
 77, 78, 154, 173, 177, 179

SSR, 69, 174

stek mini, 53, 54

stimulus, 26, 27

stomata, 108

stroma, 23

sumber daya hayati, 9, 10, 138

tanin, 5

tapioka, 39, 125, 127

T-DNA, 89, 90, 91, 93

tepung, 4, 10, 11, 39, 43, 45, 124,
 125, 126, 127, 130, 131, 133,
 134, 135, 137, 179

terpenoid, 15, 23

tilakoid, 20

totipotensi, 58, 84

trans, 21, 24, 28, 30, 31, 40, 47, 81,
 84, 100, 108, 160, 171

transfer, 8, 24, 71, 83, 89, 90, 91,
 180

transformasi, 24, 65, 83, 86, 87, 88,
 91, 93, 144, 180

transgenik, 65, 84, 85, 86, 87, 88, 91

transkripsi, 25, 26, 90, 103, 181, 182

transposon, 84

triacylglycerol, 109

tubular, 158

tumefaciens, 87, 88, 89, 90, 91

tunas aksiler, 10

tunas majemuk, 59, 60, 154, 179

ubi kayu, xv, xvii, xviii, 2, 3, 6, 8,
 9, 10, 11, 12, 13, 16, 17, 19,
 20, 26, 27, 29, 30, 31, 32, 39,
 40, 41, 42, 43, 44, 46, 49, 50,
 51, 52, 53, 54, 55, 56, 58, 59,
 60, 61, 62, 65, 66, 67, 68, 69,
 72, 73, 74, 75, 77, 81, 82, 83,
 85, 86, 88, 93, 95, 97, 98, 99,
 100, 101, 102, 103, 104, 105,

106, 108, 121, 123, 124, 125,
 126, 127, 130, 131, 132, 134,
 137, 139, 140, 141, 142, 143,
 144, 145, 146, 147, 154, 156,
 167, 179, 189, 190, 192, 193
 uji multilokasi, 66, 140
 umbi, xv, 2, 6, 10, 12, 13, 17, 19,
 20, 27, 29, 30, 31, 39, 40, 41,
 42, 46, 49, 50, 52, 56, 57, 60,
 62, 65, 66, 67, 68, 78, 81, 82,
 83, 84, 95, 96, 100, 103, 104,
 108, 121, 124, 125, 126, 132,
 133, 134, 135, 137, 156, 193
 UMKM, 8, 10, 126, 127, 128, 132,
 133, 134, 137, 142, 143

 variasi, 16, 29, 31, 40, 47, 62, 67, 70,
 73, 76, 77, 78, 80, 121, 134,
 154, 167, 171, 176
 variasi somaklonal, 62, 76, 77, 167,
 171
 varietas, 40, 41, 44, 46, 48, 49, 51,
 52, 53, 54, 55, 65, 66, 67, 68,
 69, 73, 78, 81, 82, 125, 138,
 140, 141, 144, 150
 vektor, 87, 91, 93
 virulensi, 89, 90
 viskositas, 125
 vitamin A, xv, xvii, xviii, 5, 6, 15,
 30, 34, 48, 68, 81, 82, 102,
 103, 112, 116, 117, 120, 135,
 153, 157, 168

 Wittig, 34, 35

 xantofil, 5, 15, 16, 19, 21, 25, 26,
 30, 36

 zeaksantin, 5, 15, 102, 103, 104,

105, 106
 zigotik, 61, 62, 177, 179
 ZPT, 59, 60, 75, 76

Biografi Penulis



Enny Sudarmonowati bekerja di LIPI sejak Maret 1986 sebagai peneliti hingga profesor di Pusat Penelitian Bioteknologi (Laboratorium Genetika Molekuler dan Modifikasi Jalur Biosintesis Tanaman) hingga saat ini setelah lulus dari IPB Fakultas Pertanian tahun 1985. Memperoleh gelar doktor (Ph.D.) dari University of Bath, Inggris, pada Januari 1991. Melakukan penelitian ubi kayu sejak tahun 1987 dan telah menghasilkan dua Perlindungan Varietas Tanaman (PVT) ubi kayu bersama tim dan menerima Satya Lancana Wira Karya dari Presiden Republik Indonesia karena peran dalam menghasilkan ubi kayu unggul mengandung beta karoten tinggi. Penghargaan lain yang pernah diterima terkait kepemimpinan dan kepekaan, yaitu Best Women International dan 100 Peneliti Perempuan Terbaik Indonesia (Menteri Pemberdayaan Perempuan dan Perlindungan Anak dan Menteri Riset dan Teknologi). Publikasi ilmiah hingga saat ini berjumlah 204 dan dua paten, serta tiga paten terdaftar. Beberapa buku termasuk terkait ubi kayu dan tanaman kehutanan telah dihasilkan serta publikasi semi-ilmiah di majalah dan surat kabar. Penulis berpengalaman sebagai koordinator

Buku ini tidak diperjualbelikan.

penelitian berbagai topik penelitian dalam dan luar negeri dengan pendanaan swasta dan internasional; sebagai pembimbing mahasiswa S2 dan S3 di perguruan tinggi Indonesia, Belanda, Inggris dan Swiss; sebagai penelaah dan juri kompetisi ilmiah dalam dan luar negeri; serta menduduki jabatan struktural sejak 1992 di LIPI hingga terakhir sebagai Deputy Kepala LIPI Bidang Ilmu Pengetahuan Hayati (2014–2019). Tahun 2014–2019, sebagai Ketua Nasional Komite Man and Biosphere (MAB) Indonesia dan sebagai anggota Komisi Keamanan Hayati Indonesia dan pada tahun 2015–2018 menjadi Ketua Subkomisi Klirens Etik Penelitian Ilmu Pengetahuan Hayati di LIPI. Sejak 1996 hingga sekarang, menjadi anggota Global Tree Specialist, Species Survival Commission International Union of Conservation for Nature (IUCN), dan sebagai President Man and Biosphere International Coordinating Council (MAB ICC) UNESCO untuk periode 2018–2020. Penulis dapat dihubungi melalui surel: s_enny@hotmail.com; enny003@lipi.go.id

N. Sri Hartati adalah peneliti pada Pusat Penelitian Bioteknologi Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia. Biologi molekuler dan rekayasa genetika tanaman merupakan bidang kajian yang ditekuninya. Sejak awal bergabung sebagai peneliti pada tahun 1993 dan telah melakukan penelitian di bidang genetika molekuler tanaman. Selain itu, penelitian mengenai ubi kayu dengan pendekatan molekuler telah ditekuni sejak tahun 2002. Aktivitas akademisnya yang lain adalah sebagai editor jurnal ilmiah di lingkungan Puslit Bioteknologi dan mitra bestari pada beberapa jurnal. Penulis menyelesaikan pendidikan S-1 di Program Studi Kimia Institut Teknologi Sepuluh November pada tahun 1992. Pendidikan Pascasarjana pada Program Studi Bioteknologi Institut Pertanian Bogor diselesaikannya pada tahun 2002 dan gelar doktor pada program studi biologi diraih pada tahun 2011 dari universitas yang sama. Penulis dapat dihubungi melalui surel: hartati12@yahoo.com.





Siti Kurniawati bergabung di Pusat Penelitian Bioteknologi LIPI sejak tahun 2000 pada kerja sama riset bidang mikrobiologi, khususnya mikroba endofit. Kemudian, penulis bergabung sebagai peneliti di Laboratorium Genetika Molekuler dan Modifikasi Jalur Biosintesis Tanaman Pusat Penelitian Bioteknologi LIPI pada tahun 2009. Gelar master diraih dari Program Studi Pemuliaan dan Bioteknologi Tanaman Institut Pertanian Bogor tahun 2013. Penulis

sangat tertarik pada bidang penelitian genetika molekuler pada tanaman, khususnya berkaitan dengan *climate change*. Penulis dapat dihubungi melalui surel: kurniawatie@gmail.com.

Wahyuni adalah seorang peneliti di Pusat Penelitian Bioteknologi Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia yang berada di Kawasan Cibinong Science-Botanic Garden, Cibinong, Jawa Barat. Pendidikan tertinggi yang dimiliki adalah S-3 di bidang metabolomik dan genetika molekuler tanaman dari Wageningen University and Research Center, Wageningen, Belanda. Cakupan kajian penelitiannya saat ini adalah di bidang



profiling ekspresi gen dan regulasi molekuler jalur biosintesis tanaman yang menunjang perbaikan sifat tanaman. Beberapa publikasi internasional dan nasional, serta buku telah dihasilkan selama berkarier di LIPI. Selain publikasi, eksistensi penulis di bidang sains juga ditandai dengan beberapa penghargaan dan pendanaan riset nasional dan internasional, seperti SPIN-KNAW Anticipation Grants Indonesia-The Netherlands (ANGIN) 2020, L'ORÉAL-UNESCO for Women in Science National 2005, dan Penghargaan Publikasi Ilmiah Internasional LPDP 2016, Kementerian Keuangan RI. Penulis dapat dihubungi melalui surel: wahy003@lipi.go.id.



Hartati merupakan seorang peneliti di Puslit Bioteknologi LIPI. Penulis menyelesaikan program S-1 kimia di Universitas Sumatera Utara pada tahun 2001 dan program S-2 biokimia di Institut Pertanian Bogor pada tahun 2007. Penulis bergabung di Puslit Bioteknologi LIPI mulai tahun 2001 dan berkontribusi dalam penelitian yang terkait dengan tanaman ubi kayu, sengon, dan Solanaceae. Bidang keahlian penulis terkait dengan bioteknologi tanaman.

Penulis bertanggung jawab atas koleksi dan pengembangan plasma nutfah ubi kayu di Puslit Bioteknologi LIPI. Untuk itu, penulis melakukan aktivitas penelitian terkait dengan karakterisasi berbasis data morfologi dan molekuler, dan tengah mengembangkan identifikasi plasma nutfah berbasis sistem *marker*. Penulis juga banyak melakukan penelitian terkait pengembangan pascapanen ubi kayu, terutama terkait pengembangan mocaf kaya beta karoten. Penulis dapat dihubungi melalui surel: tatiktikta@yahoo.com.

Ahmad Fathoni, lahir di Boyolali pada 17 Juli 1983. Saat ini, penulis adalah Peneliti Ahli Madya Bidang Bioteknologi Tanaman Pusat Penelitian Bioteknologi LIPI. Penulis menyelesaikan studi S-1 kimia (S.Si.) pada tahun 2005 di Jurusan Kimia, FMIPA, Universitas Diponegoro, Semarang. Pada tahun 2010, memperoleh gelar master (S-2) bidang bioteknologi (M.Eng.) dari Department of Biotechnology, Pukyong National University, Busan, Korea Selatan melalui beasiswa dari The Korea Institute of Planning and Evaluation for Technology of Food, Agriculture, Forestry and Fisheries. Pada tahun 2013, memperoleh beasiswa Riset-Pro dari Kemenristek untuk melanjutkan studi doktor (S-3) bidang biologi



molekuler tanaman di Department of Biology and Biochemistry, University of Bath, Inggris dengan fokus riset identifikasi gen dan modifikasi jalur biosintesis pada ubi kayu terkait sifat daya simpan umbi setelah panen. Memperoleh gelar doktor (Ph.D.) pada tahun 2017 dengan judul tesis *The Role of Interconversion of Scopoletin and Scopolin in Cassava Postharvest Physiological Deterioration* (PPD). Selain itu, penulis juga melakukan penelitian dan pengembangan produk ubi kayu *modified cassava flour* (mocaf) sejak tahun 2012. Penulis dapat dihubungi melalui surel: ahmad.fathoni@bath.edu atau ahmad.fathoni@bioteknologi.lipi.go.id



Rikno Harmoko adalah peneliti pada Pusat Penelitian Bioteknologi Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia. Penulis menyelesaikan program S-1 Agronomi di Fakultas Pertanian, Universitas Jember. Gelar Master dan Ph.D diperoleh dari Gyeongsang National University, Republic of Korea dalam bidang Bioteknologi tanaman. Bidang kajian yang ia geluti meliputi *molecular biology*, *glycobiology*, *phytohormone*, dan *genetic engineering* pada tanaman. Beberapa publikasi ilmiah bertaraf internasional telah dihasilkan penulis selama berkarier di dunia riset. Penulis dapat dihubungi melalui surel: rikno.harmoko@lipi.go.id atau rknharmoko@gmail.com.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Pangan Fungsional Berbasis Ubi Kayu Kaya Beta Karoten

Ubi kayu sering kali dipandang sebelah mata dan belum banyak dilirik publik. Padahal kandungan beta karoten dalam ubi kayu sangat bermanfaat bagi tubuh manusia sehingga bisa menjadi sumber pangan fungsional.

Buku hasil penelitian dari tim Pusat Penelitian Bioteknologi LIPI ini sangat istimewa karena membahas beragam topik terkait ubi kayu secara komprehensif, mencakup keragaman plasma nutfah ubi kayu dan kandungan beta karoten, aktivitas dan bioavailabilitas beta karoten, perakitan bibit unggul kaya beta karoten dengan metode konvensional hingga teknologi DNA, serta pemanfaatannya untuk berbagai produk makan olahan. Selain itu, buku ini juga menampilkan informasi-informasi mutakhir, terutama terkait aspek biologi molekuler dan rekayasa genetika ubi kayu untuk meningkatkan kadar beta karoten. Oleh karena itu, buku ini dapat dijadikan acuan dan edukasi terkait beta karoten serta cara pengolahan produk berbasis ubi kayu agar kandungannya tidak menurun.



Diterbitkan oleh:
LIPI Press, anggota Ikapi
Gedung PDDI LIPI Lt. 6
Jln. Jend. Gatot Subroto 10, Jakarta Selatan 12710
Telp.: (021) 573 3465 | Whatsapp 0812 2228 485
E-mail: press@mail.lipi.go.id
Website: lipipress.lipi.go.id | penerbit.lipi.go.id

ISBN 978-602-496-171-8



9 786024 961718

Buku ini tidak