

BIOTEKNOLOGI DALAM PRODUKSI DAN REKAYASA BENIH UNGGUL



Bagus Herwibawa
Rina Puji Lestari
Adin Novitasari
Sakka Samudin
Rahmatun Nisful Maghfiroh
Ellok Dwi Sulichantini

Kacung Hariyono
Zahrotun Nafisah
Erlin Susilowati
Primadiyanti Arsela
Sundahri
Henny Diana Wati

Editor: Rika Miftakhul Jannah

BIOTEKNOLOGI DALAM PRODUKSI DAN REKAYASA BENIH UNGGUL

Penulis:

Bagus Herwibawa, Ph.D.
Prof. Ir. Kacung Hariyono, M.S., Ph.D.
Rina Puji Lestari, S.P., M.P.
Zahrotun Nafisah, M.Si.
Adin Novitasari, S.P., M.P.
Erlin Susilowati, S.P., M.Biotek.
Prof. Dr. Ir. Sakka Samudin, MP. IPM. Asean Eng
Primadiyanti Arsela, S.Hut., M.Si.
Rahmatun Nisful Maghfiroh, S.P., M.Si.
Ir. Sundahri, PGDip.Agr.Sc., M.P.
Dr. Ir. Ellok Dwi Sulichantini, M.Si.
Henny Diana Wati, SP., MP.

Editor:

Rika Miftakhul Jannah, S.P., M.Si.



Fanya Bintang Sejahtera

Bioteknologi dalam Produksi dan Rekayasa Benih Unggul

Oleh : Bagus Herwibawa; Kacung Hariyono; Rina Puji Lestari; Zahrotun Nafisah; Adin Novitasari; Erlin Susilowati; Sakka Samudin; Primadiyanti Arsela; Rahmatun Nisful Maghfiroh; Sundahri; Ellok Dwi Sulichantini; Henny Diana Wati.

© Hak cipta dilindungi undang-undang. Dilarang keras memperbanyak, memfotokopi dan mendistribusikan, sebagian atau seluruh isi buku tanpa izin tertulis dari penerbit.

Editor : Rika Miftakhul Jannah, S.P., M.Si.
Penyunting : apt. Ridha Putri Marhammah, S.Farm.
Desain Sampul dan Tata Letak : Fatimah Az Zahra, S.H.

Herwibawa, Bagus, dkk

Bioteknologi dalam Produksi dan Rekayasa Benih Unggul, -cet. 1.
Padang: Fanya Bintang Sejahtera, 2025, 284 hlm.
ISBN 978-634-04-6141-1

Diterbitkan oleh :

Fanya Bintang Sejahtera

Anggota IKAPI No. 072/SBA/2025

Jl. Pasir Sebelah No. 30, Pasir Nan Tigo, Koto Tengah, Kota Padang,
Sumatera Barat

Email: fanyapublishing@gmail.com

Website: www.fanyapublishing.com

Cetakan Pertama, 2025

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya, sehingga buku "Bioteknologi dalam Produksi dan Rekayasa Benih Unggul" dapat diselesaikan dengan lancar. Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan arahan, bantuan, serta motivasi dalam proses penyusunan buku ini.

Buku ini membahas dasar-dasar bioteknologi dan genetika, teknik kultur jaringan, rekayasa DNA, penggunaan marka molekuler, teknologi penyuntingan gen seperti CRISPR, hingga produksi benih transgenik dan hibrida. Selain itu, buku ini menguraikan peran bioteknologi dalam meningkatkan ketahanan tanaman terhadap cekaman biotik dan abiotik, meningkatkan nilai gizi benih melalui biofortifikasi, serta standar produksi benih berbasis bioteknologi dalam industri. Di bagian akhir, dipaparkan pula dampak bioteknologi terhadap keberlanjutan pertanian, etika, dan prospek masa depan teknologi perbenihan.

Kami berharap buku ini dapat menjadi sumber referensi yang bermanfaat bagi mahasiswa, peneliti, praktisi pertanian, serta masyarakat umum yang tertarik pada inovasi bioteknologi dalam pengembangan benih unggul. Semoga hadirnya buku ini dapat turut mendukung kemajuan ilmu pengetahuan serta pembangunan pertanian yang modern dan berkelanjutan.

Padang, November 2025
Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL	vii
BAB 1 PENDAHULUAN BIOTEKNOLOGI DAN BENIH	
UNGGUL	1
1.1 Definisi dan Ruang Lingkup Bioteknologi.....	1
1.2 Konsep Benih Unggul dan Kriteria Mutunya.....	5
1.3 Peran Bioteknologi dalam Inovasi Pertanian.....	9
1.4 Sejarah Perkembangan Bioteknologi dalam Benih	13
1.5 Tantangan dan Prospek Masa Depan	17
DAFTAR PUSTAKA	21
BAB 2 DASAR GENETIKA DAN PEMULIAAN TANAMAN.....	23
2.1 Struktur dan Fungsi Gen.....	23
2.2 Pewarisan Sifat dan Hukum Mendel.....	25
2.3 Variabilitas Genetik dan Seleksi.....	27
2.4 Teknik Pemuliaan Konvensional.....	29
2.5 Integrasi Genetika Klasik dan Molekuler.....	32
DAFTAR PUSTAKA	35
BAB 3 KULTUR JARINGAN DALAM PRODUKSI BENIH	37
3.1 Prinsip Dasar Kultur Jaringan	37
3.2 Teknik Regenerasi Tanaman <i>In Vitro</i>	39
3.3 Aplikasi Kultur Jaringan dalam Perbanyakan Benih.....	41
3.4 Eliminasi Patogen dan Produksi Benih Sehat.....	44
3.5 Mikropropagasi dan Kloning Genetik	47
DAFTAR PUSTAKA	53
BAB 4 TEKNOLOGI DNA REKOMBINAN	55
4.1 Pendahuluan.....	55
4.2 Dasar-Dasar Teknologi DNA Rekombinan	56
4.3 Proses Rekayasa DNA Rekombinan.....	62
4.4 Sistem Transformasi <i>Agrobacterium tumefaciens</i>	67
4.6 Keamanan dan Etika Rekayasa Genetik	70
DAFTAR PUSTAKA	71
BAB 5 MARKA MOLEKULER UNTUK SELEKSI BENIH	73
5.1 Jenis-Jenis Marka Molekuler (RAPD, SSR, SNP)	73

5.2	Teknik PCR dan Deteksi Marka	76
5.3	<i>Marker Assisted Selection</i> (MAS)	79
5.4	Pemanfaatan Marka dalam Program Pemuliaan	81
5.5	Keuntungan Penggunaan Marka Molekuler	82
	DAFTAR PUSTAKA	84
BAB 6	TEKNOLOGI CRISPR DAN <i>GENE EDITING</i>	85
6.1	Prinsip Dasar CRISPR-Cas 9	85
6.2	Perbandingan dengan Teknologi <i>Gene Editing</i> Lain	90
6.3	Aplikasi CRISPR dalam Pengembangan Benih Unggul	94
	DAFTAR PUSTAKA	96
BAB 7	PRODUKSI BENIH TRANSGENIK	99
7.1	Konsep Tanaman Transgenik	99
7.2	Teknik Transformasi Genetik (<i>Agrobacterium</i> & Biolistik)	101
7.3	Karakteristik dan Seleksi Tanaman Transgenik	104
7.4	Keamanan Hayati dan Uji Lapangan	106
7.5	Contoh Aplikasi Transgenik pada Tanaman Komersial	108
	DAFTAR PUSTAKA	111
BAB 8	BIOTEKNOLOGI BENIH	119
8.1	Pendahuluan Umum	119
8.2	Cekaman pada Tanaman	121
8.3	Peran Bioteknologi dalam Meningkatkan Ketahanan Tanaman	125
8.4	Pendekatan Bioteknologi terhadap Cekaman Abiotik	130
8.5	Pendekatan Bioteknologi terhadap Cekaman Biotik	133
8.6	Peran Omics dalam Ketahanan Tanaman	137
8.7	Teknologi CRISPR-Cas dalam Peningkatan Ketahanan Tanaman	141
8.8	Implementasi Bioteknologi dalam Ketahanan Tanaman di Indonesia (Studi Kasus Kalimantan Timur)	145
8.9	Tantangan, Etika, dan Prospek Pengembangan Bioteknologi dalam Ketahanan Tanaman	149
8.10	Penutup	152
	DAFTAR PUSTAKA	154
BAB 9	PRODUKSI BENIH HIBRIDA SECARA BIOTEKNOLOGI	157
9.1	Dasar Genetik Benih Hibrida	158
9.2	Sistem Steril Jantan dan Restorasi Kesuburan	160
9.3	Pemanfaatan Marka untuk Identifikasi <i>Parental Line</i>	164
9.4	Bioteknologi dalam Sinkronisasi Pembungaan	166

DAFTAR PUSTAKA	168
BAB 10 BIOTEKNOLOGI UNTUK PENINGKATAN NILAI	
GIZI BENIH	171
10.1 Malnutrisi dan Peran Biofortifikasi	171
10.2 Teknik Penguatan Kandungan Gizi	176
10.3 Peningkatan Senyawa Bioaktif dan Antioksidan	181
10.4 Contoh Kasus: Golden Rice dan Biofortified Maize.....	183
10.5 Potensi dan Tantangan Biofortifikasi melalui Bioteknologi.....	185
DAFTAR PUSTAKA	187
BAB 11 MANAJEMEN PRODUKSI BENIH DI INDUSTRI	
BIOTEKNOLOGI BENIH	201
11.1 Tahapan Produksi Benih Berbasis Bioteknologi.....	201
11.2 <i>Good Manufacturing Practices</i> (GMP) dalam Produksi Benih Berbasis Bioteknologi	209
11.3 Standarisasi dan Kendali Mutu.....	216
DAFTAR PUSTAKA	230
BAB 12 DAMPAK BIOTEKNOLOGI TERHADAP	
KEBERLANJUTAN.....	235
12.1 Efisiensi Sumber Daya dalam Produksi Benih	237
12.2 Pengurangan Penggunaan Pestisida dan Input Sintetik	238
12.3 Konservasi Keanekaragaman Genetik.....	240
12.4 Aspek Sosial, Ekonomi, dan Etika	242
12.5 Strategi Mewujudkan Pertanian Berkelanjutan melalui Bioteknologi	244
DAFTAR PUSTAKA	246
GLOSARIUM	255
BIODATA PENULIS.....	260

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Mekanisme Kerja Gen.....	24
Gambar 2. Hukum Mendel I dan II.....	26
Gambar 3. Hubungan antara variabilitas genetik dan seleksi.....	29
Gambar 4. Proses Pemuliaan Konvensional	31
Gambar 5. Skema Integrasi genetika klasik dan molekuler.....	34
Gambar 6. Perlengkapan Alat untuk Kultur Jaringan Tanaman	38
Gambar 7. Skema Prosedur Kultur Jaringan Tanaman	39
Gambar 8. Skema Regenerasi dalam Kultur Jaringan Tanaman.....	41
Gambar 9. Proses Embrio Somatik secara Langsung dan Embrio Somatik Tidak Langsung Melalui Pembentukan Kalus.....	42
Gambar 10. Proses Tahapan Kultur Jaringan Menggunakan Biji	43
Gambar 11. Produksi dan Aplikasi Benih Sintetis.....	44
Gambar 12. Regenerasi Tanaman dan Deteksi Virus pada Bawang Putih. ..	46
Gambar 13. CRISPR/Cas9 untuk Penyuntingan Genom Tanaman	47
Gambar 14. Tahapan dalam Transformasi Genetik Tanaman	51
Gambar 15. Struktur Nukleotida (A) dan Basa Nitrogen (B)	57
Gambar 16. Dogma Sentral Biologi.....	58
Gambar 17. Jenis Pemotongan Enzim Restriksi.....	59
Gambar 18. Proses Rekayasa DNA	62
Gambar 19. Peta Plasmid Ti (pBI121).....	68
Gambar 20. Perbandingan seleksi secara konvensional dan melalui <i>Marker Assisted Selection</i>	80
Gambar 21. Prinsip dasar CRISPR-Cas9	86
Gambar 22. Tahap rekognisi CRISPR-Cas9.....	87
Gambar 23. Bentuk perubahan gen dengan CRISPR-Cas9	88
Gambar 24. Mekanisme kerja meganuklease.....	91
Gambar 25. Mekanisme kerja ZFN	92
Gambar 26. Mekanisme kerja TALEN	94
Gambar 27. Konsep CMS	161
Gambar 28. Diagram skematik pola genetic tiga galur CMS dan hibridanya pada Brassica napus serta identifikasinya dengan marka molekuler.	162
Gambar 29. Perbandingan antara bunga fertil dan steril pada cabai.....	163
Gambar 30. Fungsi PGPR.....	178
Gambar 31. Genom editing pada tanaman hortikultura.....	179
Gambar 32. Interaksi antara jamur endofit dan PGPR	183

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Struktur Gen.....	23
Tabel 2. Sumber Variabilitas Genetik	27
Tabel 3. Jenis-jenis seleksi:.....	28
Tabel 4. Teknik-Teknik Utama Pemuliaan Konvensional	30
Tabel 5. Kelebihan dan Kekurangan	32
Tabel 6. Pengertian Dasar.....	32
Tabel 7. Contoh bentuk integrasi:	33
Tabel 8. Contoh nyata integrasi:.....	34
Tabel 9. Kelebihan dan Kekurangan Teknik Mikropropagasi dan Kloning Genetik.....	50
Tabel 10. Enzim Restriksi.....	59
Tabel 11. Plasmid.....	61
Tabel 12. Komponen Utama PCR.....	64
Tabel 13. Komponen Plasmid Ti	68
Tabel 14. Tanaman Bt yang Pernah Ditemui	69
Tabel 15. Perbedaan beberapa teknologi genome editing	90
Tabel 16. Teknik penyuntingan genom dan penerapannya pada tanaman hortikultura.....	180
Tabel 17. Checklist Standarisasi dan QA/QC dalam Produksi Benih Bioteknologi.....	218

BAB 1

PENDAHULUAN BIOTEKNOLOGI DAN BENIH UNGGUL

Oleh: Bagus Herwibawa

1.1 Definisi dan Ruang Lingkup Bioteknologi

Bioteknologi merupakan salah satu bidang ilmu yang mengalami perkembangan paling pesat dalam sejarah sains modern, terutama sejak ditemukannya struktur DNA oleh Watson dan Crick pada tahun 1953. Secara etimologis, istilah bioteknologi berasal dari dua kata Yunani, *bios* yang berarti kehidupan dan *technologia* yang berarti penerapan ilmu untuk tujuan praktis. Dengan demikian, bioteknologi dapat diartikan sebagai penerapan ilmu pengetahuan terhadap sistem biologis, organisme hidup, atau komponen-komponennya untuk menghasilkan produk dan layanan yang bermanfaat bagi manusia dan lingkungan. Definisi ini kemudian berkembang seiring kemajuan ilmu pengetahuan, mencakup berbagai teknologi yang memungkinkan manipulasi dan optimalisasi sistem biologis secara terarah.

Dalam konteks ilmiah modern, bioteknologi tidak lagi dipahami hanya sebagai serangkaian teknik laboratorium, melainkan sebagai suatu pendekatan multidisipliner yang menggabungkan prinsip-prinsip biologi, genetika, kimia, bioinformatika, dan rekayasa sistem. Pendekatan ini memungkinkan manusia untuk memahami dan mengendalikan proses biologis pada tingkat yang sangat fundamental, yaitu tingkat gen dan molekul, sehingga mampu mengubah potensi alami organisme menjadi hasil yang lebih bermanfaat. Pada intinya, bioteknologi bertujuan untuk mengubah informasi genetik menjadi inovasi fungsional yang berdampak nyata terhadap peningkatan produktivitas, efisiensi, dan keberlanjutan dalam berbagai sektor, termasuk pertanian, kesehatan, lingkungan, dan industri.

Dalam bidang pertanian, khususnya dalam produksi benih, bioteknologi telah menjadi fondasi bagi revolusi hijau tahap kedua yang berfokus pada efisiensi genetik dan keberlanjutan ekologis. Bioteknologi menyediakan alat bagi pemulia tanaman untuk melakukan perubahan genetik yang lebih presisi dibandingkan metode konvensional yang bergantung pada persilangan dan seleksi alami. Melalui bioteknologi, gen yang mengatur sifat-sifat penting, seperti ketahanan terhadap penyakit, toleransi terhadap kekeringan, efisiensi penyerapan hara, dan peningkatan kandungan gizi, dapat diidentifikasi,

diisolasi, dan diintroduksi ke dalam tanaman lain melalui proses rekayasa genetik. Dengan demikian, bioteknologi berperan tidak hanya dalam menciptakan varietas baru, tetapi juga dalam mempercepat proses perakitan benih unggul dan menjamin stabilitas mutu genetiknya.

Bioteknologi dalam arti luas mencakup berbagai teknologi dan pendekatan ilmiah yang saling terhubung. Salah satu bidang utamanya adalah bioteknologi molekuler, yang berfokus pada analisis dan manipulasi DNA serta RNA. Bidang ini meliputi teknologi DNA rekombinan, kloning gen, transformasi genetik, serta analisis marka molekuler seperti *Random Amplified Polymorphic DNA* (RAPD), *Simple Sequence Repeat* (SSR), dan *Single Nucleotide Polymorphism* (SNP). Melalui bioteknologi molekuler, ilmuwan dapat memahami hubungan antara gen dan fenotipe dengan sangat rinci, sehingga memungkinkan proses seleksi tanaman berdasarkan informasi genetik sebelum karakter tersebut muncul secara fisik.

Bidang penting berikutnya adalah bioteknologi seluler dan kultur jaringan, yang memanfaatkan kemampuan totipotensi sel tumbuhan, yakni kemampuan satu sel untuk berkembang menjadi tanaman utuh. Teknik kultur jaringan telah menjadi komponen penting dalam industri benih modern karena mampu menghasilkan bibit dalam jumlah besar, seragam, bebas penyakit, dan dalam waktu yang relatif singkat. Melalui teknik ini, bagian tanaman seperti daun muda, batang, atau embrio dapat ditumbuhkan pada media buatan yang mengandung zat pengatur tumbuh, sehingga berkembang menjadi individu baru secara aseptik. Keberhasilan perbanyakan *in vitro* ini menjadi dasar bagi produksi benih sumber yang memiliki kemurnian genetik tinggi dan menjadi pijakan penting bagi program pemuliaan dan distribusi varietas unggul.

Selain kedua bidang tersebut, bioteknologi mikroba juga memainkan peranan signifikan dalam sistem produksi benih. Mikroorganisme seperti bakteri *Rhizobium*, *Azospirillum*, dan *Bacillus subtilis* dimanfaatkan sebagai biofertilizer untuk meningkatkan ketersediaan nitrogen, fosfor, dan hara mikro di sekitar akar tanaman. Sementara itu, kelompok jamur seperti *Trichoderma* dan *Glomus* digunakan sebagai agen pengendali hayati dan pembentuk mikoriza yang meningkatkan ketahanan benih terhadap penyakit tular tanah. Dalam beberapa dekade terakhir, mikroba juga mulai dimanfaatkan dalam bentuk seed coating atau pelapis benih, sehingga memberikan efek perlindungan awal terhadap patogen serta meningkatkan vigor saat perkecambahan. Dengan demikian, bioteknologi mikroba berperan

dalam menciptakan benih yang lebih sehat, efisien, dan adaptif terhadap kondisi lingkungan ekstrem.

Ruang lingkup bioteknologi juga meluas ke bioteknologi lingkungan dan bioindustri, di mana proses biologis digunakan untuk mendukung sistem pertanian berkelanjutan. Misalnya, bioteknologi memungkinkan pengolahan limbah pertanian menjadi bahan bernilai tambah seperti bioetanol, biogas, dan pupuk organik cair. Dalam konteks industri benih, bioteknologi juga digunakan dalam produksi hormon pertumbuhan seperti auksin dan sitokinin sintesis, serta enzim yang berfungsi dalam perlakuan benih dan pengolahan pascapanen. Pemanfaatan mikroorganisme dan enzim dalam skala industri inilah yang menghubungkan bioteknologi dengan konsep ekonomi sirkular pertanian, di mana hasil samping budidaya dapat dikembalikan menjadi input yang memperkuat produktivitas benih dan tanaman.

Kemajuan pesat dalam bioinformatika dan bioteknologi data telah mengubah wajah penelitian bioteknologi secara menyeluruh. Analisis genomik dan transkriptomik memungkinkan ilmuwan memetakan ribuan gen yang terlibat dalam pengaturan sifat penting tanaman, seperti fotosintesis, ketahanan cekaman, dan efisiensi metabolisme. Dengan bantuan perangkat lunak bioinformatika, pola-pola ekspresi gen dapat dianalisis untuk memahami mekanisme adaptasi tanaman terhadap stres lingkungan. Informasi ini kemudian diintegrasikan ke dalam program pemuliaan berbasis *marker* (MAS) maupun pengeditan gen (CRISPR-Cas9), sehingga proses perbaikan genetik tanaman dapat dilakukan secara lebih terarah. Di sisi lain, perkembangan teknologi fenotiping digital dan pencitraan hiperspektral juga memungkinkan analisis performa tanaman secara real-time di lapangan, menghubungkan data genetik dengan manifestasi fenotipik pada tingkat populasi.

Dengan cakupan yang sangat luas tersebut, bioteknologi dalam bidang pertanian dapat dikelompokkan menjadi dua kategori besar: bioteknologi konvensional dan bioteknologi modern. Bioteknologi konvensional mencakup teknik-teknik lama yang masih berbasis pada proses biologis alami, seperti fermentasi, kultur jaringan dasar, dan seleksi mikroba. Sebaliknya, bioteknologi modern melibatkan manipulasi langsung terhadap materi genetik, termasuk rekayasa genetik, kloning DNA, analisis genom, serta teknologi pengeditan gen seperti CRISPR-Cas9. Kedua pendekatan ini tidak saling menggantikan, melainkan saling melengkapi dalam sistem inovasi pertanian. Sebagai contoh, kultur jaringan yang termasuk bioteknologi konvensional sering menjadi tahap awal sebelum dilakukan transformasi

genetik, sementara hasil dari rekayasa genetik dapat diperbanyak kembali menggunakan kultur jaringan untuk memastikan kestabilan sifat yang diinginkan.

Namun, perlu diingat bahwa bioteknologi bukan sekadar urusan laboratorium, melainkan bagian dari sistem inovasi pertanian yang utuh. Dalam industri perbenihan, bioteknologi digunakan tidak hanya untuk merancang sifat unggul, tetapi juga untuk mengontrol mutu produksi. Analisis DNA digunakan untuk memastikan kemurnian genetik *parental line*, sementara deteksi patogen berbasis PCR digunakan untuk menjamin kebersihan benih dari kontaminasi virus, bakteri, atau jamur. Proses ini memperkuat jaminan mutu benih yang dipasarkan, sekaligus meningkatkan kepercayaan petani terhadap hasil yang diperoleh. Dengan demikian, bioteknologi berfungsi sebagai sistem kendali kualitas yang menghubungkan antara laboratorium, lapangan, dan pasar.

Meskipun bioteknologi menjanjikan banyak keuntungan, penerapannya juga memerlukan pemahaman mendalam terhadap aspek regulasi, *biosafety*, dan etika ilmiah. Dalam pengembangan benih transgenik atau hasil rekayasa gen, misalnya, setiap langkah harus memenuhi standar keamanan hayati internasional. Penilaian risiko meliputi potensi aliran gen ke spesies liar, dampak terhadap organisme non-target, serta kemungkinan perubahan ekologi jangka panjang. Selain itu, bioteknologi juga menimbulkan dimensi sosial yang kompleks terkait hak kepemilikan genetik, akses teknologi, dan keadilan bagi petani kecil. Oleh karena itu, ruang lingkup bioteknologi modern tidak hanya mencakup teknologi dan ilmu pengetahuan, tetapi juga dimensi sosial, ekonomi, dan etika yang menyertainya.

Pada akhirnya, bioteknologi dalam bidang produksi benih unggul dapat dipandang sebagai sistem yang menyatukan pengetahuan genetik, keterampilan teknis, dan tanggung jawab sosial. Melalui integrasi antara biologi molekuler, kultur jaringan, mikrobiologi, dan analisis data, bioteknologi menghadirkan pendekatan baru dalam memahami serta memanfaatkan potensi genetik tanaman. Hal ini memungkinkan manusia untuk tidak hanya meniru proses alam, tetapi juga mengarahkannya dengan presisi tinggi untuk mencapai tujuan keberlanjutan dan ketahanan pangan.

Dengan landasan inilah, bioteknologi menjadi fondasi bagi generasi baru pemuliaan tanaman yang lebih efisien, berdaya saing, dan berwawasan lingkungan.

1.2 Konsep Benih Unggul dan Kriteria Mutunya

Benih merupakan komponen paling fundamental dalam sistem pertanian, karena di dalamnya tersimpan seluruh informasi genetik yang menentukan potensi produktivitas suatu tanaman. Dalam terminologi ilmiah, benih tidak hanya dipahami sebagai struktur biologis hasil reproduksi tanaman, melainkan sebagai unit fisiologis dan genetik yang menjadi titik awal kehidupan baru dengan sifat-sifat turunan tertentu. Mutu benih yang baik tidak hanya menentukan daya tumbuh, tetapi juga kestabilan hasil dan efisiensi penggunaan input di lapangan. Oleh sebab itu, dalam sistem pertanian modern, konsep benih unggul menjadi dasar dari seluruh strategi peningkatan hasil dan ketahanan pangan.

Secara konseptual, benih unggul adalah benih yang berasal dari varietas dengan potensi genetik tinggi, memiliki kemurnian varietas terjaga, daya tumbuh optimal, serta mampu beradaptasi dengan baik terhadap kondisi lingkungan dan tekanan biotik maupun abiotik. Namun, definisi ini tidak berhenti pada deskripsi biologis semata. Dalam praktiknya, benih unggul merupakan hasil dari interaksi kompleks antara faktor genetik, fisiologis, dan teknologi produksi. Artinya, benih unggul tidak lahir hanya karena memiliki gen yang baik, tetapi juga karena melalui proses produksi, penanganan, dan pengujian yang memenuhi standar mutu. Dengan demikian, konsep benih unggul mencakup tiga dimensi utama: potensi genetik yang unggul, kualitas fisiologis yang prima, dan kemurnian produksi yang terjamin.

Potensi genetik merupakan dimensi pertama yang menentukan keunggulan benih. Genetik benih mencerminkan hasil dari program pemuliaan tanaman yang dilakukan dengan tujuan memperbaiki sifat-sifat penting seperti hasil, ketahanan terhadap penyakit, toleransi terhadap cekaman lingkungan, serta kualitas gizi atau mutu hasil. Potensi genetik ini hanya dapat diwujudkan apabila benih ditanam dalam kondisi lingkungan yang sesuai dan dikelola dengan baik. Dalam konteks bioteknologi modern, potensi genetik benih dapat dirancang secara lebih spesifik melalui penggunaan marka molekuler, seleksi genomik, atau teknologi pengeditan gen. Melalui pendekatan ini, gen yang bertanggung jawab terhadap sifat tertentu dapat diidentifikasi secara presisi dan dipertahankan selama proses perakitan varietas. Sebagai contoh, gen *DREB* yang mengatur toleransi kekeringan atau gen *NHX1* yang berperan dalam toleransi salinitas dapat digunakan sebagai target dalam proses seleksi berbasis *marker* untuk menghasilkan varietas tahan cekaman.

Dimensi kedua adalah kualitas fisiologis, yaitu kemampuan benih untuk berkecambah dan tumbuh menjadi tanaman normal di bawah kondisi lingkungan tertentu. Kualitas fisiologis meliputi parameter seperti daya tumbuh, vigor, kecepatan berkecambah, serta ketahanan terhadap stres fisik selama penyimpanan dan transportasi. Benih dengan vigor tinggi memiliki kecepatan perkecambahan yang seragam dan menghasilkan tanaman yang lebih kuat pada fase awal pertumbuhan. Faktor fisiologis ini dipengaruhi oleh kematangan benih saat panen, kadar air, cara pengeringan, dan kondisi penyimpanan. Dalam praktik modern, bioteknologi telah digunakan untuk menganalisis dan memperbaiki aspek fisiologis ini, misalnya melalui pelapisan benih (*seed coating*) dengan bahan bioaktif atau mikroorganisme probiotik yang meningkatkan viabilitas dan daya tahan benih. Analisis ekspresi gen yang mengatur dormansi dan metabolisme cadangan makanan juga membantu memahami dasar fisiologis vigor benih, sehingga pemulia dapat memilih varietas yang memiliki kemampuan tumbuh optimal di lingkungan ekstrem.

Dimensi ketiga adalah kemurnian benih, baik secara genetik maupun fisik. Kemurnian genetik berarti bahwa seluruh individu dalam satu lot benih memiliki susunan genetik yang sama dengan varietas aslinya, tanpa kontaminasi silang dari varietas lain. Kemurnian fisik mencakup kebersihan benih dari kotoran, bahan asing, dan campuran benih gulma atau varietas lain. Dalam industri benih, kemurnian genetik sangat penting karena menentukan konsistensi hasil di lapangan. Bioteknologi menyediakan alat verifikasi yang sangat efektif untuk memastikan kemurnian ini. Melalui teknik PCR, SSR, atau SNP, produsen dapat mendeteksi adanya kontaminasi varietas atau perubahan genetik yang tidak diinginkan. Marka molekuler kini menjadi standar dalam pengujian benih hibrida dan benih bersertifikat, menggantikan metode morfologis yang lambat dan kurang akurat.

Benih unggul tidak hanya diukur dari karakter genetiknya, tetapi juga dari kemampuannya beradaptasi terhadap kondisi agroekosistem yang beragam. Adaptasi lingkungan menjadi kriteria penting karena faktor eksternal seperti suhu, kelembapan, salinitas, serta serangan hama dan penyakit dapat sangat mempengaruhi performa tanaman. Varietas unggul yang dikembangkan melalui pendekatan bioteknologi sering kali dirancang agar memiliki broad adaptability atau kemampuan beradaptasi luas terhadap kondisi geografis dan iklim yang berbeda. Misalnya, pengenalan gen yang berperan dalam mekanisme toleransi panas atau kekeringan dapat menghasilkan varietas yang tetap produktif di daerah dengan curah hujan rendah. Pendekatan *genotype-by-environment interaction* ($G \times E$) kini menjadi dasar bagi pengujian varietas unggul

di berbagai lokasi uji multilokasi, dengan data yang diintegrasikan melalui model statistik dan bioinformatika untuk memprediksi stabilitas hasil di berbagai zona agroklimat.

Selain sifat adaptif, benih unggul juga harus menunjukkan ketahanan terhadap cekaman biotik dan abiotik. Cekaman biotik berasal dari organisme hidup seperti hama dan patogen, sementara cekaman abiotik mencakup faktor lingkungan seperti kekeringan, salinitas, suhu ekstrem, dan logam berat. Pengembangan ketahanan terhadap cekaman ini merupakan salah satu fokus utama bioteknologi pertanian. Teknologi rekayasa genetik memungkinkan transfer gen ketahanan dari spesies lain yang tidak dapat dicapai melalui pemuliaan konvensional. Contoh paling terkenal adalah jagung Bt yang membawa gen *cry1Ab* dari *Bacillus thuringiensis*, memberikan perlindungan terhadap serangan ulat penggerek batang. Dalam konteks padi, gen seperti *OsHKT1;5* yang berperan dalam homeostasis ion natrium telah digunakan untuk meningkatkan toleransi terhadap salinitas. Melalui integrasi teknologi *marker-assisted selection* dan analisis ekspresi gen, pemulia dapat memastikan bahwa sifat ketahanan tersebut stabil diturunkan ke generasi berikutnya.

Sifat ketahanan dan adaptasi ini berhubungan erat dengan daya hasil (*yield potential*), yang menjadi tujuan akhir dalam pengembangan benih unggul. Namun, dalam konteks pertanian berkelanjutan, produktivitas tinggi saja tidak lagi dianggap cukup. Benih unggul yang dihasilkan melalui bioteknologi diharapkan mampu memberikan hasil optimal dengan input yang lebih efisien, seperti penggunaan pupuk dan air yang lebih hemat. Oleh karena itu, banyak penelitian bioteknologi modern yang berfokus pada efisiensi metabolisme tanaman, seperti perbaikan fotosintesis melalui modifikasi gen *Rubisco activase* atau peningkatan efisiensi penyerapan nitrogen melalui gen transporter tertentu. Inovasi ini memungkinkan benih unggul mendukung sistem pertanian yang produktif sekaligus ramah lingkungan.

Dari perspektif industri, kriteria mutu benih unggul juga mencakup aspek standarisasi dan sertifikasi. Standar mutu benih biasanya mencakup parameter fisik (ukuran, warna, bentuk), fisiologis (daya kecambah, vigor, kadar air), serta genetik (kemurnian varietas). Lembaga pengawasan benih di berbagai negara, termasuk Indonesia, menetapkan persyaratan tertentu yang harus dipenuhi agar suatu benih dapat dikategorikan sebagai benih bersertifikat. Dalam sistem produksi modern, proses pengujian mutu benih semakin bergantung pada teknologi bioteknologi. Misalnya, pengujian kesehatan benih terhadap patogen seperti virus mosaik, *Fusarium*, atau *Rhizoctonia* kini dilakukan menggunakan metode PCR atau ELISA, bukan lagi berdasarkan pengamatan

gejala morfologis. Penerapan sistem *Good Seed Production Practices* (GSPP) dan *Good Manufacturing Practices* (GMP) juga memastikan bahwa seluruh proses produksi, mulai dari penanaman, panen, hingga penyimpanan, mengikuti protokol bioteknologi yang menjamin mutu dan keamanan produk akhir.

Selain dimensi teknis, konsep benih unggul juga memuat dimensi sosial dan ekonomi. Benih unggul yang ideal bukan hanya yang menghasilkan panen tinggi, tetapi juga yang dapat diakses dan dimanfaatkan oleh petani secara berkelanjutan. Dalam banyak kasus, benih hasil bioteknologi memiliki nilai ekonomi yang tinggi dan berada di bawah sistem perlindungan varietas tanaman (PVT) atau hak paten. Hal ini dapat menimbulkan kesenjangan akses antara perusahaan besar dan petani kecil. Oleh karena itu, kebijakan publik dan sistem inovasi harus memastikan bahwa hasil-hasil bioteknologi, termasuk varietas unggul, dapat dimanfaatkan secara adil dan mendukung ketahanan pangan nasional. Prinsip *benefit sharing* dalam Konvensi Keanekaragaman Hayati (CBD) dan Protokol Nagoya menjadi dasar penting dalam menjaga keseimbangan antara kemajuan ilmiah dan keadilan sosial.

Keunggulan suatu benih juga harus diukur dari stabilitas sifatnya lintas generasi. Stabilitas ini menjamin bahwa sifat unggul yang dirakit melalui proses bioteknologi tetap konsisten ketika diperbanyak secara massal. Dalam praktiknya, stabilitas ini diuji melalui analisis genetik antar-generasi menggunakan marka molekuler untuk memastikan tidak terjadi segregasi genetik yang tidak diinginkan. Pada benih hibrida, kestabilan sifat ditentukan oleh kemurnian parental line dan efektivitas sistem steril jantan yang digunakan. Bioteknologi berperan penting dalam memantau dan memverifikasi kestabilan ini, karena perubahan kecil pada tingkat genetik dapat berpengaruh besar terhadap performa di lapangan.

Dengan demikian, konsep benih unggul dalam konteks bioteknologi modern tidak dapat dipisahkan dari pemahaman holistik yang mencakup dimensi genetik, fisiologis, teknologi, sosial, dan ekologis. Benih unggul bukan hanya hasil dari seleksi alami atau pemuliaan konvensional, melainkan merupakan produk sains dan teknologi yang dirancang secara terukur dan bertanggung jawab. Ia adalah titik temu antara biologi molekuler dan kebutuhan pangan global, antara laboratorium dan lahan pertanian, serta antara inovasi ilmiah dan kesejahteraan masyarakat. Pemahaman yang mendalam mengenai konsep dan kriteria mutu benih unggul inilah yang menjadi dasar untuk menguraikan bagaimana bioteknologi berperan dalam mendorong inovasi pertanian di era modern, sebagaimana akan dibahas dalam sub-bab selanjutnya.

1.3 Peran Bioteknologi dalam Inovasi Pertanian

Pertanian modern saat ini berada pada titik transformasi paling signifikan dalam sejarahnya. Jika Revolusi Hijau pada dekade 1960-an ditandai oleh penggunaan varietas berdaya hasil tinggi dan input kimia secara masif, maka revolusi pertanian abad ke-21 ditandai oleh integrasi bioteknologi dalam seluruh rantai produksi. Bioteknologi tidak lagi sekadar alat bantu bagi pemulia tanaman, melainkan telah menjadi kerangka ilmiah yang membentuk paradigma baru dalam pengelolaan sumber daya genetik, efisiensi produksi, dan keberlanjutan sistem pertanian global. Peran bioteknologi dalam inovasi pertanian dapat dipahami dari dua dimensi besar: pertama, sebagai motor peningkatan efisiensi biologis dan produktivitas tanaman, dan kedua, sebagai sarana pembaruan sistem inovasi pertanian yang mengubah cara manusia mendesain, menguji, dan mendistribusikan teknologi pertanian.

Bioteknologi berperan secara langsung dalam mengakselerasi proses perakitan varietas unggul melalui manipulasi genetik dan seleksi molekuler. Pada era sebelum bioteknologi, pemuliaan tanaman didasarkan pada pengamatan fenotipe yang dipengaruhi oleh lingkungan, sehingga memerlukan waktu lama dan hasilnya tidak selalu konsisten. Dengan adanya teknologi molekuler, proses seleksi dapat dilakukan berdasarkan informasi genetik yang spesifik. Melalui marka molekuler, pemulia dapat mendeteksi keberadaan gen tertentu bahkan sebelum tanaman berbunga atau berbuah. Teknologi ini dikenal sebagai *Marker-Assisted Selection* (MAS) yang memungkinkan peningkatan efisiensi waktu pemuliaan hingga 50%. Sebagai contoh, pada program pemuliaan padi toleran salinitas, penggunaan *marker* untuk gen *Sal1* memungkinkan seleksi dini pada bibit muda, sehingga hanya individu yang membawa gen toleransi yang dipertahankan. Pendekatan ini tidak hanya mempercepat waktu rilis varietas, tetapi juga menurunkan biaya pengujian lapangan yang biasanya memakan waktu bertahun-tahun.

Selain mempercepat proses pemuliaan, bioteknologi juga memperluas cakupan sifat yang dapat dimasukkan ke dalam tanaman. Dalam pemuliaan konvensional, perbaikan sifat dibatasi oleh hambatan reproduksi antarspesies, sehingga sulit mentransfer gen dari spesies yang tidak dapat disilangkan. Bioteknologi mematahkan batas tersebut melalui rekayasa genetik dan transfer gen lintas spesies. Teknologi DNA rekombinan memungkinkan penyisipan gen dari organisme lain ke dalam tanaman target untuk memberikan sifat baru yang tidak dimiliki sebelumnya. Contohnya, tanaman jagung Bt yang mengandung gen *cry1Ab* dari *Bacillus thuringiensis* mampu menghasilkan protein toksin spesifik terhadap serangga penggerek batang,

tanpa mengganggu organisme non-target. Demikian pula, kedelai tahan herbisida yang membawa gen *EPSPS* dari bakteri *Agrobacterium tumefaciens* memungkinkan pengendalian gulma yang lebih efisien dan menurunkan penggunaan pestisida kimia. Inovasi semacam ini menunjukkan bahwa bioteknologi tidak hanya memperbaiki tanaman dalam batas alamiahnya, tetapi juga membuka kemungkinan baru dalam desain sifat agronomis yang sebelumnya tidak mungkin dicapai.

Lebih jauh, bioteknologi juga berperan dalam pemetaan dan eksplorasi keragaman genetik tanaman, yang merupakan fondasi dari semua inovasi pertanian. Melalui teknologi genomik dan bioinformatika, ilmuwan kini dapat memetakan seluruh urutan DNA tanaman dalam skala yang belum pernah terjadi sebelumnya. Pemetaan genom ini memberikan pemahaman menyeluruh tentang organisasi gen, interaksi genetik, dan hubungan antara genotipe dengan fenotipe. Sebagai contoh, proyek *Rice Genome Project* yang selesai pada awal 2000-an telah menjadi tonggak penting yang membuka peluang bagi pemulia untuk mengidentifikasi gen pengatur hasil, kualitas bulir, ketahanan penyakit, dan toleransi lingkungan ekstrem. Data genomik semacam ini tidak hanya memperkaya sumber daya genetik, tetapi juga memungkinkan pendekatan *genomic selection* (GS), di mana model statistik dan pembelajaran mesin digunakan untuk memprediksi kinerja suatu genotipe tanpa harus menanamnya. Integrasi genomik dan kecerdasan buatan ini merupakan wujud nyata bioteknologi sebagai sistem inovasi berbasis data.

Selain berperan dalam ranah genetik, bioteknologi juga memberikan kontribusi besar dalam optimalisasi sistem fisiologis tanaman. Melalui pendekatan transkriptomik, proteomik, dan metabolomik, para peneliti dapat memahami bagaimana gen terekspresi dalam berbagai kondisi lingkungan dan bagaimana respons fisiologis tanaman dikendalikan oleh jaringan molekuler yang kompleks. Informasi ini menjadi dasar dalam merancang tanaman yang lebih efisien dalam penggunaan air, nutrisi, dan energi cahaya. Sebagai contoh, identifikasi gen *HKT1;5* pada padi yang berperan dalam pengaturan ion natrium membuka peluang untuk mengembangkan varietas yang mampu tumbuh di lahan salin tanpa mengorbankan hasil. Demikian pula, pemahaman terhadap regulasi ekspresi gen fotosintetik memungkinkan modifikasi tanaman agar memiliki efisiensi fotosintesis lebih tinggi, sehingga produktivitas biomassa meningkat. Dengan demikian, bioteknologi tidak hanya berfokus pada manipulasi gen tunggal, tetapi juga pada rekayasa sistem biologis yang kompleks untuk mencapai performa tanaman yang lebih optimal.

Peran bioteknologi tidak berhenti pada tahap pengembangan varietas, tetapi meluas ke sistem produksi benih dan pertanian presisi. Dalam industri perbenihan, bioteknologi digunakan untuk memastikan kemurnian varietas dan mendeteksi kontaminasi genetik. Pengujian berbasis DNA, seperti PCR dan sekuensing gen spesifik, telah menggantikan metode morfologis yang bergantung pada pengamatan visual. Selain itu, bioteknologi juga digunakan untuk mengembangkan sistem pelapisan benih (*seed coating*) yang mengandung mikroorganisme menguntungkan, hormon pertumbuhan, atau senyawa antioksidan yang meningkatkan vigor kecambah. Kombinasi bioteknologi mikroba dan formulasi bahan pelapis kini menjadi salah satu tren inovatif dalam produksi benih hibrida komersial. Teknologi ini tidak hanya meningkatkan daya tumbuh benih, tetapi juga membantu tanaman menghadapi tekanan abiotik pada fase awal pertumbuhan, seperti kekeringan atau salinitas ringan.

Dalam konteks pertanian presisi, bioteknologi berperan sebagai penyedia data dasar yang menjadi input bagi sistem digital. Data genom, transkrip, protein, dan metabolit dari tanaman disinergikan dengan data lingkungan, cuaca, dan tanah untuk membangun model prediktif pertumbuhan tanaman. Melalui pendekatan ini, petani dapat mengoptimalkan penggunaan air, pupuk, dan pestisida berdasarkan kebutuhan spesifik varietas dan kondisi lapangan. Dengan demikian, bioteknologi berperan penting dalam transformasi pertanian konvensional menjadi pertanian berbasis informasi. Konsep ini semakin relevan di tengah perubahan iklim global yang memerlukan sistem produksi yang adaptif, efisien, dan berkelanjutan.

Di luar fungsi teknisnya, bioteknologi juga membawa perubahan paradigma dalam cara ilmu pengetahuan dikembangkan dan disebarluaskan di sektor pertanian. Inovasi bioteknologi bersifat interdisipliner dan kolaboratif, menghubungkan pemulia tanaman, ahli molekuler, ahli bioinformatika, dan praktisi industri dalam satu ekosistem riset dan inovasi. Hal ini menciptakan model baru dalam pengembangan teknologi pertanian, yang lebih cepat dan lebih responsif terhadap kebutuhan pasar. Contohnya, dalam pengembangan padi toleran salinitas di Indonesia, kolaborasi antara lembaga penelitian nasional, universitas, dan sektor industri benih menghasilkan varietas baru yang diuji langsung di lahan petani. Proses ini mencerminkan bagaimana bioteknologi tidak hanya beroperasi di laboratorium, tetapi menjadi jembatan antara sains dan praktik pertanian di lapangan.

Selain menghasilkan inovasi teknologi, bioteknologi juga memiliki peran strategis dalam konservasi dan pemanfaatan sumber daya genetik tanaman.

Teknologi kultur jaringan digunakan untuk pelestarian plasma nutfah melalui penyimpanan *in vitro* atau cryopreservation, sehingga genetik tanaman yang berharga dapat diselamatkan dari risiko kepunahan. Teknik ini sangat penting bagi spesies yang sulit diperbanyak secara konvensional atau yang populasinya menurun akibat degradasi lingkungan. Di sisi lain, bioteknologi juga memungkinkan pemanfaatan lebih luas dari keragaman genetik liar yang sebelumnya belum tergali. Melalui analisis genomik dan identifikasi gen kandidat, sifat-sifat unik dari tanaman liar dapat diintroduksi ke varietas budidaya tanpa kehilangan kestabilan genetik. Dengan cara ini, bioteknologi berkontribusi langsung terhadap pelestarian biodiversitas sekaligus memperluas basis inovasi pertanian masa depan.

Namun demikian, peran besar bioteknologi dalam inovasi pertanian juga diikuti dengan tantangan regulasi, etika, dan sosial yang tidak dapat diabaikan. Kemampuan untuk memodifikasi materi genetik tanaman menimbulkan kekhawatiran terkait keamanan pangan, dampak lingkungan, dan hak kepemilikan genetik. Oleh karena itu, setiap inovasi bioteknologi harus melalui proses penilaian risiko yang ketat berdasarkan prinsip keamanan hayati (*biosafety*). Protokol Cartagena tentang Keamanan Hayati menjadi pedoman internasional untuk memastikan bahwa transfer, penanganan, dan penggunaan organisme hasil rekayasa genetik dilakukan dengan aman. Selain itu, bioteknologi juga menuntut sistem tata kelola inovasi yang adil, agar manfaatnya tidak hanya dinikmati oleh korporasi besar, tetapi juga oleh petani kecil dan masyarakat lokal. Pendekatan *inclusive innovation* menjadi penting untuk memastikan bahwa bioteknologi berfungsi sebagai alat pemberdayaan, bukan sebagai sumber ketimpangan.

Dalam skala global, bioteknologi juga berperan sebagai instrumen geopolitik dalam menentukan kemandirian pangan suatu bangsa. Negara-negara yang mampu menguasai teknologi bioteknologi pertanian memiliki keunggulan strategis karena dapat mengendalikan sumber daya genetik, menentukan arah pengembangan varietas, dan mengurangi ketergantungan pada impor benih. Oleh sebab itu, penguasaan bioteknologi tidak hanya menjadi isu ilmiah, tetapi juga menjadi bagian dari strategi nasional dalam menghadapi tantangan perubahan iklim, pertumbuhan penduduk, dan keterbatasan lahan produktif. Secara keseluruhan, bioteknologi telah menjadi katalis utama inovasi pertanian yang berorientasi pada efisiensi, keberlanjutan, dan ketahanan pangan. Ia mempertemukan ilmu genetika dengan kebutuhan praktis pertanian, mempercepat proses inovasi melalui pendekatan molekuler, dan memperluas cakupan sifat tanaman yang dapat dimodifikasi. Lebih dari

itu, bioteknologi juga mengubah cara berpikir manusia tentang pertanian—dari sistem berbasis input menjadi sistem berbasis informasi dan pengetahuan. Di era ketika tantangan pertanian semakin kompleks akibat tekanan populasi dan perubahan iklim, bioteknologi berdiri sebagai fondasi ilmiah yang mampu mengubah potensi biologis tanaman menjadi solusi nyata bagi masa depan pangan dunia.

1.4 Sejarah Perkembangan Bioteknologi dalam Benih

Perjalanan bioteknologi dalam bidang perbenihan tidak muncul secara tiba-tiba, melainkan melalui proses panjang yang berakar dari penemuan-penemuan mendasar dalam biologi dan genetika. Sejarah perkembangan ini menunjukkan transformasi yang luar biasa, dari praktik-praktik tradisional yang didasarkan pada pengamatan empiris hingga ke era manipulasi molekuler yang sangat presisi. Evolusi bioteknologi dalam benih mencerminkan perubahan cara manusia memahami kehidupan, mewariskan sifat, dan mengendalikan potensi genetik tanaman untuk memenuhi kebutuhan pangan yang terus meningkat.

Tahapan awal bioteknologi dalam benih dapat ditelusuri jauh sebelum istilah bioteknologi itu sendiri lahir. Pada masa awal pertanian ribuan tahun yang lalu, manusia telah secara tidak sadar melakukan bentuk paling sederhana dari bioteknologi, yaitu seleksi dan domestikasi tanaman. Petani memilih tanaman dengan hasil lebih baik, rasa lebih enak, atau lebih tahan terhadap kondisi lingkungan tertentu untuk dijadikan sumber benih bagi musim tanam berikutnya. Meskipun dilakukan tanpa pengetahuan tentang genetika, proses seleksi alami yang disengaja ini menjadi dasar dari sistem pewarisan sifat. Domestikasi gandum di Mesopotamia, padi di Asia, dan jagung di Mesoamerika merupakan contoh nyata dari bentuk awal penerapan prinsip genetik dalam pengembangan benih unggul secara alami.

Revolusi ilmiah pertama dalam sejarah bioteknologi benih terjadi pada abad ke-19 ketika Gregor Mendel menemukan hukum pewarisan sifat melalui eksperimen sederhana dengan tanaman kacang (*Pisum sativum*). Hukum Mendel tentang segregasi dan asortasi bebas membuka jalan bagi lahirnya ilmu genetika modern. Meskipun karya Mendel tidak langsung diakui pada masanya, penemuan kembali hukum tersebut pada tahun 1900 oleh de Vries, Correns, dan Tschermak menjadi fondasi bagi pemuliaan tanaman berbasis genetika. Pada titik ini, produksi benih unggul mulai bergeser dari praktik tradisional menjadi kegiatan ilmiah yang sistematis, di mana prinsip pewarisan

sifat digunakan untuk merancang kombinasi genetik yang diinginkan melalui hibridisasi dan seleksi terarah.

Dekade-dekade awal abad ke-20 menandai era pemuliaan tanaman klasik, dimana benih unggul dihasilkan melalui persilangan antar varietas dan seleksi ketat terhadap keturunan yang memiliki karakter unggul. Perkembangan teori genetik populasi dan mutasi menambah kekayaan metode dalam meningkatkan variabilitas genetik tanaman. Pada periode ini pula, konsep benih hibrida mulai dikembangkan, terutama setelah penemuan fenomena heterosis atau daya hibrida oleh George Shull dan Edward East. Penemuan ini membuka jalan bagi lahirnya benih jagung hibrida pertama di Amerika Serikat pada tahun 1920-an, yang kemudian diikuti oleh berbagai komoditas lain seperti padi, gandum, dan sayuran. Sistem benih hibrida memperkenalkan model baru dalam industri perbenihan, benih bukan lagi sekadar produk alami, tetapi hasil dari rekayasa genetika melalui pengendalian silang yang dirancang untuk memaksimalkan hasil.

Revolusi besar berikutnya dalam bioteknologi benih terjadi pada pertengahan abad ke-20 dengan ditemukannya struktur DNA oleh James Watson dan Francis Crick pada tahun 1953. Penemuan ini menandai lahirnya era biologi molekuler yang memungkinkan ilmuwan memahami kode genetik secara mendasar. Tidak lama setelah itu, berbagai teknologi analisis DNA mulai dikembangkan, seperti isolasi asam nukleat, enzim restriksi, dan teknik ligasi DNA. Kombinasi temuan ini melahirkan konsep DNA rekombinan pada tahun 1970-an, yang memungkinkan gen dari satu organisme disisipkan ke organisme lain. Dari sinilah istilah bioteknologi modern mulai digunakan secara luas, menandai pergeseran paradigma dari pemuliaan berbasis fenotipe menjadi pemuliaan berbasis genotipe.

Pada dekade 1970–1980-an, bioteknologi mulai menunjukkan dampak nyata dalam industri benih melalui dua terobosan penting: kultur jaringan tanaman dan transformasi genetik. Kultur jaringan, yang berakar dari prinsip totipotensi sel tumbuhan yang dikemukakan oleh Gottlieb Haberlandt pada tahun 1902, berkembang pesat setelah ditemukannya media kultur sintetis oleh Murashige dan Skoog pada tahun 1962. Teknik ini memungkinkan regenerasi tanaman utuh dari fragmen jaringan kecil, seperti pucuk, daun muda, atau embrio. Dalam industri benih, kultur jaringan digunakan untuk memperbanyak klonal varietas unggul secara cepat dan seragam, serta untuk menghasilkan benih bebas patogen melalui kultur meristem. Teknologi ini menjadi sangat penting bagi tanaman vegetatif seperti pisang, kentang, dan

tebu, dimana benih konvensional sering membawa penyakit yang menurunkan produktivitas.

Transformasi genetik tanaman muncul sebagai tonggak sejarah baru yang mengubah arah bioteknologi benih. Pada tahun 1983, untuk pertama kalinya gen asing berhasil dimasukkan ke dalam genom tanaman tembakau menggunakan *Agrobacterium tumefaciens* sebagai vektor alami. Penemuan ini membuka era tanaman transgenik, di mana sifat-sifat baru dapat diperkenalkan ke dalam tanaman dengan presisi tinggi. Sejak itu, berbagai tanaman transgenik dikembangkan untuk ketahanan terhadap hama, penyakit, dan herbisida. Contoh paling terkenal adalah jagung Bt, kedelai tahan glifosat, dan kapas tahan serangga. Seiring dengan komersialisasi benih transgenik pada 1990-an, industri perbenihan global mengalami restrukturisasi besar. Perusahaan-perusahaan multinasional seperti Monsanto, Syngenta, dan Pioneer menginvestasikan miliaran dolar untuk penelitian genom tanaman, menjadikan bioteknologi sebagai pusat inovasi agribisnis modern.

Perkembangan pesat bioteknologi juga mendorong kemajuan dalam teknik marka molekuler, yang menjadi alat penting dalam pengujian kemurnian dan identifikasi varietas benih. Marka seperti RAPD, RFLP, AFLP, SSR, dan SNP menjadi standar dalam seleksi berbasis gen. Dengan teknologi ini, pemulia tanaman dapat memantau pewarisan gen tertentu dalam populasi besar tanpa harus menunggu tanaman tumbuh hingga tahap produktif. Marka molekuler menjembatani pemuliaan konvensional dengan bioteknologi modern melalui pendekatan yang dikenal sebagai *Marker-Assisted Selection* (MAS). Di banyak negara, MAS telah mempercepat perakitan varietas padi, gandum, dan kedelai dengan ketahanan ganda terhadap hama dan penyakit. Teknologi ini tidak hanya memperpendek siklus pemuliaan, tetapi juga meningkatkan akurasi dalam mempertahankan kemurnian genetik parental line dalam sistem produksi benih hibrida.

Memasuki abad ke-21, bioteknologi benih memasuki fase baru yang ditandai dengan munculnya teknologi genomik, transkriptomik, proteomik, dan metabolomik. Pendekatan ini memungkinkan analisis menyeluruh terhadap sistem biologis tanaman pada tingkat molekuler. Alih-alih berfokus pada satu gen, pendekatan omics melihat keseluruhan jaringan gen yang bekerja secara sinergis untuk mengatur sifat kompleks seperti toleransi stres atau hasil tinggi. Kemajuan teknologi sekuensing generasi baru (*Next-Generation Sequencing*, NGS) menjadikan proses pembacaan genom lebih cepat dan murah, memungkinkan pemetaan genom berbagai spesies tanaman dalam waktu singkat. Data genomik yang dihasilkan digunakan untuk

mengidentifikasi gen kandidat yang penting dalam pembentukan sifat unggul, serta untuk membangun basis data yang mendukung pemuliaan berbasis prediksi atau *genomic selection* (GS).

Pada dekade yang sama, muncul pula teknologi pengeditan gen (*gene editing*) yang merevolusi pendekatan bioteknologi dalam perbenihan. Sistem CRISPR-Cas9 yang dikembangkan oleh Jennifer Doudna dan Emmanuelle Charpentier pada tahun 2012 memungkinkan pemotongan DNA secara spesifik di lokasi yang diinginkan, sehingga gen dapat diubah tanpa meninggalkan DNA asing di dalam genom tanaman. Teknologi ini lebih efisien, murah, dan dianggap lebih aman dibandingkan transformasi transgenik konvensional. Dalam konteks benih, CRISPR digunakan untuk memperbaiki gen yang menghambat pertumbuhan, meningkatkan ketahanan tanaman terhadap penyakit, serta mengatur ulang jalur metabolisme yang berhubungan dengan kualitas hasil. Dengan gene editing, pengembangan varietas baru kini dapat dilakukan dalam hitungan tahun, bukan dekade, menjadikan bioteknologi sebagai katalis utama dalam percepatan inovasi benih.

Seiring dengan perkembangan teknologi, sistem regulasi dan etika bioteknologi juga mengalami evolusi yang signifikan. Setelah munculnya tanaman transgenik, masyarakat internasional mulai membangun kerangka hukum untuk memastikan keamanan dan tanggung jawab penggunaan teknologi ini. *Cartagena Protocol on Biosafety* yang disepakati pada tahun 2000 menjadi tonggak penting dalam pengaturan peredaran organisme hasil rekayasa genetik (OHRG). Di sisi lain, perhatian terhadap hak kekayaan intelektual juga meningkat, terutama setelah berlakunya *Agreement on Trade-Related Aspects of Intellectual Property Rights* (TRIPS). Dalam konteks benih, hal ini berdampak pada sistem kepemilikan varietas dan pengakuan terhadap sumber genetik lokal. Oleh karena itu, perkembangan bioteknologi dalam benih tidak hanya dipengaruhi oleh kemajuan ilmiah, tetapi juga oleh dinamika politik, ekonomi, dan sosial yang melingkupinya.

Dalam dua dekade terakhir, bioteknologi benih memasuki fase yang dapat disebut sebagai era bioinformatika integratif. Penggabungan data molekuler dengan teknologi digital seperti kecerdasan buatan (AI), pembelajaran mesin, dan sistem informasi geografis (GIS) menciptakan pendekatan baru dalam pemuliaan tanaman. Pemodelan berbasis data besar (*big data modeling*) memungkinkan prediksi performa varietas di berbagai kondisi agroklimat bahkan sebelum ditanam. Hal ini menandai lahirnya paradigma baru: dari *breeding by observation* menjadi *breeding by design*. Dalam

sistem ini, benih tidak lagi hanya hasil dari proses seleksi alami, melainkan hasil dari desain genetik yang dikalkulasi secara komputasional. Dengan demikian, bioteknologi kini menjadi pusat pengendali seluruh rantai nilai benih, dari eksplorasi plasma nutfah hingga pengembangan varietas yang siap dikomersialisasikan.

Sejarah perkembangan bioteknologi dalam benih dengan jelas memperlihatkan bahwa inovasi ilmiah selalu bergerak dalam siklus antara kebutuhan manusia dan kemampuan teknologi. Setiap penemuan baru, mulai dari hukum Mendel hingga CRISPR, telah memperluas kemampuan manusia untuk mengendalikan kehidupan pada tingkat yang semakin dalam. Namun, di balik setiap kemajuan, terdapat tanggung jawab moral dan ekologis yang tidak kalah besar. Sejarah ini bukan hanya tentang teknologi, tetapi juga tentang cara manusia memahami hubungan antara ilmu pengetahuan, alam, dan kebutuhan hidupnya. Karena itu, memahami sejarah bioteknologi dalam benih bukan sekadar menelusuri kronologi perkembangan ilmu, tetapi juga menelaah bagaimana sains, etika, dan kebijakan bersatu membentuk wajah pertanian masa depan.

1.5 Tantangan dan Prospek Masa Depan

Kemajuan bioteknologi telah membawa pertanian ke dalam era baru yang berbasis pada sains, data, dan rekayasa genetika. Namun, di balik potensi besar tersebut, terdapat sejumlah tantangan mendasar yang menentukan arah dan keberlanjutan penerapannya di masa depan. Tantangan-tantangan ini tidak hanya bersifat teknis, tetapi juga mencakup aspek sosial, ekonomi, etika, dan regulasi yang saling berkelindan. Masa depan bioteknologi dalam produksi benih unggul akan sangat ditentukan oleh kemampuan manusia dalam menjawab persoalan-persoalan ini secara holistik, sambil tetap menjaga keseimbangan antara inovasi ilmiah, keamanan lingkungan, dan keadilan sosial. Salah satu tantangan utama dalam penerapan bioteknologi adalah kesenjangan penguasaan teknologi antara negara maju dan negara berkembang. Negara-negara dengan infrastruktur riset yang kuat dan pendanaan besar telah jauh lebih dulu memanfaatkan bioteknologi untuk menguasai industri benih global.

Sebaliknya, banyak negara berkembang yang masih bergantung pada impor benih dan belum memiliki kapasitas penelitian memadai untuk menghasilkan varietas unggul secara mandiri. Ketimpangan teknologi menciptakan ketergantungan struktural yang berpotensi mengancam kedaulatan pangan. Dalam konteks ini, bioteknologi menjadi bukan hanya isu

ilmiah, tetapi juga persoalan geopolitik. Penguasaan teknologi genetik berarti penguasaan atas sumber daya strategis yang menentukan masa depan pertanian dan ekonomi nasional. Oleh karena itu, investasi dalam riset bioteknologi, pendidikan tinggi, dan pengembangan sumber daya manusia menjadi kunci untuk memperkecil kesenjangan tersebut. Tantangan berikutnya terletak pada penerimaan sosial dan etika penggunaan bioteknologi, terutama yang berkaitan dengan organisme hasil rekayasa genetik (OHRG) dan pengeditan gen. Di sejumlah negara, kampanye anti-GMO mencerminkan ketidakpercayaan masyarakat terhadap industri besar yang dianggap memonopoli benih dan merugikan petani kecil.

Regulasi yang ketat terhadap OHRG sering kali membuat inovasi bioteknologi bergerak lebih lambat dibandingkan dengan kemajuan ilmu pengetahuan itu sendiri. Di banyak negara, perizinan komersialisasi tanaman transgenik dapat memakan waktu bertahun-tahun dengan biaya yang sangat besar. Hal ini membuat hanya perusahaan besar yang mampu bertahan dalam industri bioteknologi, sementara lembaga penelitian publik dan universitas sulit bersaing. Tantangan lain yang semakin menonjol adalah risiko penyempitan keanekaragaman genetik akibat ketergantungan pada varietas unggul komersial. Di satu sisi, bioteknologi berperan besar dalam memperbaiki sifat tanaman dan meningkatkan hasil. Namun, penggunaan varietas yang seragam dalam skala luas dapat mengurangi keragaman genetik di lapangan dan meningkatkan kerentanan terhadap penyakit baru atau perubahan lingkungan. Kasus epidemi penyakit Southern Corn Leaf Blight di Amerika Serikat pada tahun 1970 menjadi peringatan historis bahwa homogenitas genetik dalam benih dapat menimbulkan bencana besar. Oleh karena itu, masa depan bioteknologi harus diarahkan untuk mengintegrasikan konservasi plasma nutfah dan pemanfaatan sumber genetik lokal sebagai bagian dari strategi inovasi.

Selain tantangan biologis dan sosial, bioteknologi juga menghadapi masalah ekonomi dan akses teknologi. Bioteknologi merupakan bidang yang memerlukan investasi besar dalam riset, fasilitas laboratorium, dan tenaga ahli. Bagi banyak negara berkembang, biaya pengembangan varietas transgenik atau hasil editing gen masih terlalu tinggi untuk dilakukan secara mandiri. Di sisi lain, sistem paten yang melindungi teknologi bioteknologi seringkali membatasi akses terhadap sumber daya genetik dan teknologi dasar seperti vektor, enzim, atau marka molekuler. Untuk mengatasi hal ini, diperlukan mekanisme kerja sama internasional yang menjamin *fair benefit sharing* antara pemilik teknologi dan pengguna di negara berkembang. Model *open-source*

biotechnology atau lisensi terbuka untuk teknologi dasar dapat menjadi solusi yang memungkinkan inovasi tumbuh lebih merata dan inklusif di masa depan.

Perubahan iklim global menambah kompleksitas tantangan bioteknologi dalam sektor perbenihan. Kondisi lingkungan yang semakin tidak menentu, seperti peningkatan suhu, perubahan pola curah hujan, dan peningkatan salinitas tanah, menuntut varietas tanaman yang memiliki ketahanan multipel (*multi-stress tolerance*). Tantangan ilmiah terbesar dalam hal ini adalah memahami interaksi kompleks antara gen, metabolisme, dan lingkungan. Sebagian besar sifat ketahanan terhadap cekaman abiotik dikendalikan oleh banyak gen (*polygenic traits*), sehingga tidak cukup hanya dengan memperkenalkan satu gen tunggal. Di sinilah bioteknologi modern seperti *genomic selection* dan *systems biology* memainkan peranan penting. Dengan menggunakan pendekatan ini, ilmuwan dapat memprediksi kombinasi gen yang paling efektif untuk menghasilkan tanaman yang adaptif terhadap berbagai kondisi ekstrem. Prospek ke depan menunjukkan bahwa bioteknologi tidak hanya akan berfokus pada satu sifat tunggal, tetapi akan berorientasi pada rekayasa sistem genetik yang terintegrasi untuk mengoptimalkan performa tanaman di berbagai ekosistem.

Selain tantangan ilmiah, isu keamanan hayati dan etika ilmiah tetap menjadi perhatian utama dalam prospek pengembangan bioteknologi benih. Kemampuan manusia untuk memanipulasi gen membawa konsekuensi moral yang besar. Pertanyaan seperti “sampai sejauh mana manusia berhak mengubah sifat dasar kehidupan?” atau “apa batas etis antara inovasi dan eksploitasi biologis?” menjadi perdebatan filosofis yang terus berlanjut. Di satu sisi, bioteknologi menawarkan solusi terhadap kelaparan dan perubahan iklim; di sisi lain, ia membuka kemungkinan penyalahgunaan dalam bentuk *biopiracy*, monopoli genetik, atau eksploitasi sumber daya hayati tanpa izin. Oleh karena itu, pembangunan sistem bioteknologi yang etis harus disertai dengan tata kelola ilmiah yang transparan dan akuntabel. Lembaga penelitian dan industri perlu mengadopsi prinsip-prinsip *responsible research and innovation* (RRI) yang menekankan keterlibatan publik, keberlanjutan, dan reflektivitas moral dalam setiap tahapan inovasi.

Di tengah berbagai tantangan tersebut, prospek masa depan bioteknologi dalam produksi benih tetap sangat menjanjikan. Kemajuan teknologi pengeditan gen seperti CRISPR-Cas9, Cas12a, dan *base editing* membuka peluang baru untuk menciptakan varietas unggul dengan presisi tinggi tanpa memasukkan DNA asing. Hal ini diharapkan dapat mengurangi resistensi publik terhadap tanaman hasil rekayasa genetika karena sifatnya

yang lebih alami dan terarah. Selain itu, teknologi synthetic biology mulai dikembangkan untuk merancang sistem genetik buatan yang dapat meningkatkan fotosintesis atau efisiensi metabolisme tanaman. Dengan bantuan kecerdasan buatan (AI) dan pembelajaran mesin (*machine learning*), proses perancangan genetik dapat dilakukan melalui simulasi digital, menghasilkan model *in silico* breeding yang mempercepat siklus pemuliaan dari bertahun-tahun menjadi hanya beberapa bulan. Integrasi bioteknologi dengan teknologi digital dan data besar akan mengubah wajah pertanian global secara fundamental. Kombinasi genomik, *digital phenotyping*, *Internet of Things* (IoT), dan sistem pertanian presisi memungkinkan pengambilan keputusan berbasis data yang sangat detail. Dalam sistem ini, setiap varietas benih dapat dikembangkan dan dikelola secara spesifik sesuai dengan kondisi agroekologi dan kebutuhan nutrisi tanah di suatu wilayah. Pendekatan ini dikenal sebagai *site-specific seed technology*, di mana bioteknologi digunakan untuk mendesain benih yang disesuaikan dengan lokasi geografis tertentu. Model ini bukan hanya meningkatkan produktivitas, tetapi juga efisiensi sumber daya alam seperti air dan pupuk.

Prospek jangka panjang lainnya terletak pada peran bioteknologi dalam mendukung pertanian berkelanjutan dan ekonomi hijau. Bioteknologi tidak hanya menjadi instrumen peningkatan produktivitas, tetapi juga solusi ekologis yang menyeimbangkan hubungan antara manusia dan alam. Masa depan bioteknologi dalam produksi benih juga akan sangat ditentukan oleh kemampuan kolaborasi lintas disiplin dan lintas sektor. Dalam konteks global, kerja sama internasional melalui jaringan riset terbuka akan mempercepat pertukaran pengetahuan dan teknologi, memastikan bahwa bioteknologi berkembang sebagai aset bersama umat manusia, bukan sebagai alat dominasi satu pihak terhadap pihak lain. Dengan segala kompleksitas tantangannya, bioteknologi tetap akan menjadi tulang punggung inovasi pertanian masa depan. Keberhasilan sektor ini akan sangat bergantung pada kemampuan manusia untuk menyeimbangkan tiga aspek utama: kemajuan ilmiah, keadilan sosial, dan keberlanjutan ekologis. Di situlah letak prospek sejati bioteknologi: bukan hanya sebagai alat untuk menguasai kehidupan, tetapi sebagai sarana untuk merawatnya dengan pengetahuan, tanggung jawab, dan kebijaksanaan ilmiah.

DAFTAR PUSTAKA

- Arsensi, I., Suprpto, A., Muchtar, A., Santosa, B., Zebua, H. P., Suminar, R., Rosmiati, C., Wasonowati, C., Suwarno, K., & Mande, A. R. 2025. Konsep dasar agroteknologi. Yogyakarta, Indonesia: Rey Media Grafika.
- Arrufitasari, P.N., Dinanty, F., Purnamasari, R., Lestari, R., Wahditya, A.A., Wibowo, S.G. dan Primayanti, T. 2023. Bioteknologi Tanaman. Padang: Gita Lentera.
- Hervibawa, B., Maryamah, L.F., Ramadiana, S. dan Rahman, A. 2025. Bioteknologi Pertanian. Padang: Hei Publishing Indonesia.
- Maheswari, O. 2022. Panduan Bioteknologi Pertanian. Yogyakarta: Diva Press.
- Parwito, Hamzah, P., Setyono, B.D.H., Daten, H., Sani, M.D., Tenriawaru, E.P., Alang, H., Ashar, J.R., Farhanah, A., Sari, S.P., Pratiwi, E.R., Prasetyawan, F. dan Hastuti. 2024. Bioteknologi Konvensional dan Modern. Yogyakarta: Mega Press Nusantara.
- Pertiwi, W., Judijanto, L., Apriansi, M., Suparningtyas, J. F., Lada, Y. G., Mahyuni, S., & Nuroniah, H. S. 2025. Bioteknologi: Teori dan penerapan dalam berbagai bidang (E. Efitra & E. R. Putri, Eds.). Yogyakarta, Indonesia: Sonpedia Publishing Indonesia.
- Prasedya, E.S. 2023. Buku Ajar Bioteknologi Dasar. Yogyakarta: Mega Press Nusantara.
- Yuwono, T. 2019. Bioteknologi Pertanian. Yogyakarta: UGM Press.

BAB 2
DASAR GENETIKA
DAN PEMULIAAN TANAMAN

Oleh: Kacung Hariyono

2.1 Struktur dan Fungsi Gen

2.1.1 Pengertian Gen

Gen adalah unit pewarisan sifat yang terdapat pada DNA (*Deoxyribonucleic Acid*) di dalam kromosom. Gen mengandung informasi genetik yang menentukan sifat-sifat makhluk hidup, seperti warna mata, bentuk daun, atau tipe enzim yang diproduksi.

2.1.2 Struktur Gen

Gen tersusun atas segmen DNA yang memiliki bagian-bagian spesifik:

Tabel 1. Struktur Gen

Bagian Gen	Struktur	Fungsi Utama
Promotor	Urutan nukleotida di awal gen	Tempat melekatnya enzim RNA polimerase untuk memulai transkripsi
Ekson	Segmen DNA yang menyandi asam amino	Disalin menjadi mRNA dan diterjemahkan menjadi protein
Intron	Segmen DNA non-koding di antara ekson	Dihilangkan saat proses pemrosesan mRNA (<i>splicing</i>)
Terminator	Urutan DNA di akhir gen	Menandakan akhir proses transkripsi
<i>Enhancer/ Silencer</i>	Urutan DNA di luar gen utama	Mengatur kecepatan atau tingkat ekspresi gen (penguat atau penghambat)

Ilustrasi sederhana struktur gen adalah sebagai berikut:

[Regulator]--[Promotor]--[Ekson]--[Intron]--[Ekson]--[Terminator]

2.1.3 Fungsi Gen

Gen memiliki beberapa fungsi yang dijelaskan sebagai berikut:

1. Menyandi protein:

Gen berisi instruksi untuk membuat protein melalui proses transkripsi (DNA → mRNA) dan translasi (mRNA → protein).

2. Mewariskan sifat:

Gen membawa informasi yang menentukan ciri-ciri individu, seperti warna mata, bentuk daun, atau jenis enzim.

3. Mengatur aktivitas sel:

Beberapa gen berfungsi sebagai gen pengatur (regulator) yang mengontrol kapan dan di mana gen lain diekspresikan.

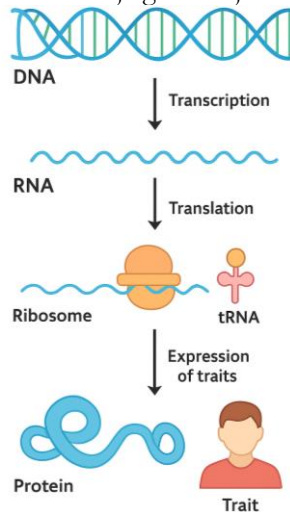
4. Menjadi dasar evolusi:

Variasi dalam gen (mutasi atau rekombinasi) menyebabkan keragaman genetik, yang menjadi bahan bagi seleksi alam.

Mekanisme Kerja Gen secara singkat sebagai berikut:

1. Transkripsi: DNA disalin menjadi mRNA di dalam inti sel.
2. Splicing: Intron dibuang, ekson disambung membentuk mRNA matang.
3. Translasi: mRNA dibaca oleh ribosom untuk menyusun rantai asam amino → protein.
4. Protein berfungsi menjalankan peran fisiologis di dalam sel (enzim, hormon, struktur, dll)

Diagram alur mekanisme kerja gen disajikan sebagai berikut:



Gambar 1. Mekanisme Kerja Gen

2.2 Pewarisan Sifat dan Hukum Mendel

2.2.1 Pengertian Pewarisan Sifat

Pewarisan sifat adalah proses penurunan ciri-ciri atau karakteristik dari induk (orang tua) ke keturunan (anak) melalui gen yang terdapat dalam kromosom. Sifat yang diwariskan dapat berupa warna bunga, bentuk biji, tinggi tanaman, warna mata, dan sebagainya. Satuan pewarisan sifat disebut gen, sedangkan alel adalah bentuk alternatif dari gen yang menempati lokus yang sama pada kromosom homolog.

2.2.2 Komponen Pewarisan Sifat

1. Gen

Gen adalah pembawa sifat yang menentukan ciri tertentu, misalnya warna bunga, bentuk biji, atau golongan darah.

2. Alel (alel)

Alel adalah pasangan gen yang mengatur satu sifat tertentu.

Contoh:

- Alel dominan (huruf besar, misalnya A)
- Alel resesif (huruf kecil, misalnya a)

3. Genotipe dan Fenotipe

- Genotipe: susunan gen (contoh: AA, Aa, aa)
- Fenotipe: penampilan luar hasil dari genotipe (contoh: tinggi, pendek, merah, putih)

4. Kromosom

Kromosom adalah struktur di dalam inti sel tempat gen berada. Manusia memiliki 23 pasang kromosom (46 total).

2.2.3 Hukum Mendel

Peneliti Gregor Johann Mendel (1822–1884) menemukan dua hukum dasar pewarisan sifat melalui percobaannya pada tanaman kacang ercis (*Pisum sativum*).

A. Hukum Mendel I (Hukum Segregasi)

"Setiap pasangan alel akan berpisah secara bebas pada waktu pembentukan gamet, sehingga tiap gamet hanya mengandung satu alel dari tiap pasangan alel."

Contoh:

- Persilangan: AA × aa
- Gamet: A dan a

- F_1 : seluruhnya Aa (fenotipe mengikuti sifat dominan)
- Jika F_1 disilangkan dengan sesamanya ($Aa \times Aa$):
- Genotipe $F_2 = 1 AA : 2 Aa : 1 aa$
 - Fenotipe $F_2 = 3 \text{ dominan} : 1 \text{ resesif}$
- Perbandingan Fenotipe $F_2 = 3 : 1$

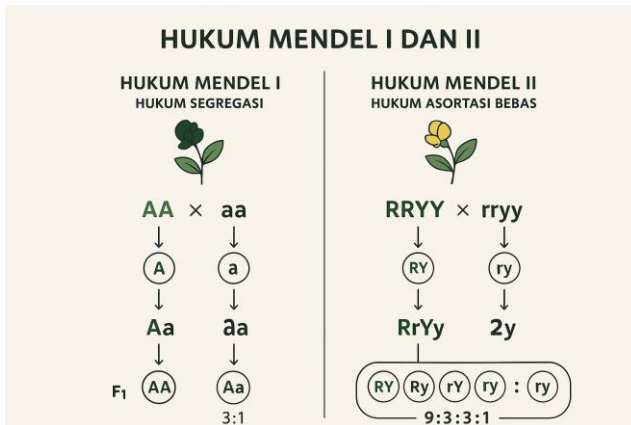
B. Hukum Mendel II (Hukum Asortasi Bebas)

"Gen-gen dari sifat yang berbeda akan memisah secara bebas satu sama lain saat pembentukan gamet."

Contoh:

- Persilangan dua sifat:
Biji bulat kuning ($RRYY$) $\times$ keriput hijau ($rryy$)
- F_1 : semua $RrYy$ (bulat kuning)
- F_2 (hasil $F_1 \times F_1$):
Kombinasi gen membentuk 16 kemungkinan genotipe, dengan rasio fenotipe: 9 bulat kuning : 3 bulat hijau : 3 keriput kuning : 1 keriput hijau.
- Perbandingan Fenotipe $F_2 = 9 : 3 : 3 : 1$

Bagan diagram gambar Hukum Mendel I dan II disajikan sebagai berikut



Gambar 2. Hukum Mendel I dan II

2.3 Variabilitas Genetik dan Seleksi

Variabilitas Genetik dan Seleksi adalah dua konsep kunci dalam genetika dan evolusi yang saling berkaitan.

2.3.1 Variabilitas Genetik

Variabilitas genetik adalah perbedaan atau keragaman genetik yang terdapat di antara individu dalam suatu populasi. Variasi ini menyebabkan setiap individu memiliki sifat yang tidak persis sama, meskipun berasal dari spesies yang sama. Variabilitas genetik menjadi dasar utama bagi evolusi dan seleksi alam, karena menyediakan bahan mentah bagi proses adaptasi.

2.3.2 Sumber Variabilitas Genetik

Variabilitas genetik muncul melalui beberapa mekanisme biologis, yaitu:

Tabel 2. Sumber Variabilitas Genetik

Sumber Variasi	Penjelasan	Contoh
Mutasi	Perubahan urutan DNA yang bisa menghasilkan alel baru	Mutasi gen warna bunga menjadi ungu
Rekombinasi genetik	Pertukaran materi genetik saat pembentukan gamet (meiosis)	Crossing over antara kromosom homolog
Fertilisasi acak	Kombinasi acak antara sel telur dan sperma	Kombinasi gen unik pada setiap keturunan
Migrasi gen (aliran gen)	Perpindahan alel antar populasi	Serbuk sari berpindah ke populasi lain
Perpindahan kromosom secara acak	Pembagian kromosom selama meiosis terjadi secara acak	Kombinasi gen pada gamet berbeda-beda

2.3.3 Arti Penting Variabilitas Genetik

Menjadi dasar bagi seleksi alam adalah individu dengan kombinasi gen lebih unggul cenderung bertahan hidup dan berkembang biak.

1. Menjaga kestabilan populasi terhadap perubahan lingkungan.
2. Menjadi bahan utama dalam pemuliaan tanaman dan hewan untuk menghasilkan varietas unggul.

2.3.4 Seleksi

Seleksi adalah proses yang menentukan individu mana yang bertahan hidup dan bereproduksi berdasarkan sifat-sifat genetiknya. Seleksi bisa terjadi secara alami maupun buatan (artifisial).

Tabel 3. Jenis-jenis seleksi

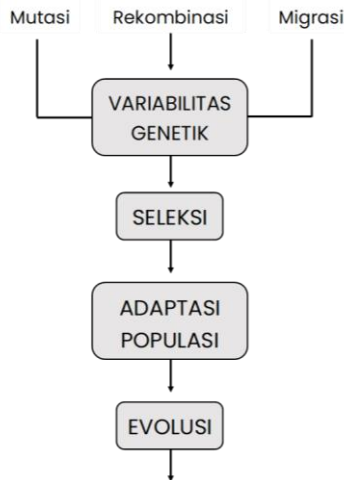
Jenis Seleksi	Mekanisme	Contoh
Seleksi Alam (<i>Natural Selection</i>)	Lingkungan menentukan individu yang bertahan	Jerapah berleher panjang lebih mudah mencapai daun tinggi
Seleksi Seksual (<i>Sexual Selection</i>)	Individu dengan sifat menarik lebih banyak pasangan	Burung merak jantan dengan bulu indah
Seleksi Buatan (<i>Artificial Selection</i>)	Manusia memilih individu dengan sifat diinginkan	Pemuliaan padi tahan hama
Seleksi Penstabil (<i>Stabilizing Selection</i>)	Mempertahankan sifat rata-rata	Berat bayi manusia ideal lebih tinggi peluang hidupnya
Seleksi Terarah (<i>Directional Selection</i>)	Memihak salah satu ekstrem sifat	Kupu-kupu gelap bertahan di lingkungan polusi
Seleksi Disruptif (<i>Disruptive Selection</i>)	Memihak dua ekstrem sifat	Burung dengan paruh sangat besar atau kecil lebih adaptif dibanding ukuran sedang

2.3.5 Hubungan Variabilitas Genetik dan Seleksi

Hubungan keduanya dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Variabilitas genetik menghasilkan perbedaan sifat antar individu.
2. Seleksi (alam atau buatan) memilih individu dengan sifat yang paling sesuai dengan lingkungan atau tujuan tertentu.
3. Individu terpilih akan mewariskan gen-gen unggulnya ke generasi berikutnya.
4. Populasi mengalami perubahan genetik seiring waktu → dasar terjadinya evolusi.

Diagram alur hubungan antara variabilitas genetik dan seleksi disajikan sebagai berikut:



Gambar 3. Hubungan antara variabilitas genetik dan seleksi

2.4 Teknik Pemuliaan Konvensional

Teknik Pemuliaan Konvensional adalah metode pemuliaan tanaman atau hewan yang dilakukan tanpa rekayasa genetik modern, melainkan menggunakan persilangan alami, seleksi, dan pengamatan sifat dari generasi ke generasi.

2.4.1 Pengertian Pemuliaan Konvensional

Pemuliaan konvensional bertujuan untuk menghasilkan varietas unggul dengan sifat tertentu (seperti hasil tinggi, tahan penyakit, atau kualitas produk lebih baik) melalui persilangan dan seleksi alami. Metode ini telah digunakan manusia selama ribuan tahun sebelum munculnya bioteknologi modern. Pemuliaan konvensional bekerja berdasarkan hukum pewarisan sifat Mendel, di mana sifat-sifat diturunkan melalui gen dari induk ke keturunan.

Langkah utamanya adalah:

1. Menciptakan variabilitas genetik (melalui persilangan atau mutasi alami).
2. Menyeleksi individu terbaik dari populasi hasil persilangan.
3. Menetapkan varietas unggul setelah diuji kestabilan dan keunggulannya

2.4.2 Prinsip Dasar Pemuliaan Konvensional

Pemuliaan konvensional memanfaatkan variabilitas genetik alami dalam populasi dan seleksi individu terbaik untuk dikembangkan. Langkah-langkah adalah sebagai berikut:

1. Pengumpulan plasma nutfah (sumber genetik tanaman/hewan).
2. Seleksi induk dengan sifat unggul.
3. Persilangan (hibridisasi) untuk menggabungkan sifat-sifat baik dari kedua induk.
4. Seleksi keturunan (*progeny selection*) untuk memperoleh individu terbaik.
5. Uji keturunan dan adaptasi di berbagai lingkungan.
6. Pelepasan varietas unggul baru setelah stabil

2.4.3 Teknik-Teknik Utama Pemuliaan Konvensional

Berikut beberapa teknik yang umum digunakan dalam pemuliaan tradisional:

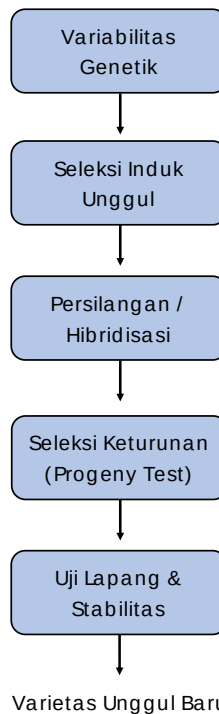
Tabel 4. Teknik-Teknik Utama Pemuliaan Konvensional

Teknik	Penjelasan	Contoh
Seleksi Massa (<i>Mass Selection</i>)	Memilih individu dengan sifat terbaik dari populasi heterogen untuk dijadikan benih generasi berikutnya.	Pemilihan tanaman padi berbulir besar dan tahan penyakit.
Seleksi Garis Murni (<i>Pure Line Selection</i>)	Mengambil keturunan dari satu individu unggul dan menanamnya berulang hingga sifatnya stabil.	Pembuatan varietas kedelai unggul dari satu tanaman induk.
Persilangan (<i>Hybridization</i>)	Mengawinkan dua individu dengan sifat unggul berbeda untuk menghasilkan kombinasi sifat baru.	Persilangan jagung tahan kering × hasil tinggi.
<i>Inbreeding</i> (Kawin sedarah)	Menyilangkan individu yang masih satu keturunan untuk menstabilkan sifat tertentu.	Menstabilkan sifat warna bunga pada tanaman hias.
<i>Outbreeding</i> (Kawin tidak sedarah)	Menyilangkan individu yang tidak berkerabat untuk meningkatkan keragaman	Persilangan sapi lokal dengan sapi impor.

	genetik dan vigor hibrida (heterosis).	
Introduksi Varietas	Mengambil varietas unggul dari daerah lain dan menyesuaikannya di lokasi baru.	Introduksi gandum Australia ke Indonesia.
Mutasi Alami	Memanfaatkan perubahan genetik alami sebagai sumber variasi baru.	Tanaman jeruk tanpa biji akibat mutasi alami.

Diagram alur proses pemuliaan konvensional disajikan sebagai berikut:

**TEKNIK PEMULIAAN
KONVENSIONAL**



Gambar 4. Proses Pemuliaan Konvensional

2.4.4 Kelebihan dan Kekurangan

Tabel 5. Kelebihan dan Kekurangan

Kelebihan	Kekurangan
Metode sederhana dan murah	Memerlukan waktu lama (bisa bertahun-tahun)
Tidak memerlukan peralatan canggih	Hasil tidak selalu stabil atau konsisten
Diterima secara luas oleh masyarakat	Sulit mengendalikan gen yang diwariskan
Memanfaatkan sumber daya lokal	Kurang efektif untuk sifat kompleks (misalnya ketahanan multi-hama)

2.5 Integrasi Genetika Klasik dan Molekuler

Integrasi genetika klasik dan genetika molekuler adalah penggabungan antara pendekatan fenotipik (ciri luar dan pewarisan sifat) dengan pendekatan molekuler (tingkat DNA, RNA, dan protein) untuk memahami cara kerja gen dan pewarisan sifat secara menyeluruh.

2.5.1 Pengertian Dasar

Tabel 6. Pengertian Dasar

Aspek	Genetika Klasik	Genetika Molekuler
Fokus utama	Pewarisan sifat berdasarkan hasil persilangan dan hukum Mendel	Struktur, fungsi, dan regulasi gen pada tingkat DNA dan protein
Pendekatan	Fenotipe (pengamatan ciri fisik)	Genotipe (analisis DNA, RNA, protein)
Satuan analisis	Gen sebagai satuan abstrak pewarisan	Gen sebagai urutan nukleotida spesifik dalam DNA
Metode	Persilangan, analisis rasio fenotipe, peta genetik sederhana	PCR, sekuensing DNA, kloning gen, CRISPR
Tujuan	Mengetahui pola pewarisan sifat	Mengetahui mekanisme ekspresi dan regulasi gen

Kesimpulan:

Genetika klasik mempelajari bagaimana sifat diwariskan, sedangkan genetika molekuler mempelajari bagaimana gen bekerja. Integrasi keduanya memberi pemahaman utuh tentang mekanisme pewarisan dan ekspresi genetik.

2.5.2 Bentuk Integrasi

Integrasi terjadi ketika hasil analisis molekuler digunakan untuk menjelaskan pola pewarisan klasik, dan sebaliknya, data klasik digunakan untuk memvalidasi fungsi gen molekuler.

Tabel 7. Contoh bentuk integrasi:

Bidang	Bentuk Integrasi	Contohnya
Pemetaan genetik	Menggabungkan data fenotipe dengan penanda DNA	Peta gen pada kromosom gandum berdasarkan marka mikrosatelit
Analisis mutasi	Menghubungkan perubahan DNA dengan perubahan sifat	Mutasi gen HBB → anemia sel sabit
Pemuliaan tanaman/hewan	Seleksi berbasis gen (<i>Marker Assisted Selection</i>)	Seleksi tanaman tahan penyakit menggunakan penanda molekuler
Diagnostik genetik	Identifikasi gen penyebab kelainan genetik	Deteksi gen BRCA1/2 pada kanker payudara
Evolusi molekuler	Menjelaskan hubungan kekerabatan berdasarkan urutan DNA	Pohon filogenetik berbasis sekuens gen 16S rRNA

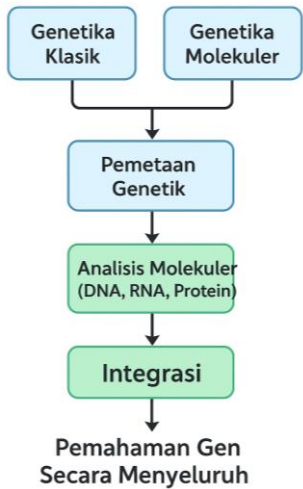
2.5.3 Manfaat Integrasi

1. Menjelaskan hubungan antara genotipe dan fenotipe secara detail
2. Mempercepat proses identifikasi gen pengendali sifat penting
3. Memungkinkan rekayasa genetika dan bioteknologi modern
4. Mendukung pemuliaan berbasis DNA yang lebih efisien dan akurat
5. Memberi dasar ilmiah untuk terapi gen dan diagnostik penyakit

Tabel 8. Contoh nyata integrasi:

Organisme	Genetika Klasik	Genetika Molekuler	Integrasi
Kacang ercis (Mendel)	Pewarisan warna bunga	Gen pengatur pigmen antosianin ditemukan	Menjelaskan dasar molekuler hukum segregasi
<i>Drosophila melanogaster</i>	Gen pengatur warna mata	Gen <i>white</i> di kloning dan diidentifikasi	Menghubungkan mutasi gen dengan fungsi protein
Manusia	Pewarisan buta warna	Identifikasi gen opsin pada kromosom X	Menjelaskan pola pewarisan terkait kromosom X

Skema Integrasi genetika klasik dan molekuler disajikan pada gambar berikut.



Gambar 5. Skema Integrasi genetika klasik dan molekuler

DAFTAR PUSTAKA

- Acquaah, G., 2012. Principles of Plant Genetics and Breeding (2nd ed.). Wiley-Blackwell, New Jersey.
- Alberts, B., Johnson, A., Lewis, J., Morgan, D., Raff, M., Roberts, K., Walter, P., 2015. Molecular Biology of the Cell (6th ed.). Garland Science, New York.
- Allard, R.W., 1999. Principles of Plant Breeding (2nd ed.). John Wiley & Sons, New Jersey.
- Brown, T.A., 2016. Genomes 4. Garland Science, New York.
- Campbell, N.A., Reece, J.B., 2017. Biology (10th ed.). Pearson Education, San Francisco.
- Fehr, W.R., 1987. Principles of Cultivar Development: Theory and Technique. Macmillan Publishing, New York.
- Freeman, S., Herron, J.C., 2014. Evolutionary Analysis (5th ed.). Pearson Education, Boston.
- Futuyma, D.J., 2013. Evolution (3rd ed.). Sinauer Associates, Sunderland, MA.
- Griffiths, A.J.F., Wessler, S.R., Carroll, S.B., Doebley, J., 2015. Introduction to Genetic Analysis (11th ed.). W. H. Freeman and Company, New York.
- Hartl, D.L., Clark, A.G., 2010. Principles of Population Genetics (4th ed.). Sinauer Associates, Sunderland, MA.
- Hartwell, L.H., 2015. Genetics: From Genes to Genomes (5th ed.). McGraw-Hill Education, New York.
- Klug, W.S., Cummings, M.R., Spencer, C.A., Palladino, M.A., Killian, D.J., Gonzalez, S., 2019. Concepts of Genetics (12th ed.). Pearson Education, New York.
- Pierce, B.A., 2020. Genetics: A Conceptual Approach (7th ed.). W. H. Freeman and Company, New York.
- Poehlman, J.M., Sleper, D.A., 1995. Breeding Field Crops (4th ed.). Iowa State University Press, Iowa.
- Ridley, M., 2004. Evolution (3rd ed.). Blackwell Publishing, Malden, MA.
- Snustad, D.P., Simmons, M.J., 2012. Principles of Genetics (6th ed.). John Wiley & Sons, New Jersey.
- Soeranto, H., Herman, M., 2009. Pemuliaan Tanaman secara Konvensional dan Mutasi. BATAN Press, Jakarta Selatan.

- Syukur, M., Sujiprihati, S., Yuniarti, R., 2015. Teknik Pemuliaan Tanaman. IPB Press, Bogor.
- Watson, J.D., Baker, T.A., Bell, S.P., Gann, A., Levine, M., Losick, R., 2014. Molecular Biology of the Gene (7th ed.). Pearson Education, San Francisco.
- Zuzuki, D.T., Griffiths, A.J.F., Lewontin, R.C., 1981. An Introduction to Genetic Analysis (Second Eds.). W.H. Freeman and Company, San Francisco.

BAB 3

KULTUR JARINGAN

DALAM PRODUKSI BENIH

Oleh: Rina Puji Lestari

3.1 Prinsip Dasar Kultur Jaringan

Kultur jaringan merupakan salah satu metode pemuliaan tanaman yang sudah muncul sejak tahun 1950-an. Kultur jaringan atau yang sering disebut dengan *Plant Tissue Culture* merupakan salah satu teknik yang dapat digunakan untuk memperbanyak tanaman secara *in vitro* dengan menumbuhkan sel, jaringan, ataupun organ tanaman dalam kondisi lingkungan yang steril dengan menggunakan media nutrisi buatan. Perbanyak tanaman yang dilakukan dengan menggunakan kultur jaringan ini memungkinkan memperbanyak tanaman secara cepat dalam kondisi lingkungan yang terkendali sehingga dapat meningkatkan produktivitas tanaman. Teknik dalam kultur jaringan pada dasarnya memanfaatkan prinsip totipotensi sel tumbuhan. Totipotensi merupakan kemampuan dari sel itu sendiri untuk regenerasi menjadi tanaman yang lengkap pada kondisi lingkungan yang sesuai. Prinsip-prinsip dasar yang digunakan dalam kegiatan kultur jaringan yaitu:

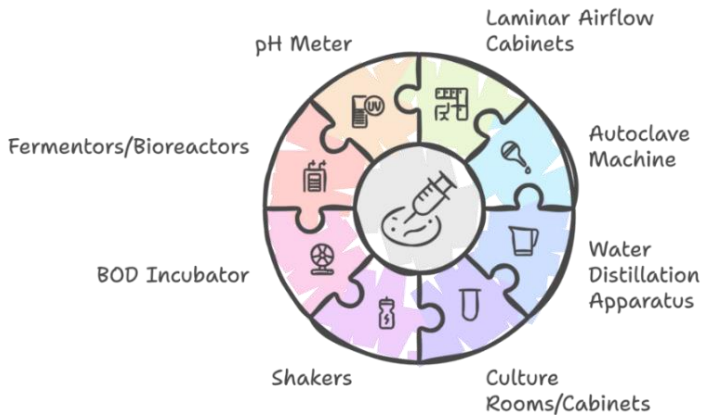
a. Totipotensi dan plastisitas

Totipotensi merupakan kemampuan dari setiap sel tanaman untuk tumbuh dan berkembang menjadi individu baru lagi secara lengkap dan utuh. Pada dasarnya setiap sel memiliki informasi genetik yang lengkap, sehingga mampu untuk berkembang dan tumbuh pada kondisi yang tepat. Plastisitas merupakan kemampuan sel untuk menyesuaikan metabolisme dan perkembangan berdasarkan dengan kondisi lingkungan dengan menunjukkan fleksibilitas sehingga memungkinkan terjadinya diferensiasi.

b. Aseptis (Steril)

Aseptis merupakan suatu kondisi lingkungan yang bersih dan steril tanpa adanya mikroorganisme. Mikroorganisme dapat menghambat kultur tanaman. Kondisi steril dan aseptis ini merupakan hal wajib dalam kegiatan kultur baik dari segi eksplan, media ataupun ruangan harus bebas dari adanya kontaminasi. Semua peralatan dan media kultur harus disterilkan dengan menggunakan autoklaf, alkohol ataupun *Laminar Air Flow* (LAF).

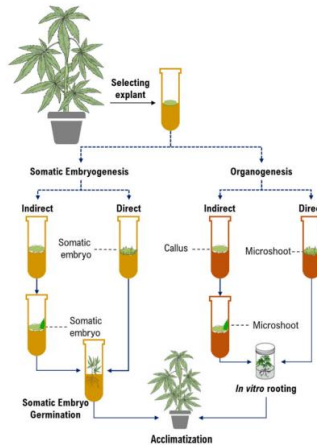
Essential Equipment for Plant Tissue Culture



Gambar 6. Perlengkapan Alat untuk Kultur Jaringan Tanaman

c. Media Kultur

Media tanam yang digunakan dalam proses kultur jaringan yaitu media buatan yang dibuat dari air, sukrosa 2-3% (sebagai sumber karbon), agar-agar (sebagai pematat media), hara makro (N, P, K, Ca, Mg, S) dan mikro (Fe, Mn, Zn, B, Cu, Mo), vitamin (tiamin, niasin, piridoksin, myoinositol) dan juga zat pengatur tumbuh (ZPT) atau regulator tanaman seperti hormon auksin dan sitokinin yang digunakan untuk menentukan bentuk regenerasi. Eriksson, (2022) menjelaskan bahwa pemberian ratio yang seimbang pada ZPT akan memungkinkan pembentukan *callus* pada eksplan. Terdapat berbagai jenis media yang digunakan dalam kultur jaringan, menurut (Shahzad et al., 2017) media jenis *Murashige and Skoog* (MS) merupakan salah satu media standar yang sering dan banyak digunakan dalam proses kultur jaringan.



Gambar 7. Skema Prosedur Kultur Jaringan Tanaman

d. Ruang yang terkendali

Dalam praktek kultur jaringan memerlukan kondisi lingkungan yang terkendali seperti pengaturan suhu ruangan berkisar suhu ($24-27^{\circ}\text{C}$) dan intensitas cahaya yang cukup (16 jam penyinaran) dan kelembapan yang konsisten (50-60%) untuk mengoptimalkan pertumbuhan dan proses diferensiasi.

3.2 Teknik Regenerasi Tanaman *In Vitro*

Ada beberapa tahapan dalam proses kultur jaringan

a. Tahap Persiapan/ Preparasi eksplan

Salah satu hal yang dilakukan dalam menentukan bahan tanam/ *mother plant* yaitu memilih indukan tanaman yang sehat bebas dari penyakit. Hal yang dilakukan dalam persiapan kultur salah satunya yaitu mempersiapkan bahan tanam yang akan dijadikan eksplan seperti bagian tunas, daun, nodus ataupun akar. Bagian tanaman yang diambil kemudian disterilisasi terlebih dahulu dengan cara dicuci pada air mengalir dengan menggunakan sabun kemudian disterilisasi lagi menggunakan alkohol 70% atau bisa juga dengan menggunakan desinfektan NaOCl 0,5-2% atau HgCl_2 . Sterilisasi juga bisa menggunakan bahan fungisida seperti Bavistin/ Carbendazim atau bakterisida disesuaikan dengan kebutuhan sterilisasi dan jenis eksplan yang akan digunakan. Eksplan harus dibilas sampai bersih sebelum

masuk ke dalam *Laminar Air Flow*. Selain mempersiapkan bahan tanam, media juga perlu disiapkan terlebih dahulu. Media yang biasanya digunakan adalah jenis media MS. Komposisi media MS terdiri dari:

- 1) Makronutrien, terdiri dari N, P, K, Ca, Mg, S
- 2) Mikronutrien, terdiri dari Fe, Mn, Zn, B, Cu, Mo, Co
- 3) Vitamin, terdiri dari tiamin (B1), niasin, piridoksin, myoinositol
- 4) Sumber karbo berupa sukrosa 20-30 g/L (2-3%)
- 5) Pematat berupa agar 6-8 g/L
- 6) pH media diatur pada kisaran 5,7-5,8

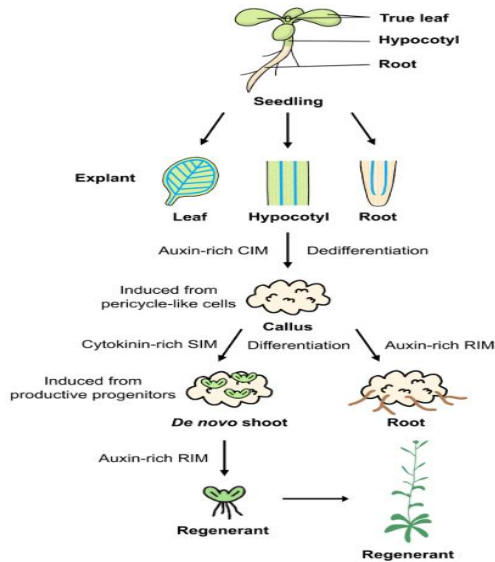
Plant Growth Regulator (PGR) sebagai hormon pertumbuhan berperan penting dalam proses organogenesis. Sitokinin (BAP, kinetin, zeatin) memiliki peran untuk merangsang pertumbuhan tunas dan proliferasi tunas. Auksin (IAA, IBA, NAA, 2,4D) berperan dalam pembentukan akar dan kalus. Perbandingan pada komposisi yang seimbang antara sitokinin dan auksin akan menentukan morfogenesis tanaman yang berupa akar, tunas dan kalus. Setelah media kultur jadi, kemudian disterilisasi pada autoklaf 121°C 1 bar, selama 15-20 menit. Peralatan kecil seperti cawan, pisau, tabung, scalpel juga perlu disterilkan kemudian disimpan dalam kondisi terbungkus dalam oven atau lemari kaca.

b. Tahap Inisiasi

Setelah memilih bagian dari tanaman yang akan digunakan sebagai eksplan, tahap selanjutnya yaitu inisiasi. Tahap ini merupakan tahapan eksplan ditanam pada media padat dalam kondisi steril biasanya dilakukan di dalam *Laminar Air Flow* (LAF). Ruang penyimpanan harus steril dan terkontrol. Hasil tanam biasanya bisa dilihat setelah 1-4 minggu.

c. Tahap Multiplikasi

Multiplikasi merupakan tahap perbanyak tanaman. Multiplikasi dilakukan dengan cara memindahkan planlet atau *callus* ke media baru. Planlet yang dipindahkan sudah berumur 3-4 minggu. Tujuan dipindah ke media baru yaitu untuk memenuhi nutrisi sehingga dapat mengoptimalkan pertumbuhan eksplan yang ditanam.



Gambar 8. Skema Regenerasi dalam Kultur Jaringan Tanaman

d. Organogenesis

Organogenesis merupakan proses pembentukan organ seperti tunas, daun ataupun akar pada eksplan. Biasanya setelah muncul tunas tahap selanjutnya yaitu *elongasi* dan *rooting* yaitu pembentukan akar planlet. Untuk memunculkan akar, maka planlet dipindah pada media baru seperti media MS yang sudah ditambah dengan IBA atau NAA pada dosis 0,2-1 mg/L. Akar biasanya akan muncul kisaran 2-4 minggu setelah pindah tanam.

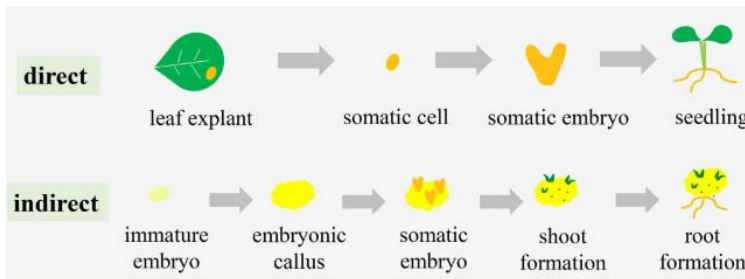
e. Aklimatisasi

Aklimatisasi merupakan proses pemindahan planlet dari media kultur yang terkendali pada media tanam yang ditempatkan di *greenhouse*. Hal yang harus diperhatikan dalam proses aklimatisasi adalah kelembaban yang tinggi. Biasanya planlet yang baru dipindah dan disungkup dengan menggunakan plastik dan dibuka secara bertahap untuk proses adaptasi terhadap lingkungan sekitar.

3.3 Aplikasi Kultur Jaringan dalam Perbanyakan Benih

Kultur jaringan dapat dimulai langsung menggunakan biji atau embrio, tidak hanya menggunakan eksplan berupa vegetatif tanaman. Teknik ini

memungkinkan sekali untuk proses memperbanyak benih secara cepat, bersih dan seragam terutama untuk tanaman yang sulit berkecambah secara alami. Dalam proses regenerasi *in vitro* melibatkan dua jalur, yaitu jalur organogenesis dan embrio somatik. Keberhasilan *in vitro* bergantung pada eksplan yang digunakan. Selain eksplan, hormon dan media tanam, kondisi lingkungan juga berpengaruh terhadap keberhasilan *in vitro*. Menurut (Long et al., 2022) organogenesis merupakan suatu proses pembentukan organ baik berupa tunas atau akar dari eksplan yang digunakan tanpa melalui pembentukan kalus. Tunas dan akar akan terbentuk langsung dari eksplan misalnya dari eksplan yang menggunakan nodus atau meristem. Sedangkan embrio somatik merupakan proses pembentukan embrio dari sel somatik atau melalui pembentukan kalus (Bull & Michelmores, 2022). Pada umumnya pembentukan kalus ini dipengaruhi oleh penambahan auksin yang tinggi kemudian setelah terbentuk kalus akan dipindah pada media yang sudah ditambah dengan sitokinin untuk menghasilkan tunas nantinya.

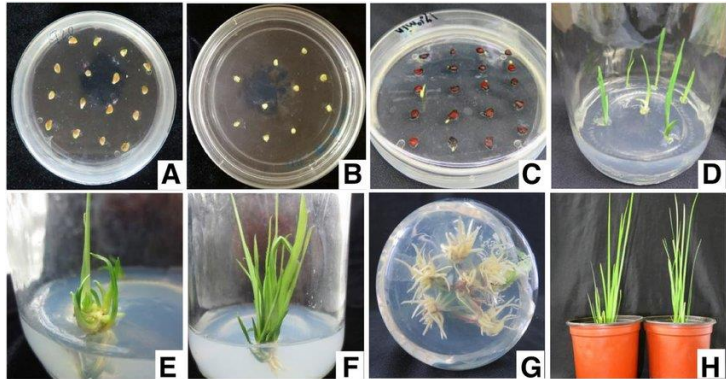


Gambar 9. Proses Embrio Somatik secara Langsung dan Embrio Somatik Tidak Langsung Melalui Pembentukan Kalus

Perbanyak benih yang dilakukan melalui kultur jaringan merupakan metode yang memanfaatkan totipotensi sel tumbuhan untuk dapat memperbanyak tanaman dalam kondisi yang steril. Kultur embrio biasanya digunakan untuk membantu pemulihan hibrida dan biji yang rekalsitran. Teknik ini merupakan penggabungan inisiasi kultur biji/embrio, proliferasi tunas, perakaran dan aklimatisasi planlet. Tahapan-tahapan dalam kultur benih adalah:

- a. Inisiasi dari benih atau embrio, biji disterilkan terlebih dahulu dengan menggunakan NaOCl 1-2% selama 10-15 menit. Biji yang sudah disterilisasi kemudian ditanam pada media MS atau (1/2 MS + sukrosa 2-3%) kemudian ditunggu hingga 1-2 minggu untuk waktu

perkecambahan. Pada *Iris sanguinea* induksi tunas adventif dari biji steril akan tumbuh berkecambah pada waktu 20-40 HST yang bertempat di *greenhouse*.



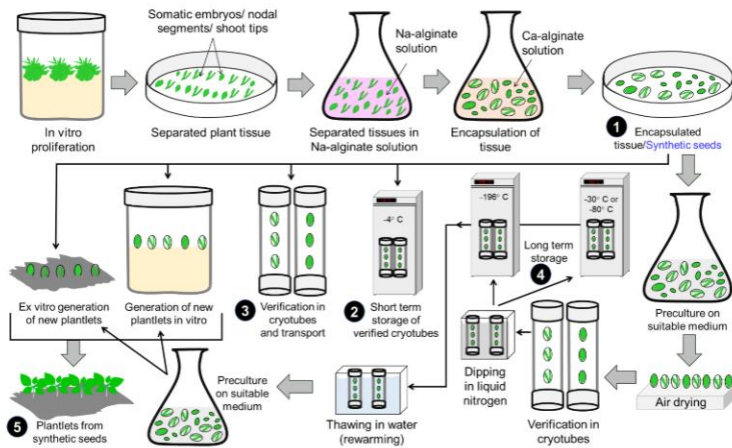
Gambar 10. Proses Tahapan Kultur Jaringan Menggunakan Biji

- b. Proliferasi dan multiplikasi, dimana tunas yang sudah muncul dan tumbuh disubkultur pada media MS + BAP (1-2 mg/L) dan penambahan NAA/IBA untuk pembentukan kalus dan akar jika diperlukan. Waktu untuk subkultur dilakukan setiap 3-4 minggu.
- c. Induksi perakaran dilakukan dengan cara memindahkan tunas planlet ke media perakaran. Media yang digunakan biasanya media MS dengan penambahan IBA/ NAA 0,2-2 μ M. Akar akan terbentuk setelah berumur 2-4 minggu setelah tanam.
- d. Aklimatisasi dilakukan dengan cara memindah planlet ke media pot yang sudah diisi dengan media tanam yang steril. Kemudian dilakukan penyungkupan dengan menggunakan plastik untuk menjaga kondisi kelembaban. Suhu pada aklimatisasi berkisar 25-30°C. Pelepasan sungkup dilakukan secara bertahap sampai dengan survivabilitas mencapai 80-95%.

Biji sintesis (*synthetic seed*) dapat dihasilkan dengan cara penyintesisan benih dari *somatic embryo* atau tunas yang dikapsulasi alginat (2-3% Na-alginate + CaCl_2 50-100 mM). Kelebihan dilakukannya perbanyakan tanaman melalui kultur benih yaitu :

- 1) Produksi dapat dilakukan dalam waktu cepat dan seragam, benih bersifat bebas dari patogen.

- 2) Kultur benih juga dapat meningkatkan keberhasilan hibridisasi antar spesies.
- 3) *Synthetic seed (alginate-encapsulated somatic embryo)* dapat memudahkan penyimpanan dan proses distribusi benih.
- 4) Menjamin kualitas dan *health material* benih.
- 5) Mendukung tercapainya konservasi tanaman langka seperti pada *Leptospermum* spp. dan pohon apel *rootstock* M.26 yang menunjukkan keberhasilan tingkat konservasi 25-100%.



Gambar 11. Produksi dan Aplikasi Benih Sintetis. Produksi Benih Sintetis (1), Penyimpanan Jangka Pendek Benih Sintetis (2), Benih Sintetis untuk Transportasi (3), Penyimpanan Jangka Panjang Benih Sintetis (4), dan Pembentukan Planlet dari Benih Sintetis (5).

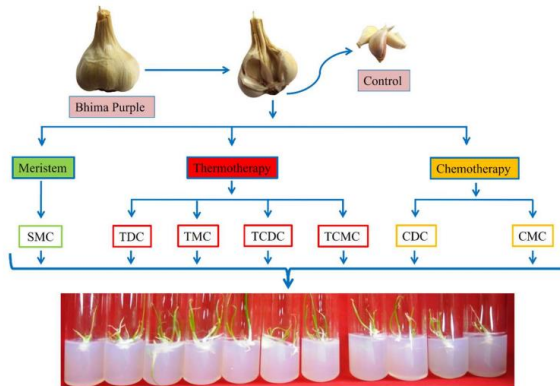
3.4 Eliminasi Patogen dan Produksi Benih Sehat

Patologi benih merupakan cabang ilmu fitopatologi yang fokus mempelajari penyakit yang menyerang pada benih, termasuk gangguan fungsi benih. Konsep benih sehat berarti biji yang akan digunakan sebagai benih atau bahan tanam harus bebas dari infeksi atau kontaminasi patogen baik jamur, bakteri ataupun virus. Eliminasi patogen pada benih adalah kunci untuk menghasilkan benih yang bermutu tinggi. Benih yang sehat dan bebas patogen merupakan prasyarat produksi pangan yang berkelanjutan untuk mencegah penyebaran penyakit dan menjaga hasil panen yang optimal. Pada umumnya, penyebaran patogen melalui benih bergantung pada karakteristik patogen dan

interaksinya dengan benih. Patogen yang tertanam dalam embrio sulit dihapus dengan perlakuan permukaan saja, sehingga menimbulkan tantangan dalam produksi benih sehat. Oleh karena itu, penting untuk memilih metode eliminasi yang tepat.

Metode laboratorium untuk eliminasi patogen dapat dilakukan melalui kultur jaringan khususnya kultur tunas pucuk (*shoot meristem culture*) untuk menghilangkan virus dan patogen intraseluler dari materi tanaman induk. Karena virus tidak menyebar merata ke seluruh tumbuhan, meristem apikal yang sangat kecil sering bebas virus. Dengan mengisolasi dan mengkultur meristem pada media steril, tanaman baru yang bebas virus bisa dihasilkan. Penelitian (Vivek & Modgil, 2018) pada apel varietas Oregon Spur II penerapan kultur meristem pada ukuran 0,3-0,6 mm setelah proses termoterapi 37-40 °C selama 4 minggu berhasil mengeliminasi empat virus utama yaitu *Apple Chlorotic Leaf Spot Virus* (ACLSV), *Apple Mosaic Virus* ApMV, *Apple Stem Grooving Virus* (ASGV), *Apple Stem Pitting Virus* (ASPV) yang terdapat dalam tanaman unggul tersebut. Kultur jaringan juga memudahkan multiplikasi dalam jumlah besar bibit bebas patogen dan dapat mempertahankan keseragaman genetika.

Termoterapi (pemanasan) dan kemoterapi (perlakuan kimiawi) sering digabungkan dengan kultur jaringan untuk meningkatkan efektivitas menghilangkan virus pada tanaman. Termoterapi dapat dilakukan dengan cara memanaskan tanaman inang atau benih pada suhu tinggi namun subletal 37-40 °C selama beberapa minggu, sehingga dapat menekan replikasi virus tanpa mematikan tanaman. Setelah itu meristem biasanya diambil untuk dikulturkan. Kemoterapi menggunakan tambahan agen antivirus misalnya seperti ribavirin ke media kultur sehingga dapat menghambat virus selama inisiasi kultur. Penggabungan keduanya merupakan hal yang efektif. Penelitian yang dilakukan (Benke et al., 2023) menunjukkan bahwa kombinasi termoterapi dan kemoterapi dengan meristem kultur (TCMC) menghasilkan klon bawang putih bebas virus *Garlic Common Latent Virus* (GCLV), *Shallot Latent Virus* (SLV) dan OYDV dengan tingkat regenerasi bibit 66%. Secara umum, metode ini dapat meningkatkan frekuensi eliminasi virus dibandingkan dengan kultur meristem biasa.

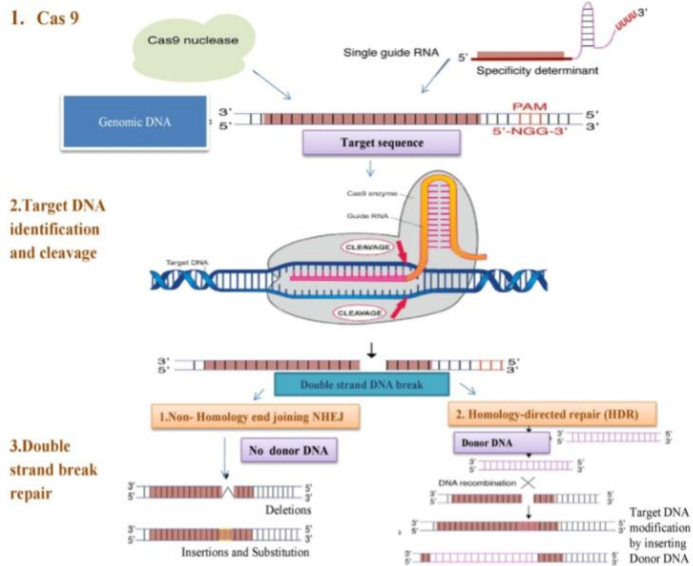


Gambar 12. Regenerasi Tanaman dan Deteksi Virus pada Bawang Putih.

Setelah perlakuan eliminasi di laboratorium, diperlukan penapisan molekuler/ serologis untuk memastikan bibit bebas patogen. Metode deteksi cepat seperti ELISA (*Enzyme- Linked Immunosorbent Assay*) dan PCR (*Polymerase Chain Reaction*) sudah banyak digunakan. ELISA dapat mendeteksi protein spesifik virus, sedangkan PCR dapat mendeteksi DNA/ RNA patogen. Sebagai contoh kultur jaringan apel diatas, tunas hasil kultur diujikan ELISA untuk memverifikasi virus. Sedangkan dalam bawang putih, multiplex PCR digunakan sebagai virus indexing untuk menguji hilangnya virus pada regeneran hasil kultur. ELISA/ PCR hanya bisa mendeteksi keberadaan patogen termasuk patogen yang mati. Maka dari itu, pada sertifikasi benih hasil positif dari ELISA/ PCR sering dikonfirmasi dengan uji infektivitas seperti inokulasi pada tanaman indikator.

Perkembangan teknologi membuka metode baru dalam deteksi patogen dan peningkatan ketahanan genetik tanaman seperti diagnostik molekuler tingkat lanjut. Teknik mutakhir seperti PCR waktu nyata (qPCR), LAMP (*Loop- mediated Isothermal Amplification*) dan *High-Throughput Sequencing* (HTS/ NGS) mulai digunakan untuk screening benih. Pengaplikasian agens hayati (mikroorganisme antagonis) dan biopestisida pada benih seperti *Pseudomonas fluorescens*, *Trichoderma harzianum* juga berkembang untuk meningkatkan resistensi alamiah benih terhadap patogen. Genetika molekuler tanaman induk dimodifikasi misalnya melalui *genomic selection* untuk menanam gen resistensi terhadap patogen tertentu. CRISPR/Cas9 dan rekayasa genetik merupakan salah satu terobosan terbaru dalam rekayasa ketahanan tanaman terhadap patogen. Sistem CRISPR dapat menarget langsung genom virus atau

gen inang sensitif, kemudian memotong DNA/ RNA patogen atau menonaktifkan gen yang memudahkan infeksi. Selain itu, masih ada teknologi hybrid dan canggih lainnya seperti biosensor berbasis nanoteknologi untuk mendeteksi cepat patogen benih dan penggunaan sistem *tracking* berbasis *blockchain* untuk menjamin keaslian benih bersertifikat.



Gambar 13. CRISPR/Cas9 untuk Penyuntingan Genom Tanaman

3.5 Mikropropagasi dan Kloning Genetik

Menurut (Hasnain et al., 2022) mikropropagasi merupakan teknik perbanyakan tanaman yang dilakukan secara vegetatif secara *in vitro* dengan menggunakan jaringan ataupun sel tanaman dalam kondisi aseptik dan dilakukan di laboratorium kultur jaringan. Teknik ini memanfaatkan media buatan yang kaya nutrisi serta hormon pertumbuhan untuk merangsang pertumbuhan dan perkembangan dari eksplan. Keunggulan mikropropagasi diantaranya yaitu bersifat konsisten genetik, produksi cepat dan masif, dapat dilakukan sepanjang tahun, menghasilkan benih bebas virus dan patogen serta tidak memerlukan lahan yang luas. Akan tetapi mikropropagasi juga memiliki beberapa kendala seperti biaya yang cukup tinggi, memerlukan keahlian teknis

yang tinggi, memiliki risiko kontaminasi yang tinggi dan dapat terjadi variasi somaklonal (perubahan genetik yang tidak diinginkan).

Kloning genetik merupakan proses pembuatan salinan yang identik dari gen, sel ataupun organisme secara buatan. Kloning genetik mencangkup teknik-teknik rekayasa genetik yang menghasilkan salinan DNA. Pada tanaman akan menghasilkan tanaman baru yang memiliki susunan genetik yang identik dengan induknya. Tujuan kloning genetik yaitu untuk melestarikan sifat unggul tanaman seperti tahan penyakit, produktivitas tinggi dan waktu panen yang cepat yang sulit dicapai lewat pemuliaan konvensional. Teknologi ini memungkinkan sekali untuk penanaman sifat unggul secara lebih cepat dan terarah dibandingkan dengan persilangan tradisional. Kloning juga bermanfaat untuk meneliti fungsi gen tertentu, memproduksi senyawa bernilai tinggi secara bioteknologi dan mendapatkan tanaman transgenik dengan sifat baru. Sebagai contoh, *genome editing* CRISPR telah digunakan untuk mempercepat perbaikan sifat tanaman pangan sehingga menghasilkan varietas dengan nutrisi yang lebih baik dan ketahanan penyakit yang meningkat. Secara umum, kloning genetik membuka peluang eksplorasi gen dari sumber manapun misalnya gen dari spesies lain atau mikroba untuk diperbaiki dalam tanaman target. Kloning dapat dilakukan dengan menggunakan beberapa metode, seperti kloning vegetatif, kloning molekuler, transformasi genetik dan produksi tanaman transgenik. Kloning vegetatif dilakukan dengan mikropopagasi untuk mendapatkan tanaman yang identik. Mikropopagasi secara umum mencangkup beberapa tahapan yaitu:

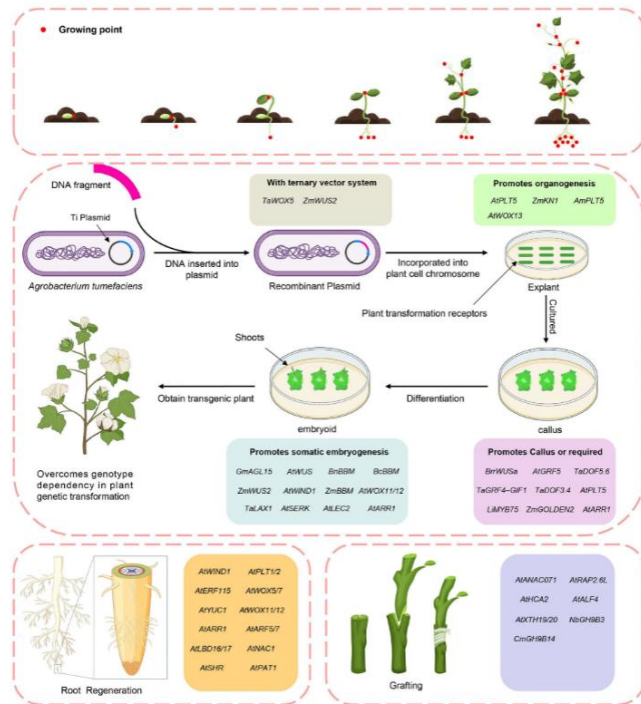
- a. Inisiasi, dimana eksplan misalnya menggunakan ujung batang atau mata tunas disterilkan terlebih dahulu kemudian dipotong menjadi bagian yang lebih kecil kemudian ditempatkan pada media kultur steril. Tahapan ini bertujuan untuk mendapatkan jaringan tanaman yang bersih dari mikroba dan mulai tumbuh di media *in vitro*.
- b. Multiplikasi, setelah berhasil melalui proses inisiasi, hormon sitokinin ditambahkan untuk merangsang pembentukan tunas baru dari eksplan. Setiap tunas baru ini nantinya merupakan salinan genetik dari tanaman induknya, sehingga dapat diperbanyak menjadi banyak individu yang seragam.
- c. Perakaran, tunas hasil multiplikasi kemudian dipindah ke media yang kaya akan auksin untuk merangsang pembentukan akar. Setelah akar terbentuk tunas akan berkembang menjadi planlet yang lengkap dengan daun dan akar.

- d. Aklimatisasi, planlet yang sudah berakar dipindahkan secara bertahap ke media semi terbuka dengan kondisi lingkungan yang terkontrol. Proses ini penting agar tanaman dapat beradaptasi dengan kondisi lingkungan luar secara perlahan sebelum ditanam di lahan.

Kloning molekuler dilakukan dengan cara mengisolasi gen tertentu dan menyisipkannya ke vektor plasmid. Vektor kemudian dimasukkan ke dalam sel inang yang biasanya berupa bakteri atau sel tanaman. Sel inang nantinya akan memperbanyak gen yang telah disisipkan. Kloning gen merupakan proses yang melibatkan isolasi dan penggandaan gen target. Gen target ini diiris menggunakan enzim restriksi dan dimasukkan ke dalam vektor plasmid yang telah dibelah dengan menggunakan enzim sejenis dan akan membentuk DNA rekombinan. Vektor rekombinan kemudian ditransformasikan ke dalam bakteri dan dikloning untuk menghasilkan salinan gen secara berlimpah. Teknik ini memudahkan penyimpanan, analisis dan penyisipan gen ke tanaman tujuan selanjutnya. Transformasi genetik dapat dilakukan dengan menggunakan teknik seperti penggunaan bakteri pembawa DNA (*Agrobacterium tumefaciens*), dimana dilakukan penyisipan gen asing (transgen) ke dalam genom tanaman sehingga menghasilkan tanaman transgenik baru. *Agrobacterium tumefaciens* secara alami mampu menginfeksi tanaman dan memasukkan DNA Plasmid T-nya ke dalam sel tanaman. Plasmid T tersebut direkayasa membawa gen baru sehingga setelah infeksi gen asing dapat terintegrasi ke kromosom tanaman. Selain menggunakan *Agrobacterium*, metode fisik seperti biolistik atau penembakan mikropartikel DNA juga digunakan untuk mentransfer DNA sel ke tanaman yang resisten terhadap infeksi bakteri. Produksi tanaman secara transgenik akan menerima dan mengekspresikan gen asing rekombinan yang akan tumbuh dan memiliki sifat baru nantinya. Sementara itu, menurut Saini et al., (2023) CRISPR/Cas9 diidentifikasi sebagai sistem pengeditan genom yang sangat kuat untuk akselerasi pemuliaan tanaman. Teknik CRISPR/Cas9 ini adalah sistem penyuntingan gen presisi yang menggunakan kompleks Cas9 dan guide RNA (gRNA) untuk menargetkan lokasi spesifik pada DNA tanaman. Cas9 akan memotong DNA di lokasi target kemudian sel tanaman akan memperbaikinya. Nantinya akan dihasilkan mutasi atau penyisipan yang diinginkan. Salah satu kelebihan CRISPR/Cas9 adalah kemampuannya merekayasa mutasi dengan akurasi yang tinggi serta efisiensi yang lebih baik dibanding dengan metode transgenik tradisional.

Tabel 9. Kelebihan dan Kekurangan Teknik Mikropropagasi dan Kloning Genetik

	Mikropropagasi	Kloning Genetik (Transgenik/CRISPR)
Kelebihan	Produksi massal bibit seragam dalam waktu singkat	Dapat menciptakan sifat baru (misalnya resistensi penyakit atau peningkatan kualitas) yang tidak tersedia pada populasi tanaman asal.
	Tanaman bersifat identik secara genetik dengan induknya sehingga karakter unggul tetap terjaga.	Aplikasi yang sangat tepat sasaran dengan metode seperti CRISPR untuk mengoptimalkan karakter tertentu.
	Mendukung eks-situ konservasi spesies langka.	Mempercepat program pemuliaan tanpa kawin silang tradisional.
Kekurangan	Membutuhkan fasilitas laboratorium yang mahal dan proses aseptik membutuhkan biaya tinggi	Proses teknis dan biaya tinggi (misalnya konstruksi vektor, transformasi, regenerasi tanaman).
	Tidak memperkenalkan variabilitas genetik baru, hanya menggandakan gen yang sudah ada, terjadinya variasi somaklonal	Potensi efek <i>off-target</i> (terutama dengan CRISPR) dapat menimbulkan mutasi yang tidak diinginkan
	Tidak semua spesies mudah dikultur, beberapa tanaman sulit berakar di media in vitro.	Isu regulasi dan sosial: tanaman hasil modifikasi genetik menghadapi pengawasan ketat dan menimbulkan skeptisisme masyarakat di banyak negara.



Gambar 14. Tahapan dalam Transformasi Genetik Tanaman

Kloning memiliki kelebihan dalam hal pemeliharaan sifat genetik unggul secara konsisten. Selain itu dapat melakukan produksi massal gen atau produk turunannya seperti protein, enzim dan vaksin. Kloning juga dapat meningkatkan kualitas dan kuantitas hasil pertanian. Akan tetapi, disatu sisi kloning juga dapat menyebabkan risiko atau kekhawatiran dikarenakan variasi genetik yang rendah dapat menyebabkan kerentanan terhadap hama dan penyakit. Hal tersebut pastinya akan mengganggu ekosistem lingkungan. Disatu sisi, regulasi dan penerimaan publik yang masih terbatas dan masalah etik pada tanaman transgenik.

Mikropropagasi telah banyak diaplikasikan dalam pertanian. Seperti pada kultur jaringan anggrek dan buah-buahan pisang, jeruk dan strawberry memungkinkan adanya perbanyakan bibit secara cepat dan seragam. Bibit pisang dan kentang dapat diperbanyak secara *in vitro* agar bebas penyakit dan virus dan aman untuk ditanam skala luas. Mikropropagasi mendukung

konservasi plasma nutfah spesies langka atau yang terancam punah agar dapat diperbanyak di laboratorium kemudian ditanam kembali ke habitatnya. Di Indonesia contoh dari tanaman transgenik masih sangat terbatas, meskipun demikian penelitian global sukses mengembangkan pepaya transgenik tahan virus *ringspot* (PRSV) di Hawaii. Selain itu, CRISP/Cas9 telah digunakan untuk meningkatkan ketahanan tanaman terhadap virus dan patogen lewat penyuntingan gen yang terlibat dalam mekanisme respon tanaman. Potensi aplikatif lainnya adalah perbaikan sifat fisiologis, seperti toleransi terhadap kekeringan atau peningkatan hasil panen.

Mikropropagasi menghadapi tantangan teknis berupa kebutuhan kultur aseptik yang memerlukan biaya operasional laboratorium tinggi. Kesulitannya mencakup penanganan eksplan yang steril, pengendalian kontaminan, serta optimasi media untuk setiap jenis tanaman. Tantangan inilah yang harus diatasi agar skala industri kultur jaringan dapat dilakukan secara berkelanjutan. Inovasi penggunaan benih sintetis dan penyempurnaan teknik pada proses aklimatisasi juga menjadi penting untuk memperluas aplikasi mikropropagasi pada tanaman yang selama ini sulit dikultur. Tantangan utama kloning genetik adalah pada target pengeditan CRISPR serta regulasi pada organisme hasil rekayasa genetik. Selain itu, publik masyarakat belum sepenuhnya menerima adanya inovasi baru ini. Pemerintah dan lembaga riset dunia pastinya akan menyusun regulasi baru yang lebih adaptif terhadap teknologi ini. CRISPR/Cas9 diyakini memiliki potensi besar dalam merevolusi sektor pertanian dengan pengembangan varietas unggul secara cepat dan tepat sasaran.

DAFTAR PUSTAKA

- Abacı, A. K., Güler, B., & Gürel, A. 2025. Effect of Medium Compositions and Different Culture Conditions on the Physiological Properties and Clonal Micropropagation of *Ficus carica* L. cv. Sarılop Plant. *Arabian Journal for Science and Engineering*.
- Bautista-Montes, E., Hernández-Soriano, L., & Simpson, J. 2022. Advances in the Micropropagation and Genetic Transformation of Agave Species. In *Plants* (Vol. 11, Issue 13). MDPI.
- Benke, A. P., Krishna, R., Khandagale, K., Gawande, S., Shelke, P., Dukare, S., Dhumal, S., Singh, M., & Mahajan, V. 2023. Efficient Elimination of Viruses from Garlic Using a Combination of Shoot Meristem Culture, Thermotherapy, and Chemical Treatment. *Pathogens*, 12(1).
- Bull, T., & Michelmores, R. 2022. Molecular Determinants of in vitro Plant Regeneration: Prospects for Enhanced Manipulation of Lettuce (*Lactuca sativa* L.). In *Frontiers in Plant Science* (Vol. 13). Frontiers Media S.A.
- Chimdessa, E. 2020. Composition and Preparation of Plant Tissue Culture Medium. *Journal of Tissue Culture and Bioengineering*, 3(120), 1–10.
- Eriksson, H. 2022. Basic Principles of Plant Tissue Culture and its Applications. *Global Journal of Biochemistry and Biotechnology*, 10 (2), 1–2.
- Hasnain, A., Naqvi, S. A. H., Ayesha, S. I., Khalid, F., Ellahi, M., Iqbal, S., Hassan, M. Z., Abbas, A., Adamski, R., Markowska, D., Baazeem, A., Mustafa, G., Moustafa, M., Hasan, M. E., & Abdelhamid, M. M. A. 2022. Plants In Vitro Propagation with its Applications in Food, Pharmaceuticals and Cosmetic Industries; Current Scenario and Future Approaches. In *Frontiers in Plant Science* (Vol. 13). Frontiers Media S.A.
- Katana, J., Signorile Ospedale Ordine Mauriziano di Torino, F., Ouma, J. P., & Sadia Choudhary, A. 2024. Tissue Culture Techniques. *Researchgate*, 1–17.
- Lee, S., Park, Y. S., Rhee, J. H., Chu, H., Frost, J. M., & Choi, Y. 2024. Insights into plant regeneration: cellular pathways and DNA methylation dynamics. In *Plant Cell Reports* (Vol. 43, Issue 5). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH.
<https://doi.org/10.1007/s00299-024-03216-9>
- Long, Y., Yang, Y., Pan, G., & Shen, Y. 2022. New Insights Into Tissue Culture Plant-Regeneration Mechanisms. In *Frontiers in Plant Science* (Vol. 13). Frontiers Media S.A.

- Mehbub, H., Akter, A., Akter, M. A., Mandal, M. S. H., Hoque, M. A., Tuleja, M., & Mehraj, H. 2022. Tissue Culture in Ornamentals: Cultivation Factors, Propagation Techniques, and Its Application. In *Plants* (Vol. 11, Issue 23). MDPI.
- Rihan, H. Z., Kareem, F., El-Mahrouk, M. E., & Fuller, M. P. 2017. Artificial seeds (Principle, aspects and applications). In *Agronomy* (Vol. 7, Issue 4). MDPI AG.
- Saini, H., Thakur, R., Gill, R., Tyagi, K., & Goswami, M. 2023. CRISPR/Cas9-gene editing approaches in plant breeding. In *GM Crops and Food* (Vol. 14, Issue 1, pp. 1–17). Taylor and Francis Ltd.
- Shahzad, A., Sharma, S., Parveen, S., Saeed, T., Shaheen, A., Akhtar, R., Yadav, V., Upadhyay, A., & Ahmad, Z. 2017. Historical Perspective and Basic Principles of Plant Tissue Culture. In *Plant Biotechnology: Principles and Applications* (pp. 1–36). Springer Singapore.
- Tefera, A. A. 2019. Review on Application of Plant Tissue Culture in Plant Breeding. *Journal of Natural Sciences Research*, 9 (3), 20–25.
- Vivek, M., & Modgil, M. 2018. Elimination of viruses through thermotherapy and meristem culture in apple cultivar ‘Oregon Spur-II.’ *VirusDisease*, 29(1), 75–82.
- Wang, L., Du, Y., Rahman, M. M., Tang, B., Fan, L. J., & Kilaru, A. 2018. Establishment of an Efficient In Vitro Propagation System for *Iris sanguinea*. *Scientific Reports*, 8(1).
- Wang, P., Si, H., Li, C., Xu, Z., Guo, H., Jin, S., & Cheng, H. 2025. Plant genetic transformation: achievements, current status and future prospects. In *Plant Biotechnology Journal* (Vol. 23, Issue 6, pp. 2034–2058). John Wiley and Sons Inc.

BAB 4

TEKNOLOGI DNA REKOMBINAN

Oleh: Zahrotun Nafisah

4.1 Pendahuluan

Pertanian modern saat ini telah banyak memanfaatkan bioteknologi dalam mendukung peningkatan produktivitas dan kualitas hasil tanaman. Tantangan utama dalam pengembangan bioteknologi di bidang pertanian adalah bagaimana menghasilkan benih unggul yang tahan terhadap perubahan lingkungan, hama dan penyakit, serta memiliki nilai gizi tinggi. Pendekatan konvensional pada pemuliaan tanaman yang mengandalkan persilangan dan seleksi alam membutuhkan waktu yang lama dan seringkali mendapatkan hasil yang tidak konsisten. Berdasarkan permasalahan tersebut, diperlukan sebuah teknologi yang mampu melakukan modifikasi di tingkat gen secara lebih cepat, terarah, dan presisi. Oleh karena itu, teknologi DNA rekombinan adalah salah satu inovasi yang mendorong revolusi dalam dunia bioteknologi pertanian.

Teknologi DNA rekombinan atau yang biasa disebut sebagai rekayasa genetik adalah teknik yang memungkinkan rekayasa materi genetik suatu organisme dengan cara menggabungkan segmen DNA dari organisme lain untuk menghasilkan kombinasi genetik baru dengan keunggulan tertentu. Prinsip dasar bioteknologi ini melibatkan enzim-enzim tertentu seperti restriksi endonuklease, yang berfungsi untuk memotong segmen DNA, dan ligase, yang berfungsi menyambungkan DNA. Proses tersebut menghasilkan molekul DNA baru yang mengandung gen target sehingga disebut sebagai DNA rekombinan. Kemudian molekul tersebut dimasukkan ke dalam sel inang (*host cell*), berupa sel bakteri, ragi, atau tanaman, sehingga protein atau sifat baru yang diinginkan dapat diekspresikan dalam bentuk protein, proses ini disebut dengan ekspresi gen (Lodish *dkk.*, 2021; B Alberts *dkk.*, 2022; Bruce Alberts *dkk.*, 2022). Teknologi ini menawarkan teknik baru dalam pengembangan tanaman unggul yang tidak bisa dilakukan dengan teknik pemuliaan tanaman secara konvensional.

Dalam bidang pertanian, penerapan teknologi DNA rekombinan telah menghasilkan berbagai inovasi yang signifikan. Beberapa tanaman transgenik hasil dari penerapan teknologi ini adalah tanaman Bt yang tahan terhadap hama penggerek batang, kedelai tahan herbisida, serta *Golden Rice* yang diperkaya pro vitamin A. Melalui penyisipan gen-gen tertentu, tanaman

mendapatkan ketahanan terhadap cekaman ancaman biotik dan abiotik, mengurangi ketergantungan pada pestisida kimia, serta meningkatkan efisiensi dalam penggunaan sumber daya. Dengan demikian, teknologi DNA rekombinan berperan penting dalam mendukung produksi benih unggul yang berkelanjutan, memperkuat ketahanan pangan, dan mengoptimalkan hasil pertanian di berbagai kondisi lingkungan.

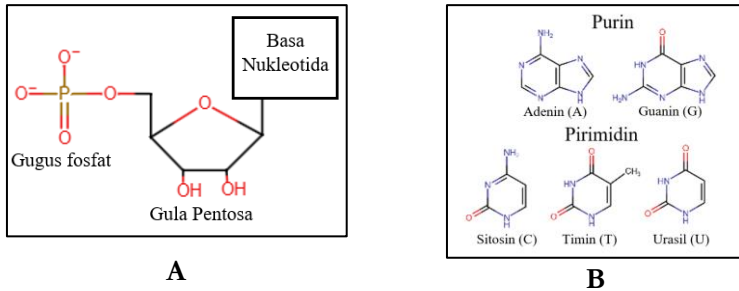
Bab ini akan membahas secara komprehensif prinsip dasar teknologi DNA rekombinan, komponen penting yang terlibat dalam prosesnya, serta tahapan utama dalam pembentukan DNA rekombinan dan transformasi genetik pada tanaman. Selain itu, akan diuraikan pula contoh penerapan teknologi ini dalam pengembangan benih unggul. Dengan pemahaman menyeluruh terhadap konsep dan aplikasi teknologi DNA rekombinan, diharapkan pembaca mampu memahami peran vital bioteknologi modern dalam menciptakan inovasi pertanian yang adaptif, produktif, dan ramah lingkungan.

4.2 Dasar-Dasar Teknologi DNA Rekombinan

4.2.1 Struktur Dasar DNA dan Gen

Deoxyribonucleic acid (DNA) merupakan molekul pembawa informasi genetik yang menjadi dasar pewarisan sifat pada makhluk hidup. DNA berfungsi mengatur sintesis protein, pertumbuhan, dan perkembangan organisme. Pemahaman mengenai struktur dan organisasi DNA menjadi fondasi utama dalam bioteknologi modern, khususnya dalam penerapan teknologi DNA rekombinan.

DNA tersusun atas unit dasar yang disebut nukleotida. Setiap nukleotida terdiri atas tiga komponen utama, yaitu gugus fosfat, gula deoksiribosa (gula pentosa), dan basa nitrogen (Gambar 15(A)). Basa nitrogen pada DNA terbagi menjadi dua kelompok, yaitu purin (adenin [A] dan guanin [G]) serta pirimidin (timin [T] dan sitosin [C]) (Gambar 15(B)). Basa purin memiliki dua cincin karbon-nitrogen, sedangkan basa pirimidin hanya memiliki satu cincin (Brown, 2016).



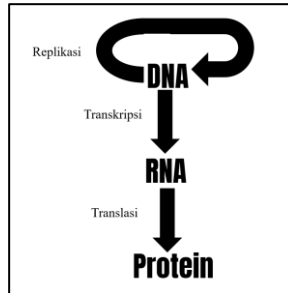
Gambar 15. Struktur Nukleotida (A) dan Basa Nitrogen (B)

Urutan basa nitrogen sepanjang molekul DNA menyimpan informasi genetik. Basa-basa ini berpasangan secara spesifik melalui ikatan hidrogen, sebagaimana adenin berpasangan dengan timin melalui dua ikatan hidrogen, sedangkan guanin berpasangan dengan sitosin melalui tiga ikatan hidrogen. Pola pasangan basa yang konsisten ini disebut *complementary base pairing* (pasang basa komplementen), yang memastikan stabilitas struktur DNA sekaligus akurasi dalam proses replikasi.

DNA berbentuk dua untai polinukleotida yang saling berpilin membentuk struktur heliks ganda (*double helix*). Setiap untai memiliki arah yang berlawanan (antiparalel), satu berjalan dari ujung 5' ke 3', dan untai lainnya dari 3' ke 5'. Satu dari dua untai DNA tersebut dibuat melalui proses replikasi DNA. Tulang punggung DNA terdiri atas rangkaian gula dan fosfat yang dihubungkan oleh ikatan fosfodiester, sementara basa nitrogen menonjol ke arah dalam heliks dan saling berpasangan. Struktur ini pertama kali diuraikan oleh James Watson dan Francis Crick pada tahun 1953 berdasarkan data difraksi sinar-X yang dikumpulkan oleh Rosalind Franklin.

Gen didefinisikan sebagai segmen DNA yang membawa informasi untuk mensintesis satu molekul RNA atau protein fungsional tertentu. Gen terdiri atas daerah pengatur (*regulatory region*), daerah pengkode (*coding sequence*), dan sinyal terminasi. Pada organisme eukariot, gen umumnya tersusun atas bagian *ekson* (urutan pengkode) dan *intron* (urutan non-pengkode). Ekspresi gen melibatkan dua tahap utama, yaitu transkripsi dan translasi. Pada tahap transkripsi, urutan DNA digunakan sebagai cetakan untuk membentuk molekul RNA melalui kerja enzim RNA polimerase. RNA hasil transkripsi kemudian mengalami translasi di ribosom untuk menghasilkan rantai polipeptida sesuai dengan urutan kodon (triplet basa) pada RNA. Proses ini dikenal sebagai *dogma sentral biologi molekuler* yang menggambarkan aliran

informasi genetik dari DNA → RNA → protein (Gambar 16) (Old dan Primrose, 1989).



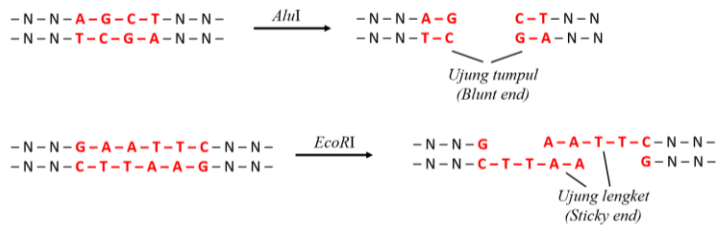
Gambar 16. Dogma Sentral Biologi

4.2.2 Enzim-enzim Penting yang Terlibat

Enzim memegang peranan sentral dalam seluruh proses rekayasa DNA, mulai dari pemotongan, penyambungan, hingga penggandaan molekul genetik.

1. Enzim Restriksi

Enzim restriksi berperan “gunting molekuler” yang mengenali urutan DNA spesifik dan memotongnya pada atau di sekitar situs pengenalan tersebut. Enzim ini pertama kali ditemukan pada bakteri sebagai sistem pertahanan terhadap DNA asing, karena itulah banyak enzim restriksi yang diberi nama sesuai dengan nama bakteri asalnya (Tabel 10). Berdasarkan lokasi pemotongan, enzim restriksi diklasifikasikan menjadi tiga tipe (I, II, dan III), namun tipe II adalah yang paling sering digunakan dalam rekayasa genetik karena mampu memotong DNA pada situs pengenalan spesifik berukuran 4-8 basa. Ada dua jenis pemotongan pada enzim restriksi tipe II, yaitu *sticky end* (ujung lengket) dan *blunt end* (ujung tumpul) (Gambar 17) (Brown, 2016; Lodish *dkk.*, 2021). Dalam teknologi DNA rekombinan, para ilmuwan lebih sering menggunakan *sticky end* karena dapat memungkinkan terjadi komplementasi antara dua gen sehingga lebih mudah untuk disambungkan.



- T4 DNA ligase (dari bakteriofag T4): aktif pada suhu 16°C dan menggunakan ATP sebagai kofaktor.
 - *E. coli* DNA ligase: menggunakan NAD⁺ sebagai kofaktor.
- Keberhasilan proses ligasi menentukan kestabilan konstruksi gen rekombinan yang akan ditransfer ke organisme target.

3. DNA Polimerase

Enzim ini berperan dalam sintesis DNA baru. Dalam teknologi DNA rekombinan, DNA polimerase digunakan pada proses replikasi atau amplifikasi (perbanyak DNA) menggunakan metode *Polymerase Chain Reaction* (PCR), dan pengurutan basa nukleotida. Jenis-jenis yang sering digunakan adalah *Taq* DNA polymerase (dari bakteri *Thermus aquaticus*) yang dapat bertahan hingga suhu 94°C dan seringkali digunakan pada proses amplifikasi gen menggunakan PCR. Lebih lanjut, *Pfu* DNA polymerase (dari arkea hipertermofilik *Pyrococcus furiosus*) juga sering digunakan sebagai salah satu DNA polimerase yang memiliki aktivitas *proofreading* sehingga menghasilkan amplicon DNA dengan akurasi tinggi (Watson *dkk.*, 2014; B Alberts *dkk.*, 2022).

4.2.3 Vektor

Vektor kloning merupakan elemen kunci dalam teknologi DNA rekombinan. Vektor berfungsi sebagai kendaraan molekuler untuk membawa gen target ke dalam sel inang (bakteri, ragi, atau tanaman) sehingga dapat diperbanyak, diekspresikan, dan diturunkan secara stabil. Pemilihan jenis vektor yang tepat sangat menentukan keberhasilan kloning gen dan ekspresi sifat unggul pada tanaman hasil rekayasa genetik.

Vektor adalah molekul DNA kecil yang dapat bereplikasi secara mandiri di dalam sel inang dan digunakan untuk membawa fragmen DNA asing. Idealnya, vektor memiliki ciri-ciri berikut:

- Kemampuan replikasi sendiri (*origin of replication/ori*): memungkinkan perbanyak fragmen DNA di dalam sel inang.
- Situs pemotongan unik (*Multiple Cloning Site/MCS*): mengandung beberapa situs pengenalan enzim restriksi untuk memudahkan penyisipan gen target
- Penanda seleksi (*selectable marker*): seperti gen resistensi antibiotik untuk mengidentifikasi sel yang berhasil membawa vektor
- Ukuran kecil dan stabilitas tinggi: memudahkan manipulasi dan mempertahankan integritas DNA

- Dapat ditransfer ke organisme target: melalui transformasi, transduksi, atau konjugasi

Beberapa jenis vektor yang sering digunakan di antaranya plasmid, bakteriofag, dan cosmid.

1. Plasmid

Plasmid merupakan vektor paling umum digunakan. Plasmid adalah molekul DNA sirkular beruntai ganda yang secara alami terdapat pada bakteri. Beberapa contoh plasmid di antaranya adalah pUC8, CplE1, RP4, pTiAch5 (Tabel 11).

Tabel 11. Plasmid

Plasmid	Organisme Asal
pUC8	<i>E. coli</i>
ColE1	<i>E. coli</i>
RP4	<i>Pseudomonas</i> and others
F	<i>E. coli</i>
TOL	<i>Pseudomonas putida</i>
pTiAch5	<i>Agrobacterium tumefaciens</i>

Plasmid Ti seringkali dipakai pada penelitian gen ketahanan terhadap hama dari *Bacillus thuringiensis* (gen *cry*) sering diklon ke dalam plasmid sebelum ditransfer ke tanaman melalui *Agrobacterium tumefaciens* (Hiei dan Komari, 2008).

2. Bakteriofag

Vektor ini berasal dari virus yang menginfeksi bakteri. DNA fage λ dapat membawa fragmen DNA yang lebih besar (hingga ± 20 kb). Jenis vektor ini cocok digunakan untuk konstruksi pustaka genom (*genomic library*). Bakteriofag sangat berguna untuk analisis genom skala besar dan pemetaan gen kompleks pada tanaman unggul, misalnya pemetaan gen ketahanan kekeringan atau toleransi salinitas. Kelebihan bakteriofag mampu membawa sisipan DNA hingga 45 kb, cocok untuk kloning gen berukuran besar.

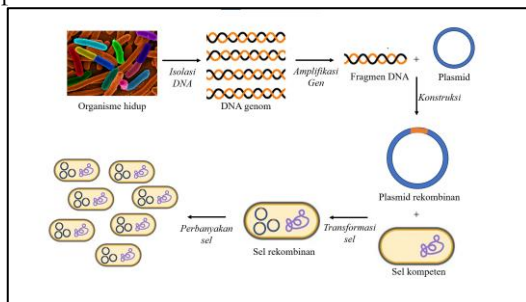
3. Cosmid

Merupakan hibrida antara plasmid dan DNA fage λ .

- a. BAC (*Bacterial Artificial Chromosome*): digunakan untuk membawa fragmen DNA hingga 300 kb dalam sel bakteri (*E. coli*).
- b. YAC (*Yeast Artificial Chromosome*): digunakan dalam sel ragi, mampu menampung fragmen hingga 1000 kb.

4.3 Proses Rekayasa DNA Rekombinan

Proses rekayasa DNA rekombinan dimulai dari mencari gen target yang akan dimasukkan ke dalam sel inang (Gambar 18). Banyak penelitian menggunakan gen target yang berasal dari bakteri, seperti halnya pada penelitian terkait tanaman Bt yang mengambil gen tahan hama dari *Bacillus thuringiensis*. Kemudian dilakukan isolasi DNA untuk mendapatkan DNA genom yang dijadikan sebagai templat untuk memperbanyak gen target. Setelah didapatkan gen target, selanjutnya dilakukan konstruksi plasmid sehingga didapatkan plasmid rekombinan. Lalu sel kompeten dilakukan transformasi menggunakan plasmid rekombinan.



Gambar 18. Proses Rekayasa DNA

4.3.1 Isolasi DNA

Isolasi DNA merupakan langkah awal yang sangat krusial dalam setiap proses rekayasa genetik. Kualitas dan kemurnian DNA yang dihasilkan akan menentukan keberhasilan tahapan selanjutnya, seperti pemotongan dengan enzim restriksi, ligasi, transformasi, serta ekspresi gen pada organisme target (Singh dan Singh, 2023). Tujuan utama isolasi DNA adalah memisahkan DNA dari komponen seluler lainnya seperti protein, lipid, dan RNA tanpa merusak struktur DNA itu sendiri. Secara umum, proses isolasi melibatkan tiga tahap utama:

a. Tahap Lisis Sel

Metode lisis disesuaikan dengan jenis organisme sumber DNA:

- Pada tanaman: diperlukan penghancuran dinding sel yang kuat menggunakan buffer yang mengandung detergen (misalnya CTAB atau SDS) untuk melarutkan membran lipid dan protein.
- Pada bakteri: dapat digunakan lisozim untuk memecah dinding sel peptidoglikan.

- Pada jaringan hewan: cukup menggunakan detergen ringan karena tidak memiliki dinding sel.
- b. Tahap Pemisahan Protein dan RNA
Setelah lisis, campuran sel mengandung DNA, RNA, dan protein. Untuk memisahkan DNA, beberapa metode umum digunakan:
 1. Ekstraksi Fenol-Kloroform
Campuran fenol dan kloroform digunakan untuk memisahkan protein dari DNA melalui sentrifugasi dimana fase cair yang didapatkan mengandung DNA murni.
 2. Enzimatik:
 - Penambahan RNase untuk menguraikan RNA.
 - Penambahan Proteinase K untuk mendegradasi protein yang masih menempel pada DNA.
 3. Metode Non-Toksik Modern:
Kit komersial berbasis kolom silika (misalnya Qiagen dari Belanda atau Zymo dari AS) yang mengikat DNA secara selektif dan menghasilkan DNA siap pakai tanpa penggunaan pelarut organik berbahaya.
- c. Tahap Presipitasi DNA
DNA yang telah dimurnikan biasanya diendapkan dengan etanol dingin (70%) atau isopropanol, kemudian disentrifugasi hingga terbentuk endapan putih. Endapan DNA dicuci kembali dan dilarutkan dalam buffer TE (Tris-EDTA) untuk penyimpanan jangka panjang.
- d. Evaluasi Kemurnian dan Konsentrasi DNA
Setelah isolasi, penting untuk mengevaluasi kemurnian dan kuantitas DNA. Metode yang umum digunakan:
 1. Spektrofotometri (A260/A280)
Rasio absorbansi 260/280 nm $\approx$ 1,8 menunjukkan DNA murni. Nilai <1,8 menandakan kontaminasi protein. Instrumen yang paling sering digunakan untuk mengukur kadar kemurnian DNA adalah Nano Drop. Prinsip dasar Nano Drop sama dengan metode spektrofotometri, hanya saja cukup menggunakan sampel sebanyak 1 μ L saja.
 2. Elektroforesis Gel Agarosa
Seringkali ketika tidak tersedia Nano Drop, penggunaan elektroforesis gel agarosa juga digunakan untuk menilai kuantitas DNA hasil isolasi. Akan tetapi, hasil yang didapatkan

hanya sebatas perkiraan konsentrasi dalam satuan ng/ μ L yang dilihat berdasarkan intensitas warna pada gel agarosa yang dicocokkan pada DNA ladder. DNA ladder adalah larutan yang berisi fragmen-fragmen DNA dengan panjang yang sudah diketahui dan digunakan sebagai standar ukuran dan konsentrasi dalam elektroforesis gel untuk memperkirakan ukuran dan konsentrasi fragmen DNA yang tidak diketahui.

4.3.2 Amplifikasi Gen

Amplifikasi gen merupakan proses untuk memperbanyak segmen DNA tertentu yang mengandung gen target (*gene of interest*) dari sampel DNA hasil isolasi. Teknik ini memungkinkan peneliti memperoleh jumlah DNA yang cukup banyak dan spesifik untuk digunakan dalam kloning gen, sekuensing, maupun analisis ekspresi. Amplifikasi gen didasarkan pada reaksi berantai polimerase pada PCR, yang dikembangkan oleh Kary Mullis pada tahun 1983. Prinsipnya meniru proses replikasi DNA secara in vitro menggunakan enzim DNA polimerase yang tahan panas dan komponen lainnya (Tabel 12) (Mullis, 1994). Dengan metode ini, segmen DNA tertentu dapat diperbanyak jutaan kali hanya dalam waktu beberapa jam.

Tabel 12. Komponen Utama PCR

Komponen	Keterangan	Fungsi
Template DNA	Hasil isolasi DNA dari suatu organisme yang mempunyai sifat tertentu	Cetakan gen yang akan diperbanyak
Primer	Oligonukleotida yang mengandung urutan batas awal (<i>forward</i>) dan batas akhir (<i>reverse</i>) dari gen target	Titik awal dan akhir pada sintesis DNA serta menentukan spesifitas gen
DNA Polimerase	Biasanya digunakan <i>Taq</i> polimerase karena kestabilannya pada suhu 94°C	Sintesis DNA
dNTP (<i>deoksinnukleotida trifosfat</i>)	Terdiri atas dATP, dGTP, dan dCTP	Bahan baku pembentukan untai DNA baru
Buffer reaksi	Biasanya 1 paket dengan DNA polimerase	Menjaga pH dan menyediakan ion Mg^{2+} sebagai kofaktor

		enzim DNA polimerase
<i>Nuclease-free water</i> (NFW)	Air yang bebas dari enzim nuklease (seperti DNase dan RNase) yang dapat merusak DNA dan RNA	Memastikan integritas sampel

Satu siklus PCR terdiri atas tiga tahap utama yang diulang selama 25–35 kali:

1. Denaturasi (94-95°C): DNA yang mempunyai untai ganda dipisahkan menjadi dua untai tunggal.
2. Annealing (50-65°C): Primer menempel pada daerah komplementer di template DNA.
3. Elongasi (72°C): DNA polimerase memperpanjang untai baru dari ujung primer menggunakan dNTP.

Setiap siklus menggandakan jumlah DNA target, sehingga jumlah salinan meningkat secara eksponensial.

Pada tahap isolasi gen menggunakan amplifikasi PCR, penting untuk menambahkan sekuens sisi pengenalan 2 jenis enzim restriksi yang berbeda di ujung 5 dan ujung 3 gen target melalui primer spesifik yang didesain. Penambahan 2 jenis enzim restriksi yang berbeda di ujung gen dilakukan untuk mencegah kegagalan ekspresi gen akibat tidak terjadinya proses translasi karena pembacaan gen terbalik. Selanjutnya, dalam pemilihan enzim restriksi, hendaknya disesuaikan dengan plasmid yang akan digunakan. Peta plasmid harus dipahami dengan benar, terutama memahami arah pembacaan *origin of replication* pada plasmid.

4.3.3 Inseri Gen Ke Dalam Plasmid

Inseri gen atau fragmen DNA ke dalam plasmid membutuhkan beberapa komponen utama, di antaranya adalah gen tersebut, plasmid, 2 jenis enzim restriksi, dan enzim ligase. Mula-mula amplikon gen dibersihkan melalui tahap PCR *purification product* atau *gel extraction* untuk memisahkan DNA dari komponen-komponen PCR yang sudah tidak diperlukan pada tahap ini. Selanjutnya plasmid yang dipilih didigesti menggunakan enzim restriksi yang sisi pengenalannya telah ditambahkan di ujung 5 dan 3 gen target. Selanjutnya dilakukan proses ligasi antara plasmid dan gen menggunakan enzim ligase sehingga didapatkan plasmid rekombinan yang

siap untuk dimasukkan ke dalam sel inang melalui tahap transformasi sel inang (Primrose dan Twyman, 2019).

4.3.4 Transformasi Sel Inang

Transformasi merupakan tahap penting dalam teknologi DNA rekombinan, yaitu proses memasukkan DNA rekombinan ke dalam sel inang (*host cell*) agar gen target dapat direplikasi, diekspresikan, dan diwariskan ke generasi selanjutnya. Sel inang berfungsi sebagai pabrik biologis untuk memperbanyak atau mengekspresikan gen hasil rekayasa.

Sel inang yang ditransformasi disebut sebagai sel kompeten. Sel kompeten yang sering digunakan dalam proses perbanyakan plasmid rekombinan adalah sel bakteri, yaitu *Escherichia coli*. Sel *E. coli* yang sering digunakan untuk proses kloning gen adalah *E. coli* JM10, *E. coli* TOP10F, dan *E. coli* DH5 α . Lebih lanjut, sel kompeten yang sering digunakan dalam ekspresi gen lebih bervariasi, meliputi sel bakteri, sel yeast, sel tumbuhan, sel serangga, maupun sel mamalia. Sel kompeten bakteri yang sering digunakan adalah *E. coli* BL21, *E. coli* ArcticExpress, dan *E. coli* RIPL. Kelebihan penggunaan sistem inang *E. coli* sebagai sel kompeten adalah pertumbuhannya yang cepat sehingga meningkatkan efisiensi ekspresi gen. Selanjutnya, *E. coli* mempunyai sistem ekspresi yang sederhana sehingga lebih mudah dalam proses manipulasinya.

Selanjutnya, sistem inang *Agrobacterium tumefaciens* seringkali digunakan untuk produksi tanaman transgenik. Kelebihan penggunaan sistem ekspresi *Agrobacterium* adalah efektivitasnya yang tinggi pada tanaman dikotil maupun monokotil. Selanjutnya, sel inang berupa sel tanaman (protoplas) memfasilitasi kloning gen langsung pada jaringan tanaman sehingga memungkinkan regenerasi menjadi tanaman utuh.

Metode transformasi sel inang yang paling sering digunakan adalah *heatshock*, transduksi, dan elektroporasi. Metode *heatshock* memanfaatkan suhu tinggi (40°C) dan suhu rendah (4°C) secara simultan dengan bantuan CaCl₂ untuk membuka sel bakteri dan memasukkan plasmid. Transformasi *Agrobacterium* menjadi sistem transformasi yang paling sering digunakan untuk rekayasa benih unggul pada tanaman karena bakteri *Agrobacterium* sendiri mempunyai kemampuan alami untuk melakukan transfer bagian DNAny ke dalam sel tanaman (Gelvin, 2017; Kalendar *dkk.*, 2022).

4.3.5 Isolasi Plasmid dan Sekuensing

Apabila telah didapatkan sel inang yang telah bertransformasi mengandung plasmid rekombinan, maka perlu dilakukan isolasi plasmid. Pada dasarnya prinsip dasar isolasi plasmid mirip dengan isolasi DNA. Saat ini juga telah banyak dipasarkan kit ekstraksi plasmid yang siap digunakan. Setelah plasmid rekombinan berhasil diisolasi, selanjutnya dilakukan proses sekuensing atau pengurutan basa nukleotida. Namun, sebelum ke tahap sekuensing, masih diperlukan analisis restriksi pada plasmid rekombinan yang telah diisolasi untuk memastikan keberhasilan proses ligasi.

Proses sekuensing di Indonesia sendiri masih sering menggunakan pihak ketiga. Walaupun demikian, pada dasarnya telah banyak lembaga di Indonesia yang telah menawarkan jasa sekuensing. Metode sekuensing yang paling sering digunakan adalah metode dideoksi Sanger. Prinsip dasar metode ini adalah terminasi rantai sintesis DNA dengan memasukkan dideoksinukleotida (ddNTP). ddNTP tidak memiliki gugus 3'-hidroksil (3'-OH), sehingga menghentikan perpanjangan untai DNA setelah dimasukkan oleh enzim DNA polimerase, menghasilkan fragmen DNA dengan panjang yang berbeda-beda. Fragmen-fragmen ini kemudian dipisahkan berdasarkan ukuran menggunakan elektroforesis gel untuk menentukan urutan DNA. Setelah gen interest terkonfirmasi melalui proses sekuensing (Singh dan Singh, 2023).

4.4 Sistem Transformasi *Agrobacterium tumefaciens*

Salah satu terobosan besar dalam bioteknologi tanaman adalah ditemukannya kemampuan alami bakteri tanah *Agrobacterium tumefaciens* dalam mentransfer sebagian DNAnyanya ke dalam sel tanaman. Kemampuan alami ini kemudian dimanfaatkan dan dimodifikasi oleh para ilmuwan menjadi sistem transformasi genetik yang sangat efisien untuk memasukkan gen asing ke dalam genom tanaman. Sistem transformasi *Agrobacterium* merupakan metode biologis yang paling luas digunakan dalam pembuatan tanaman transgenik, terutama pada tanaman dikotil (seperti tembakau, tomat, kedelai, kapas, dan kentang), dan kini juga telah berhasil diadaptasi untuk banyak tanaman monokotil seperti padi dan jagung (National Academies of Sciences, 2016).

Secara alami, *A. tumefaciens* menyebabkan penyakit *crown gall* (pembengkakan jaringan) pada tanaman. Bakteri ini membawa plasmid besar yang disebut Ti plasmid (*Tumor-inducing plasmid*), yang mengandung T-DNA (*transferred DNA*) dan *virulence genes*. Dalam teknologi rekayasa genetik, gen penyebab tumor pada T-DNA dihapus dan digantikan oleh gen target (*gene of*

transformasi *Agrobacterium* ini juga sangat konsisten sehingga hasilnya sama pada keturunan ke berapapun (Schnepf *dkk.*, 1998).

4.5 Contoh Aplikasi pada Rekayasa Tanaman Bt

Salah satu tantangan utama dalam pertanian modern adalah serangan hama serangga yang menyebabkan kehilangan hasil panen hingga 30-50%. Penggunaan pestisida kimia secara berlebihan bukan hanya meningkatkan biaya produksi, tetapi juga menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. Sebagai solusi berkelanjutan, para ilmuwan mengembangkan tanaman Bt (*Bacillus thuringiensis*), tanaman yang secara genetik direkayasa agar dapat memproduksi protein toksik (*Cry protein*) yang membunuh serangga sasaran, tanpa membahayakan organisme lain (Tabel 14) (National Academies of Sciences, 2016).

Gen yang digunakan berasal dari bakteri tanah *Bacillus thuringiensis*, yang dikenal menghasilkan protein Cry (Crystal protein). Protein ini bersifat toksik spesifik terhadap larva serangga tertentu seperti *Lepidoptera* (ulat), *Coleoptera* (kumbang), dan *Diptera* (lalat). Setelah dimakan serangga, protein Cry diaktifkan dalam usus alkalis serangga, menempel pada reseptor epitel, membentuk pori, dan menyebabkan kematian serangga karena kehilangan integritas sel usus.

Tabel 14. Tanaman Bt yang Pernah Ditemui

Tanaman Bt	Gen yang Disisipkan	Hama Target	Sistem Transformasi
Kapas Bt	Cry1Ac/ cry2Ab	Ulat penggerek kapas	<i>Agrobacterium tumefaciens</i>
Jagung Bt	Cry1Ab/ cry3Bb1	Ulat penggerek batang jagung dan kumbang akar	<i>Biolistik</i>
Padi Bt	Cry1Ab	Ulat penggerek batang padi	<i>Agrobacterium tumefaciens</i>

Langkah awal dalam rekayasa tanaman Bt adalah mengisolasi gen *cry* dari *Bacillus thuringiensis* dan memodifikasinya agar dapat diekspresikan secara efisien dalam tanaman. Karena perbedaan kodon antara bakteri dan tanaman, gen *cry* sering disintesis ulang melalui *codon optimization* untuk meningkatkan translasi dalam sistem eukariotik. Hal ini perlu dilakukan karena sumber gen dan sel inang berasal dari organisme yang berbeda.

Plasmid yang digunakan adalah pBI121 yang mempunyai promotor kuat CaMV 35S agar ekspresi gen menjadi lebih besar (Gambar 19). Selanjutnya, dilakukan transformasi *Agrobacterium tumefaciens*. Lalu *Agrobacterium* dikopel dengan jaringan tanaman pada medium kokultivasi. Tanaman monokotil seperti jagung sulit ditransformasi dengan *Agrobacterium* sehingga perlu digunakan metode gene gun, yaitu penembakan partikel emas berlapis DNA cry langsung ke sel embrionik tanaman. Kemudian T-DNA dari plasmid *Agrobacterium* yang membawa gen cry berpindah dan terintegrasi ke genom tanaman. Lalu jaringan tanaman diseleksi dan diregenerasi menjadi tanaman utuh melalui kultur jaringan (Hiei dan Komari, 2008).

Keunggulan tanaman transgenik Bt di antaranya adalah dapat mengurangi penggunaan pestisida hingga 80% sehingga lebih ramah lingkungan. Selain itu, cara kerja gen *cry* spesifik untuk hama sehingga aman untuk organisme non target seperti lebah, burung, dan mamalia. Namun demikian, tantangan yang masih terjadi pada pengembangan tanaman Bt ini adalah potensi munculnya resistensi hama akibat penggunaan jangka panjang.

4.6 Keamanan dan Etika Rekayasa Genetik

Dari sisi keamanan pangan, tanaman hasil rekayasa genetik harus dipastikan tidak mengandung alergen baru, tidak bersifat toksik, serta memiliki nilai gizi yang setara atau lebih baik dibandingkan varietas konvensional. Lembaga internasional seperti FAO, WHO, dan OECD telah menetapkan pedoman penilaian keamanan pangan untuk organisme hasil modifikasi genetik (OHMG/GMOs). Di Indonesia, pengawasan dilakukan oleh Komisi Keamanan Hayati Produk Rekayasa Genetik (KKH PRG) yang bertugas menilai aspek keamanan pangan, pakan, dan lingkungan sebelum produk tersebut mendapat izin edar (Brookes dan Barfoot, 2020).

Keberhasilan penerapan teknologi ini harus diimbangi dengan pemahaman yang mendalam terhadap aspek keamanan hayati, etika, serta regulasi yang berlaku. Setiap produk hasil rekayasa genetik wajib melalui proses penilaian risiko yang ketat untuk memastikan keamanan bagi manusia, hewan, dan lingkungan. Dengan demikian, pengembangan dan pemanfaatan benih hasil rekayasa genetik dapat memberikan manfaat maksimal bagi ketahanan pangan dan keberlanjutan ekosistem pertanian, tanpa mengabaikan tanggung jawab ilmiah dan sosial.

DAFTAR PUSTAKA

- Alberts, Bruce *dkk.* (2022) *Molecular Biology of the Cell*. 4th ed. New York: Garland Science.
- Alberts, B *dkk.* (2022) *Molecular biology of the cell*. 7 ed. New York City: W. W. Norton & Company.
- Brookes, G. dan Barfoot, P. (2020) *GM crops: Global socio-economic and environmental impacts 1996–2018*. Dorchester: PG Economics, Ltd.
- Brown, T.A. (2016) *Gene cloning and DNA analysis: An introduction* . 7 ed. New Jersey: Wiley-Blackwell.
- Gelvin, S.B. (2017) “Integration of *Agrobacterium* T-DNA into the Plant Genome,” *Annual Review of Genetics*, 51(1), hlm. 195–217. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1146/annurev-genet-120215-035320>.
- Hiei, Y. dan Komari, T. (2008) “*Agrobacterium*-mediated transformation of rice using immature embryos or calli induced from mature seed,” *Nature Protocols*, 3(5), hlm. 824–834. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1038/nprot.2008.46>.
- Kalendar, R. *dkk.* (2022) “Editorial: Recent advances in plant genetic engineering and innovative applications,” *Frontiers in Plant Science*, 13. Tersedia pada: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1045417>.
- Komori, T. *dkk.* (2007) “Current Status of Binary Vectors and Superbinary Vectors,” *Plant Physiology*, 145(4), hlm. 1155–1160. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1104/pp.107.105734>.
- Lodish, H. *dkk.* (2021) *Molecular cell biology* . 9 ed. New York: W.H. Freeman.
- Mullis, K.B. (1994) “The Polymerase Chain Reaction (Nobel Lecture),” *Angewandte Chemie International Edition in English*, 33(12), hlm. 1209–1213. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1002/anie.199412091>.
- National Academies of Sciences, E. and M. (2016) *Genetically Engineered Crops*. Washington, D.C.: National Academies Press. Tersedia pada: <https://doi.org/10.17226/23395>.
- Old, R.W. dan Primrose, S.B. (1989) *Principles of gene manipulation: An introduction to genetic engineering*. 4 ed. Oxford: Blackwell Scientific Publications.
- Primrose, S.B. dan Twyman, R.M. (2019) *Principles of gene manipulation and genomics*. 8 ed. New Jersey: Wiley-Blackwell.
- Schnepf, E. *dkk.* (1998) “*Bacillus thuringiensis* and Its Pesticidal Crystal Proteins,” *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 62(3), hlm. 775–

806. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1128/MMBR.62.3.775-806.1998>.

Singh, B.D. dan Singh, A.K. (2023) *Biotechnology: Expanding horizons*. 6 ed. New Delhi: Kalyani Publishers.

Watson, J.D. *dkk.* (2014) *Molecular biology of the gene* . 7 ed. London: Pearson.

BAB 5

MARKA MOLEKULER UNTUK SELEKSI BENIH

Oleh: Adin Novitasari

5.1 Jenis-Jenis Marka Molekuler (RAPD, SSR, SNP)

Program pemuliaan tanaman adalah kegiatan untuk menciptakan tanaman sesuai yang diharapkan oleh pemulia dengan menggabungkan ilmu dan seni. Seorang pemulia tanaman berusaha menciptakan tanaman yang dapat dimanfaatkan oleh manusia sesuai dengan tantangan yang ada di lapang. Dalam proses pemuliaan tanaman, kegiatan yang tidak kalah penting selain persilangan adalah seleksi. Seleksi adalah proses memilih calon tanaman yang akan dilanjutkan untuk diteliti sehingga bisa menjadi galur harapan dan dapat dilepas menjadi varietas. Seleksi pada program pemuliaan tanaman dapat dilakukan secara morfologi, fisiologi, dan molekuler. Seleksi tanaman secara morfologi dapat dilakukan dengan melihat penampilan tanaman secara langsung, seleksi tanaman secara fisiologi dapat dilakukan dengan menganalisis kandungan metabolit sekunder tanaman, klorofil dan lain sebagainya sedangkan seleksi melalui molekuler dengan memanfaatkan informasi gen atau DNA dari tanaman yang telah dimuliakan. Marka molekuler dapat meningkatkan akurasi seleksi karena sampai pada level gen dan DNA. Hal tersebut yang tidak dimiliki seleksi morfologi dan fisiologi. Seleksi berdasarkan morfologi dan fisiologi pada tanaman masih memiliki banyak keterbatasan. Oleh sebab itu digunakan marka molekuler guna memperhatikan efisiensi dan keakuratan.

Marka molekuler adalah penanda berupa urutan DNA spesifik yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi perbedaan genetik individu. Keunggulan marka molekuler dalam program pemuliaan tanaman adalah dapat melihat sifat unggul tanaman secara cepat tanpa harus menunggu tanaman mencapai fase generatif dan menghasilkan biji. Marka molekuler memungkinkan pemulia tertarik untuk mengetahui hubungan antar gen yang mengontrol suatu karakter dan kemudian menjadi sebuah informasi untuk memanipulasi gen yang sudah ada. Saat ini, pemulia memilih sifat tertentu dengan mendeteksi gen melalui marka tertentu. Ketika marka terdeteksi pada tanaman maka gen tersebut terdeteksi berkaitan dengan suatu karakter tertentu.

Secara umum marka molekuler diklasifikasikan menjadi *genetic basis* dan *operational basis*. Berdasarkan karakteristik genetik, marka molekuler dikelompokkan menjadi dua kategori umum yaitu: 1) *Single locus, multi-allelic, codominant markers*. Contohnya adalah RFLP (*Restriction Fragment Length Polymorphism*) dan mikrosatelit (SSR); 2) *Multilocus, single allelic, dominant markers*. Selanjutnya *operational basis* contohnya adalah AFLP (*Amplified Fragment Length Polymorphism*) dan RAPD (*Random Amplified Polymorphic DNA*). Seiring perkembangan zaman, marka molekuler yang lebih banyak digunakan adalah RAPD (*Random Amplified Polymorphic*), SSR (*Simple Sequence Repeat*) dan SNP (*Single Nucleotide Polymorphism*). Masing-masing metode memiliki kelebihan dan kelemahan. Penggunaan metode tersebut disesuaikan kembali dengan tujuan pemulia, bahan penelitian, dan biaya yang dimiliki. Apabila menginginkan hasil yang akurat dan presisi dapat menggunakan metode SSR dan SNP. Hal marka molekuler berbasis ini dikarenakan metode tersebut menggunakan marka atau penanda yang lebih spesifik. SSR merupakan deteksi marka molekuler yang sangat polimorfik karena menggunakan urutan basa pendek yang berulang (misalnya ATATAT). Berikut merupakan penjelasan dari masing-masing metode tersebut:

a. RAPD (*Random Amplified Polymorphic DNA*)

RAPD (*Random Amplified Polymorphic DNA*) adalah salah satu jenis PCR dengan primer acak yang tunggal (biasanya 10 basa urutan nitrogen). RAPD menjadi jenis marka molekuler yang paling banyak digunakan untuk studi keragaman genetik dan hubungan kekerabatan tanaman. Hal ini disebabkan RAPD memiliki keunggulan biaya yang murah karena hanya memerlukan satu jenis primer pendek dan tidak perlu disintesis dengan urutan spesifik, secara teknis mudah dilakukan dan informasi yang dihasilkan polimorfik dalam satu reaksi. Prinsip kerja RAPD adalah primer acak akan menempel pada segmen DNA pada banyak lokasi yang memiliki urutan basa yang komplemen dengan primer tersebut. Apabila dua situs penempelan primer saling berhadapan dan berada dalam jarak yang dapat diamplifikasi oleh PCR, maka segmen DNA diantaranya akan diamplifikasi secara eksponensial. Berdasarkan proses tersebut maka akan menghasilkan polimorfisme yang terdeteksi ada atau tidaknya pita DNA hasil amplifikasi melalui elektroforesis.

b. SSR (*Simple Sequence Repeat*)

SSR (*Simple Sequence Repeat*) juga dikenal sebagai mikrosatelit yaitu penanda molekuler yang didasarkan pada urutan DNA berulang secara tandem dengan motif pendek (1 hingga 6 pasang basa). SSR sangat

bermanfaat dalam analisis genetik karena bersifat kodominan dan polimorfik serta mudah dideteksi dengan PCR. Terdapat dua jenis SSR yaitu gSSR (*genomic SSR*) dan EST-SSR (*Expressed Sequence Tag-SSR*). gSSR adalah marka SSR yang berasal dari sekuen DNA di seluruh genom dan ditemukan di bagian ekson dan intron. EST-SSR berasal dari daerah EST (*Expressed Sequence Tag*) yaitu fragmen DNA yang telah ditranskripsi menjadi mRNA yang kemudian menjadi cDNA. EST-SSR hanya berasal dari *coding regions* (ekson) yang kemudian ditranskripsi menjadi protein. Oleh sebab itu, EST-SSR cenderung lebih konservatif atau kurang bervariasi antar spesies.

c. SNP (*Single Nucleotide Polymorphism*)

SNP (*Single Nucleotide Polymorphism*) merupakan salah satu jenis marka molekuler yang merujuk pada perubahan satu basa nukleotida tunggal pada posisi spesifik di dalam urutan DNA (genom) antar individu dalam suatu populasi. Misalkan, satu individu memiliki basa Adenine (A) sementara individu lain pada lokasi yang sama memiliki basa Guanine (G), maka perubahan Adenin menjadi Guanin tersebut yang disebut dengan SNP. SNP dapat ditemukan dimana saja di dalam genom, baik di dalam gen ekson (mengatur ekspresi gen) maupun gen intron (daerah yang tidak mengkode protein). Keunggulan marka molekuler SNP antara lain SNP adalah variasi genetik yang paling sering ditemukan di genome, SNP hanya melibatkan satu mutasi satu titik sehingga memiliki sifat sangat stabil dan memiliki laju mutasi yang sangat rendah antar generasi. Selain itu sebagian besar SNP bersifat kodominan (dapat membedakan antara individu homozigot dan heterozigot). Berikut merupakan jenis-jenis SNP:

- SNP pada Daerah Pengkode Protein (*Coding/sSNPs*)

SNP yang terletak di dalam gen ekson dibagi lagi menjadi *Nonsense* (tak bermakna), *missense* (salah makna) dan *synonymous* (memiliki makna sama). *Nonsense* adalah perubahan nukleotida menghasilkan kodon stop prematur yang mengakibatkan sintesis protein berhenti lebih awal. *Missense* adalah perubahan nukleotida yang menghasilkan asam amino berbeda pada rantai nukleotida sehingga dapat mengubah fungsi protein. *Synonymous* adalah perubahan nukleotida yang tidak mengubah asam amino yang dihasilkan karena beberapa kodon mengkode asam amino yang sama. Namun demikian, dapat mempengaruhi laju translasi.

- SNP pada Daerah Non-Pengkode Protein (*Non-Coding SNPs*)
SNP pada daerah non pengkode protein juga memiliki peran penting meskipun tidak mengubah protein secara langsung. Beberapa pengaruhnya antara lain intergenik, intronik dan SNP pada daerah regulator. Intergenik adalah SNP yang terletak di antara gen-gen berbeda. Intronik adalah SNP yang terletak di dalam intron dan SNP daerah regulator terletak di daerah promor. Perubahan pada lokasi tersebut dapat mempengaruhi jumlah transkripsi gen sehingga mempengaruhi jumlah protein yang dihasilkan.
Secara garis besar, masing-masing metode memiliki preferensi yang berbeda-beda. RAPD lebih cocok untuk studi awal karena biaya yang diperlukan rendah, dapat dilakukan lebih cepat namun hasilnya kurang stabil. Metode SSR lebih presisi dan banyak diaplikasikan pada kegiatan pemuliaan. Selanjutnya, metode SNP merupakan metode yang paling detail dan akurat namun biaya yang diperlukan lebih tinggi.

5.2 Teknik PCR dan Deteksi Marka

Dalam rangka seleksi tanaman hasil kegiatan pemuliaan tanaman, teknik yang dapat digunakan untuk deteksi secara cepat adalah menggunakan teknik PCR. PCR ditemukan oleh Mullis pada tahun 1983 dan dipatenkan pada tahun 1985. *Polymerase Chain Reaction* adalah teknik biologi molekuler yang memiliki cara kerja dengan menggandakan (amplifikasi) fragmen atau urutan DNA tertentu secara eksponensial. Prinsip dasar dari PCR adalah penggunaan DNA polimerase yang merupakan replikasi *in vitro* dari urutan DNA tertentu. Metode ini dapat menghasilkan puluhan miliar salinan dari fragmen DNA tertentu (DNA target) dari ekstrak DNA (template DNA). PCR bekerja dengan mereplikasi urutan DNA target melalui siklus denaturasi, annealing, dan ekstensi yang memungkinkan deteksi dan analisis bahan genetik bahkan dari sampel yang sangat kecil, sampel yang rusak atau sudah terlalu lama. Dengan kata lain, PCR adalah teknik pemurnian atau kloning. Hal tersebut dikarenakan DNA mengandung banyak urutan nukleotida yang tidak semuanya menjadi DNA target sehingga penting untuk mengisolasi dan memurnikan sekuens yang diinginkan. Teknik PCR memiliki keunggulan sifat yang cepat, sensitif dan spesifik. Oleh sebab itu, penggunaan PCR untuk deteksi fragmen DNA masih terus berkembang dan digunakan.

DNA matriks yang tidak berada pada area yang diinginkan, tidak akan mengalami perubahan. Namun sebaliknya, jumlah sekuens yang teramplifikasi

(DNA target) jumlahnya akan mengganda dan menjadi sangat besar. Teknik PCR memungkinkan untuk digunakan dalam "*Cloning Asekluler*" dari sebuah fragmen DNA yang sebelumnya membutuhkan waktu berhari-hari apabila menggunakan teknik kloning molekuler standar. Teknik PCR juga banyak digunakan untuk membuat sidik jari genetik, identifikasi jenis hewan, tanaman dan mikroba. Di bidang biologi molekuler, teknik PCR saat ini telah menghasilkan banyak produk spesifik terutama di bidang karakterisasi dan konservasi keragaman genetik tanaman.

Teknik PCR meskipun memiliki banyak keunggulan, akan tetapi terdapat beberapa keterbatasan yang dapat mempengaruhi akurasi dan aksesibilitasnya antara lain resiko kontaminasi, keterbatasan design primer, penentuan suhu termal dalam proses PCR dan biaya yang dibutuhkan tergolong tinggi. Meskipun teknik PCR memiliki akurasi yang tinggi, namun kontaminan DNA sekecil apapun yang tidak sesuai target dapat menjadi bahan kontaminan yang akan mempengaruhi hasil. Teknik PCR juga memerlukan urutan DNA pendek yang disebut primer untuk memulai amplifikasi, apabila primer tidak didesain dengan benar maka akan menyebabkan kesalahan. Selanjutnya, pada tahap PCR diperlukan suhu *annealing* yang presisi pada setiap tahanan dan metode real-time PCR yang memerlukan mesin dan bahan kimia yang mahal bahkan kadang sulit dijangkau untuk beberapa wilayah.

Prinsip teknik PCR adalah didasarkan pada proses alami replikasi DNA yang terdiri dari tiga langkah utama yaitu *denaturation*, *annealing* dan *extension*. Pada tahap *denaturation*, untai ganda DNA dipanaskan untuk memisahkan untai ganda tersebut menjadi dua untai tunggal dengan menaikkan suhu pada suhu 94°C. Pada suhu 80°C, ikatan hidrogen tidak dapat dipertahankan dan untai ganda DNA terdenaturasi menjadi DNA untai tunggal. Pada tahap *annealing*, primer akan menempel pada DNA target di masing-masing untai DNA. Proses ini umumnya dilakukan pada suhu antara 40°C dan 70°C. Penurunan suhu memungkinkan ikatan hidrogen terbentuk kembali. Semakin tinggi suhu *annealing* maka semakin selektif dan spesifik proses annealing tersebut. Pada tahap *extension*, enzim DNA polimerase mensintesis untai DNA baru dengan menambahkan nukleotida primer sehingga menghasilkan amplifikasi urutan DNA target. Proses ini dilakukan pada suhu 72°C. Pada suhu 72°C, taq polimerase mengikat untai DNA tunggal yang telah dipriming dan mengkatalisis replikasi menggunakan dNTPS. Siklus ini kemudian diulang berkali-kali dan menghasilkan jutaan salinan segmen DNA target. Jumlah salinan segmen DNA target sangat bergantung dari variasi suhu *annealing* dan tingkat ke-spesifikasian primer yang digunakan. Dengan demikian, ada

beberapa komponen utama yang diperlukan dalam melaksanakan teknik PCR, yaitu:

- a. DNA template: DNA yang mengandung urutan target yang akan diperbanyak
- b. Primer: dua oligonukleotida pendek yang didesain secara spesifik untuk mengapit (berikatan di ujung) daerah DNA target
- c. DNA polimerase: enzim tahan panas (seperti Taq polimerase) yang berfungsi mensintesis untai DNA baru
- d. dNTPs (*Deoxynucleotide triphosphates*): bahan baku (nukleotida A, T, C, G) untuk membuat untai DNA baru
- e. Buffer dan Mg^{2+} : untuk menyediakan lingkungan kimia yang optimal untuk reaksi enzim

Sejak penemuannya, beberapa variasi teknik PCR dikembangkan untuk memenuhi kebutuhan penelitian. Jenis-jenis PCR antara lain PCR konvensional, *real-time* PCR, *digital* PCR (dPCR), *multiplex* PCR, quantitative PCR (qPCR), reverse transcription (RT-PCR), nested PCR (nPCR), *touchdown* PCR, *hot start* PCR, *colony* PCR dan *in situ* PCR. PCR konvensional merupakan teknik dasar dimana fragmen DNA target diamplifikasi menggunakan sepasang primer spesifik dan mesin *thermal cycler*. Hasilnya amplifikasi dapat dilihat setelah proses selesai melalui elektroforesis dan hasilnya bersifat kualitatif (ada atau tidaknya target DNA) dan ukuran fragmen DNA. PCR konvensional biasanya digunakan untuk mendeteksi patogen tanaman dan skrining keberadaan gen tertentu. Real-Time PCR (qPCR) memiliki cara kerja yang mirip dengan PCR konvensional, tetapi menggunakan zat fluoresen. Metode ini hasilnya bersifat kuantitatif (menentukan jumlah awal DNA/RNA target) dan kualitatif serta tidak memerlukan elektroforesis. Metode ini juga dapat diaplikasikan untuk analisis ekspresi gen dan mendeteksi tanaman transgenik. Selanjutnya RT-PCR, memiliki cara kerja yang digunakan untuk memperbanyak RNA target dengan tahap pertama, enzim *reverse transcription* digunakan untuk mengubah RNA menjadi *complementary* DNA (cDNA), kemudian cDNA diamplifikasi dengan PCR konvensional atau RT-qPCR. Metode RT-PCR banyak dilakukan untuk mendeteksi virus tanaman, karena materi genetik virus berupa RNA dan tingkat analisis ekspresi gen pada tingkat mRNA. *Nested* PCR (nPCR) menggunakan dua pasang primer secara berturut-turut dalam dua putaran amplifikasi. Primer pertama menghasilkan produk yang lebih panjang, produk ini kemudian digunakan sebagai cetakan untuk primer kedua yang menempel di bagian dalam (*nested*) produk pertama. Metode nPCR memiliki keunggulan dalam meningkatkan sensitivitas dan

spesifisitas, karena target harus diamplifikasi oleh dua pasang primer. Metode nPCR biasanya digunakan untuk mendeteksi patogen dengan konsentrasi sangat rendah dalam sebuah sampel tanaman. *Multiplex* PCR (M-PCR) adalah teknik PCR yang menggunakan lebih dari satu pasang primer dalam satu tabung reaksi sama untuk memperbanyak target DNA yang berbeda secara simultan. Teknik M-PCR memiliki keunggulan menghemat waktu dan bahan dan banyak diaplikasikan skrining cepat untuk banyak patogen dan tanaman transgenik.

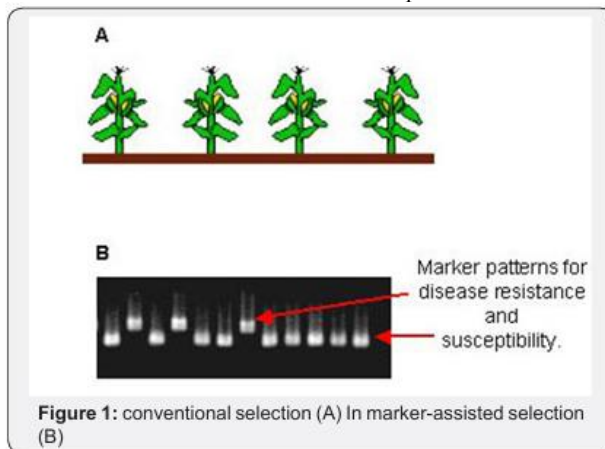
Teknik PCR merupakan metode yang membantu kegiatan deteksi marka molekuler. Marka/*marker* adalah penanda. Deteksi marka molekuler merupakan metode yang bertujuan untuk mengidentifikasi keberadaan, lokasi, variasi urutan DNA/RNA spesifik pada suatu genome organisme. Fungsi utama deteksi marka molekuler adalah untuk mengidentifikasi karakter/sifat, analisis keragaman genetik, pemetaan genetik dan *marker assisted selection* (MAS).

5.3 *Marker Assisted Selection* (MAS)

Marker Assisted Selection (MAS) atau penanda molekuler adalah alat yang digunakan untuk memetakan keragaman genetik. Dengan adanya MAS dapat meningkatkan jumlah informasi urutan DNA pada berbagai organisme untuk pengembangan penanda molekuler baru. Urutan genome lengkap tidak akan tersedia untuk seluruh spesies dalam waktu dekat sehingga penting untuk menemukan strategi untuk mengembangkan penanda molekuler ketika sumber informasi tersebut bersifat terbatas. Namun apabila urutan DNA tersedia, maka kemungkinan mendesain primer untuk amplifikasi di lokus spesifik dapat dilakukan. Akan tetapi, tidak semua lokus akan bersifat polimorfik. Polimorfisme pada penanda molekuler menunjukkan keberadaan atau ketidakhadiran sebuah gen tertentu atau segmen kromosom yang diketahui mengandung alel yang diinginkan.

Penanda molekuler dapat digunakan untuk mempercepat proses kegiatan pemuliaan tanaman khususnya pada tahap seleksi. Pemulia dapat menyeleksi hanya pada individu yang membawa gen target, sehingga jumlah populasi yang diuji di lapangan lebih sedikit. Tidak terdapat pilihan terbaik untuk penanda molekuler yang dapat digunakan untuk semua situasi. Ada beberapa hal yang mempengaruhi pemilihan metode penanda molekuler antara lain tujuan penelitian, ketersediaan urutan yang spesifik pada organisme tertentu dan sifat biologis suatu spesies. Secara umum, penanda molekuler dapat digunakan untuk mempercepat proses seleksi pada program pemuliaan

tanaman. Hal ini disebabkan oleh penanda molekuler dapat menyeleksi pada tahap juvenil untuk sifat yang diekspresikan pada fase generatif. Selain itu, penanda molekuler juga dapat digunakan untuk mengevaluasi sifat-sifat yang diwariskan secara kuantitatif atau sensitif terhadap lingkungan seperti morfologi akar, ketahanan tanaman terhadap hama dan penyakit, toleransi terhadap cekaman kekeringan, salinitas ataupun toksisitas mineral. Penanda molekuler bersifat kodominan sehingga dapat membedakan kondisi homozigot dan heterozigot dari banyak lokus dalam satu generasi tanpa perlu pengujian keturunan. Penanda molekuler juga dapat melakukan seleksi tanaman berdasarkan sifat fenotipik dan biokimia secara bersamaan. Meskipun kelebihan tersebut banyak digunakan pada tanaman padi, namun dapat menggambarkan aplikasi teknik MAS untuk spesies lain. Seleksi konvensional yang mengharuskan penanaman keturunan sampai beberapa generasi dianggap kurang efisien apabila dibandingkan dengan seleksi melalui penanda molekuler. Hal tersebut diilustrasikan pada Gambar 20.



Gambar 20. Perbandingan seleksi secara konvensional dan melalui
Marker Assisted Selection Sumber: (Lema, 2018)

Banyak penelitian yang membahas terkait keragaman genetik dalam bidang pemuliaan tanaman. Marka DNA telah menjadi alat untuk mengkarakterisasi sumber daya genetik dan informasi mengenai lokus spesifik dalam bahan pemuliaan tanaman. Peningkatan sifat-sifat kompleks melalui seleksi fenotipik berulang memiliki banyak kendala dan kelemahan. Dengan menggunakan penanda genetik, seleksi berulang dapat dipercepat secara

signifikan. Dengan demikian, beberapa siklus seleksi dapat dilakukan dalam satu tahun sehingga akumulasi alel QTL yang menguntungkan dapat diketahui dengan segera untuk proses seleksi selanjutnya.

5.4 Pemanfaatan Marka dalam Program Pemuliaan

Pewarisan sifat pada tanaman adalah kunci keberhasilan program pemuliaan tanaman. Salah satu tujuan pemulia adalah mengetahui potensi dan keragaman genetik dari berbagai tanaman yang dapat dijadikan sebagai sumber tetua untuk menciptakan tanaman yang memiliki karakter tertentu. Dalam bidang pemuliaan tanaman marka molekuler dapat digunakan untuk memperbaiki langkah-langkah yang sudah ada. Keberhasilan program pemuliaan tanaman adalah dengan mendapatkan keragaman genetik yang tinggi. Marka molekuler dapat digunakan untuk mengidentifikasi plasma nutfah dan tanaman yang memiliki heterogenitas yang tinggi. Dengan perkembangan dan ketersediaan berbagai penanda molekuler dan peta genetika molekuler, MAS dapat menunjukkan sifat-sifat yang dikendalikan oleh gen utama maupun lokus tertentu. Oleh sebab itu dikenal istilah QTLs (*Quantitative Trait Locus*) yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi lokus tertentu yang mengatur karakter poligenik. Selain itu, marka molekuler juga digunakan untuk mempercepat integrasi pewarisan sifat. Program pemuliaan tanaman terkadang menggabungkan spesies liar dengan spesies lokal. Gen-gen dari spesies liar apabila dikawinkan dengan spesies lokal akan menghasilkan keragaman genetik yang sangat tinggi. Potensi terjadinya silang balik juga semakin tinggi yang mengakibatkan proses pemuliaan tanaman semakin panjang. Adanya pautan gen dari spesies liar seringkali membawa gen-gen resesif yang tidak diinginkan. Dengan adanya marka molekuler khususnya QTLs, maka genom dan gen dari genotipe liar yang tidak diinginkan dapat diminimalisir dengan mengurangi fragmen tersebut dan melakukan identifikasi pada lokus-lokus tertentu yang mengatur karakter yang diinginkan.

Pemanfaatan marka molekuler lainnya adalah untuk memecahkan kendala yang terdapat pada pemuliaan konvensional. Melalui pemuliaan konvensional dibutuhkan waktu dan tenaga yang besar untuk melakukan seleksi. Pemuliaan tanaman dengan karakter poligenik akan sangat sulit dideteksi apabila hanya menggunakan karakter morfologi. Sebagai contoh, pemulia ingin mengintroduksi ketahanan tanaman terhadap kutu daun melalui backcross. Proses eliminasi gen-gen resesif yang tidak diinginkan dapat dideteksi melalui marka molekuler. Persilangan *backcross* dan marka molekuler

merupakan langkah untuk mempercepat proses pemuliaan tanaman terutama untuk gen dengan fenotipe yang tidak dapat dibedakan secara morfologi.

Pemanfaatan marka dalam program pemuliaan tanaman banyak dilakukan untuk menganalisis keragaman genetik dan keberadaan suatu gen tertentu. Berdasarkan hasil penelitian (Elfianis et al., 2021) terkait analisis kekerabatan genetik tanaman padi di Kabupaten Kampar menggunakan penanda RAPD dengan hasil ditemukan 48 lokus dengan ukuran pita DNA antara 350-1700 bp, persentase rata-rata lokus polimorfik adalah 49,80% dan diketahui jarak genetiknya kisaran 0,06-0,37. Nilai jarak genetik berkisar 0-1, nilai 1 menunjukkan hubungan kekerabatan yang sangat jauh dan nilai 0 menunjukkan kekerabatan yang sangat dekat (Mulliadi and Arifin, 2010). Marka molekuler juga banyak digunakan untuk konfirmasi gen pada kegiatan perakitan galur harapan padi tahan hama wereng coklat. Jenis marka yang digunakan adalah SSR (*Simple Sequence Repeat*). Berdasarkan penelitian yang dilakukan dapat diketahui bahwa dengan bantuan SSR, seleksi dapat dilakukan secara lebih cepat dan akurat untuk mengetahui galur harapan yang memiliki ketahanan terhadap wereng batang coklat. Ditemukan sebanyak 63 genotipe tanaman padi yang telah diseleksi berdasarkan marka molekuler untuk disilang balik dengan tetua recipient melalui primer RM8213 yang menjadi ketahanan gen bph pada tanaman padi (Carsono et al., 2016). Penelitian lainnya juga memanfaatkan marka molekuler yaitu SNP (*Single Nucleotide Polymorphism*) untuk menyediakan informasi urutan basa nitrogen pada tanaman padi subspecies Indica dan Japonica (Feltus et al., 2004). Marka molekuler sangat bermanfaat untuk program pemuliaan tanaman.

5.5 Keuntungan Penggunaan Marka Molekuler

Marka molekuler memberikan banyak manfaat dalam program pemuliaan tanaman. Sudah banyak program pemuliaan tanaman yang menggunakan marka molekuler untuk proses seleksi, seperti pada tanaman padi yang menggunakan metode SNP dan SSR untuk seleksi gen ketahanan terhadap hama wereng dan blast, tanaman kedelai menggunakan metode SSR untuk seleksi varietas yang memiliki kadar protein tinggi, serta seleksi pada tanaman bawang putih menggunakan SSR dan RAPD untuk mengetahui keragaman genetik antar varietas.

Beberapa keunggulan marka molekuler adalah memiliki akurasi tinggi, tidak dipengaruhi lingkungan, dapat melakukan deteksi secara dini, efisiensi waktu dan biaya jangka panjang, mendukung pemuliaan berbasis marka, dapat digunakan untuk identifikasi individu atau spesies dan cocok untuk kegiatan

analisis keragaman genetik. Marka molekuler memiliki akurasi tinggi karena bekerja langsung pada DNA dan tidak terpengaruh oleh lingkungan. Marka molekuler juga dapat mendeteksi dini sebelum individu menunjukkan fenotipnya, misalnya mendeteksi gen tahan penyakit saat fase pembibitan. Alat dan bahan yang digunakan untuk melakukan kegiatan marka molekuler tergolong mahal di awal, namun untuk kegiatan jangka panjang proses seleksi dalam pemuliaan dapat menghemat waktu dan biaya. Selain itu, marka molekuler dapat membedakan individu yang sangat mirip secara morfologis dan tidak dapat dibedakan secara fenotipik, namun dapat membedakan sampai pada level gen dan DNA. Keunggulan marka molekuler yang sangat bermanfaat untuk kegiatan pemuliaan tanaman adalah dapat menganalisis keragaman genetik yang berfungsi untuk menilai tingkat keragaman genetik dalam suatu populasi.

Marka molekuler berbasis DNA juga memiliki keunggulan dalam mengukur variasi DNA secara langsung terutama dalam mengukur terjadinya mutasi antar alel. Mutan hasil mutasi memiliki fenotipik yang abnormal dan sulit dideteksi kejadian abnormal tersebut disebabkan oleh efek mutagen atau pengaruh lingkungan. Sebagai contoh, kegiatan pemuliaan mutasi pada tanaman bawang putih. Pemuliaan mutasi merupakan kegiatan yang tidak dapat diprediksi hasilnya. Mutasi sering kali dianggap seperti menembak dalam karung. Sinar gamma sebagai mutagen fisik yang ditembakkan ke umbi bawang putih tidak dapat diprediksi akan menghasilkan mutan bawang putih dengan karakteristik tertentu. Hal ini disebabkan mutagen bisa saja mengenai bagian DNA bawang putih namun bisa saja tidak dapat menembus sel. Tanaman hasil mutasi memiliki sifat genotipe yang berbeda-beda meskipun diberikan perlakuan yang sama pada varietas yang sama. Oleh sebab itu, untuk mengidentifikasi mutan hasil mutasi dapat dilakukan dengan marka molekuler. Marka molekuler membantu mendeteksi keragaman genetik yang dihasilkan dari kegiatan mutasi tersebut. Langkah ini lebih presisi dan akurat daripada hanya mengidentifikasi mutan melalui keragaman morfologi, anatomi dan fisiologi. Dengan demikian marka molekuler mempercepat seleksi dengan memastikan gen target benar-benar terbawa pada galur/varietas baru sehingga efisiensi pemuliaan meningkat drastis.

DAFTAR PUSTAKA

- Carsono, N., Prayoga, G.I., Rostini, N., Dono, D., 2016. Seleksi Berbasis Marka Molekuler pada Padi Generasi F2 Guna Merakit Galur Padi Harapan Tahan Wereng Coklat. *Agrikultura* 27.
- Elfianis, R., Warino, J., Rosmaina, R., Suherman, S., Zulfahmi, Z., 2021. Analisis Kekerabatan Genetik Tanaman Padi (*Oryza sativa* L.) Di Kabupaten Kampar dengan menggunakan Penanda *Random Amplified Polymorphic* DNA (RAPD). *Jurnal Agroteknologi* 11, 75.
- Feltus, F.A., Wan, J., Schulze, S.R., Estill, J.C., Jiang, N., Paterson, A.H., 2004. An SNP Resource for Rice Genetics and Breeding Based on Subspecies Indica and Japonica Genome Alignments 14, 1812–1819.
- Lema, M., 2018. Marker Assisted Selection in Comparison to Conventional Plant Breeding: Review Article. *Agri Res & Tech: Open Access J* 14.
- Mulliadi, D., Arifin, J., 2010. Pendugaan Keseimbangan Populasi dan Heterozigositas Menggunakan Pola Protein Albumin Darah pada Populasi Domba Ekor Tipis (Javanese Thin Tailed) di Daerah Indramayu. *Jurnal Ilmu ternak* 10, 65–72.

BAB 6

TEKNOLOGI CRISPR DAN *GENE EDITING*

Oleh: Erlin Susilowati

6.1 Prinsip Dasar CRISPR-Cas 9

Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats (CRISPR) merupakan sebuah metode revolusioner dalam bidang bioteknologi dan rekayasa genetika yang memungkinkan peneliti untuk melakukan pengeditan gen secara presisi. Teknologi ini bekerja dengan cara mengubah, mengganti, memperbaiki, menghapus (*delesi*), maupun menyisipkan (*insersi*) bagian DNA pada makhluk hidup sesuai dengan target gen yang diinginkan.

CRISPR-Cas9 diadaptasi dari mekanisme pertahanan alami bakteri terhadap serangan virus, yaitu kemampuan bakteri dalam menyimpan informasi genetik dari virus yang pernah menyeranginya dalam bentuk sekuens DNA pendek. Informasi tersebut kemudian digunakan sebagai panduan untuk mengenali dan menghancurkan materi genetik virus pada serangan berikutnya (Wolyniak et al., 2025). Dengan mengadopsi sistem alami ini, para ilmuwan dapat memanfaatkan CRISPR-Cas9 untuk tujuan manipulasi genetik pada berbagai organisme. Dengan kemampuannya tersebut, CRISPR tidak hanya menjadi alat yang efisien untuk memahami fungsi gen, tetapi juga berpotensi besar dalam berbagai aplikasi praktis, seperti rekayasa benih unggul. Oleh karena itu, CRISPR dianggap sebagai salah satu inovasi paling signifikan dalam sejarah biologi molekuler modern.

6.1.1 Komponen Utama CRISPR-Cas9

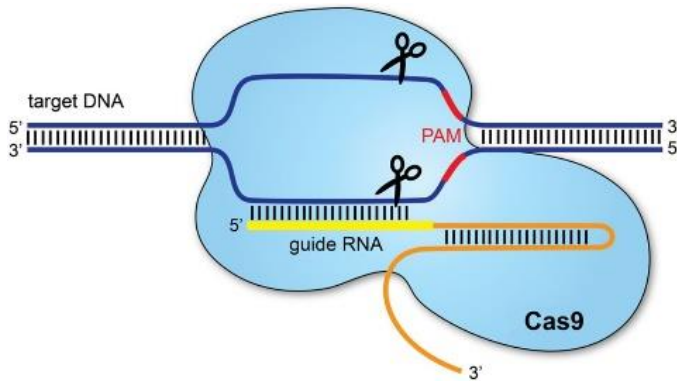
CRISPR-Cas9 memiliki 3 komponen utama, yaitu: enzim Cas9 (CRISPR-associated protein-9 nuclease), RNA pemandu (*guide* RNA/gRNA), dan *protospacer adjacent motif* (PAM). Enzim Cas9 yaitu sebuah protein endonuklease yang berfungsi sebagai "gunting molekuler" untuk memotong DNA di lokasi tertentu yang telah ditentukan oleh gRNA. Secara umum, gRNA terdiri dari dua komponen utama:

1. crRNA (CRISPR RNA) → berfungsi sebagai penentu target, karena mengandung urutan basa yang komplementer dengan DNA sasaran.

2. *tracrRNA* (*trans-activating* CRISPR RNA) → berfungsi menstabilkan struktur gRNA dan membantu berikatan dengan enzim Cas9.

Dalam penerapannya, kedua komponen ini sering digabung menjadi satu molekul tunggal yang disebut single guide RNA (sgRNA).

Selain itu, dalam teknologi CRISPR-Cas9 juga terdapat PAM, yaitu sekuens DNA pendek (biasanya 2–6 basa nukleotida) yang terletak tepat di sebelah target DNA yang ingin dipotong oleh enzim Cas9. Keberadaan PAM sangat penting karena menjadi “sinyal pengenalan” bagi Cas9 agar dapat menempel dan melakukan pemotongan pada lokasi yang tepat. Tanpa adanya PAM, Cas9 tidak akan bisa mengikat DNA target, meskipun urutan DNA yang dituju sesuai dengan *guide* RNA (gRNA).



Gambar 21. Prinsip dasar CRISPR-Cas9 (Redman et al., 2016)

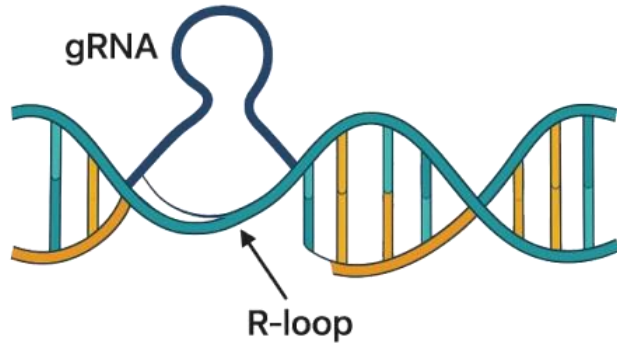
6.1.2 Mekanisme Kerja CRISPR-Cas9

Secara umum, mekanisme kerja CRISPR-Cas9 dapat dibagi menjadi 3 tahap utama, yaitu: rekognisi, pemotongan, dan perbaikan DNA (Shao et al., 2016).

1. Rekognisi

Tahap rekognisi/pengenalan sekuens target merupakan faktor kunci untuk memastikan pemotongan DNA secara presisi. Tahap ini dimulai dengan pembentukan kompleks antara Cas9 dan gRNA yang berfungsi sebagai pemandu untuk mencari lokasi target pada DNA. Kompleks ini terlebih dahulu mengenali sekuens PAM, sebagai sinyal awal agar Cas9 dapat menempel pada DNA sasaran. Setelah PAM dikenali, Cas9 membuka heliks DNA di sekitarnya

sehingga memungkinkan gRNA melakukan pencocokan basa dengan sekuens DNA target. Jika terdapat kesesuaian sekuens (komplementer), maka terbentuk heteroduplex RNA-DNA yang menstabilkan ikatan. Proses ini menghasilkan struktur R-loop.



Gambar 22. Tahap rekognisi CRISPR-Cas9

2. Pemotongan

Setelah struktur R-loop terbentuk, enzim Cas9 akan mengalami perubahan konformasi yang mengaktifkan dua domain nuklease penting, yaitu HNH domain dan RuvC domain. HNH domain berfungsi memotong untai DNA yang komplementer dengan gRNA, sementara RuvC domain memotong untai DNA yang berlawanan atau non-komplementer. Pemotongan oleh kedua domain tersebut menghasilkan patahan untai ganda atau *double-strand break* (DSB) yang terletak beberapa pasangan basa di hulu dari PAM.

3. Perbaikan DNA

Setelah Cas9 memotong DNA target dan menghasilkan DSB, sel akan mengaktifkan mekanisme perbaikan DNA untuk mempertahankan stabilitas genom. Ada dua jalur utama perbaikan yang digunakan, yaitu:

a. *Non-Homologous End Joining* (NHEJ)

NHEJ adalah jalur perbaikan yang paling sering terjadi karena lebih cepat dan tidak memerlukan template DNA. Pada mekanisme ini, ujung-ujung DNA yang terputus langsung digabungkan kembali oleh *repairing enzyme*. Namun, proses ini cenderung menghasilkan indel (*insertion-deletion*) kecil, sehingga

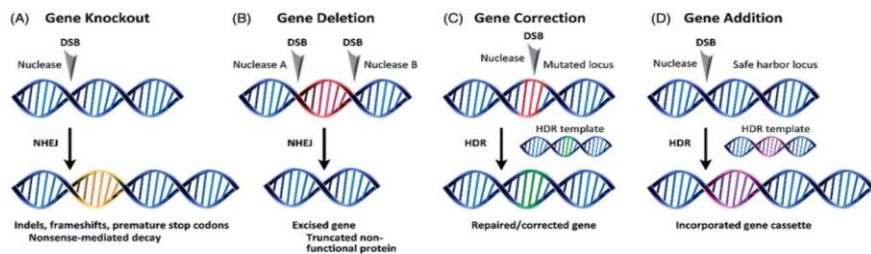
dapat menyebabkan mutasi pada gen target. Mutasi inilah yang sering dimanfaatkan untuk menghasilkan *knock-out* gen.

b. *Homology-Directed Repair (HDR)*

HDR adalah jalur perbaikan yang lebih presisi. Sel memerlukan template DNA donor yang memiliki urutan homolog dengan daerah sekitar potongan DNA. Dengan adanya template ini, sel dapat memperbaiki DNA dengan benar sekaligus menyisipkan perubahan genetik yang diinginkan, misalnya mengganti, memperbaiki, atau menambahkan gen tertentu.

6.1.3 Bentuk Perubahan Gen dengan CRISPR-Cas9

Dalam teknologi CRISPR-Cas9, pengubahan gen (*gene editing*) dapat dilakukan dengan beberapa cara, tergantung pada jalur perbaikan DNA yang diaktifkan setelah pemotongan (*double-strand break/DSB*). Tiga bentuk utama pengeditan dengan CRISPR-Cas9, sebagai berikut:



Gambar 23. Bentuk perubahan gen dengan CRISPR-Cas9 (Angeline, 2020)

1. Disrupsi atau Penghancuran Gen (*Gene Knockout*)

Jika Cas9 memotong DNA pada lokasi target, sel biasanya memperbaikinya dengan mekanisme NHEJ. Jalur ini sering menghasilkan indel, yaitu penambahan atau penghapusan beberapa basa. Indel ini dapat menggeser kerangka baca (*frameshift mutation*) atau merusak urutan kodon penting, sehingga gen menjadi tidak aktif. Metode ini sering digunakan untuk membuat organisme model dengan *knockout* gen.

2. Delesi (Penghapusan Fragmen DNA Besar)

Jika digunakan dua gRNA yang menargetkan dua lokasi berbeda dalam satu gen atau kromosom, Cas9 akan memotong di kedua titik tersebut. Setelah itu, mekanisme NHEJ akan menyambungkan kembali ujung-ujung DNA yang terpisah, dan fragmen di antaranya

akan hilang. Cara ini berguna untuk menghapus sekuens tertentu, misalnya bagian gen yang membawa mutasi penyakit atau elemen pengganggu.

3. Koreksi atau Inseri (*Gene Correction / Gene Knock-In*)

Jika bersama dengan sistem CRISPR diberikan template DNA donor yang memiliki urutan homolog dengan daerah di sekitar potongan, maka sel dapat menggunakan mekanisme HDR. Jalur ini memungkinkan perbaikan gen secara presisi, seperti mengganti mutasi menjadi urutan normal, atau bahkan menyisipkan gen baru ke dalam lokasi target.

6.1.4 Kelebihan dan Kekurangan CRISPR-Cas9

Sebagai suatu teknologi baru, CRISPR-Cas9 tentu memiliki kelebihan dan kekurangan. Menurut (Radbakhsh dan Moghaddam, 2024), kelebihan CRISPR-Cas9 terletak pada kesederhanaan, fleksibilitas, dan efisiensinya dalam mengedit gen. Desain gRNA yang relatif mudah dan murah memungkinkan sistem ini diarahkan ke hampir semua gen hanya dengan mengganti urutan gRNA, tanpa perlu rekayasa protein kompleks seperti pada teknologi sebelumnya (misalnya ZFN atau TALEN). CRISPR-Cas9 juga memiliki kemampuan bekerja pada berbagai organisme, mulai dari bakteri, tumbuhan, hingga hewan, sehingga aplikasinya sangat luas, baik dalam bidang pertanian, kesehatan, maupun penelitian dasar. Selain itu, sistem ini mendukung berbagai jenis modifikasi genetik, seperti *knock-out*, *knock-in*, koreksi mutasi, hingga regulasi ekspresi gen, menjadikannya salah satu teknologi paling serbaguna dalam bioteknologi modern.

Namun, CRISPR-Cas9 juga masih memiliki kekurangan yang menjadi tantangan besar. Salah satunya adalah risiko *off-target effect*, yaitu pemotongan DNA pada lokasi yang mirip dengan target, sehingga dapat menimbulkan mutasi yang tidak diinginkan. Selain itu, CRISPR-Cas9 bergantung pada keberadaan sekuens PAM, sehingga tidak semua lokasi gen dapat dijangkau dengan mudah. Mekanisme perbaikan DNA dalam sel juga tidak selalu bekerja sesuai keinginan peneliti, karena NHEJ lebih dominan dibandingkan HDR, sehingga menyulitkan ketika dibutuhkan pengeditan presisi. Di luar aspek teknis, CRISPR juga menghadapi isu etika dan keamanan, khususnya terkait penggunaan pada manusia, karena pengeditan gen yang tidak terkendali dapat menimbulkan dampak biologis dan sosial yang serius.

6.2 Perbandingan dengan Teknologi *Gene Editing* Lain

Proses *genome editing* sampai saat ini masih membutuhkan waktu yang lama. Untungnya, adanya penemuan nuklease memungkinkan perbaikan dan kemajuan di bidang ini. Berikut perbandingan beberapa teknologi *genome editing* dengan metode nuclease (**Tabel 15**):

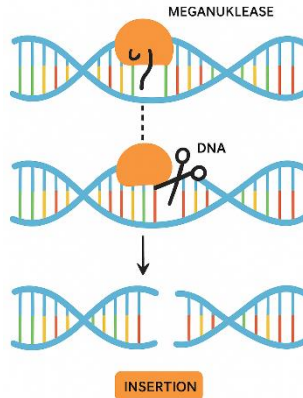
Tabel 15. Perbedaan beberapa teknologi genome editing (Nicole Lynn, 2023)

Perbedaan	MNs	ZFNs	TALENs	CRISPR-Cas9
Panjang DNA target	~14-40pb	9-18 pb	30-40 pb	22 pb + PAM
Mekanisme pengenalan DNA target	Protein-DNA	DNA-interaksi protein	DNA-interaksi protein	Interaksi DNA-RNA melalui pasangan basa Watson-Crick
Mekanisme pembelahan dan perbaikan DNA	Putusnya DNA untai ganda	Putusnya DNA untai ganda yang disebabkan oleh FokI	Putusnya DNA untai ganda yang disebabkan oleh FokI	Putusnya untai tunggal atau ganda yang disebabkan oleh Cas9
Desain	Sulit, karena ukuran situs pengenalan yang besar sehingga jumlah yang dapat digunakan terbatas	Sulit, karena pustaka ZFN tersedia dengan spesifisitas target yang telah ditentukan sebelumnya, tetapi motif <i>finger zinc</i> yang dirangkai dalam susunan dapat memengaruhi spesifisitas motif <i>finger zinc</i> di sekitarnya	Mudah, karena motif TALE dengan spesifikasi target terdefinisi dengan baik	Mudah, karena desain SgRNA berdasarkan komplementaritas dengan DNA target

6.2.1 *Meganuclease* (MNs)

Meganuclease merupakan enzim DNase untai ganda yang memiliki kemampuan untuk membelah DNA pada situs pengenalan yang khas dengan panjang relatif besar, bahkan dapat mencapai lebih dari 40 nukleotida. Karena kemampuannya tersebut, *meganuclease* sering dijuluki sebagai “gunting DNA”, yakni suatu enzim yang mampu mengenali sekaligus memotong segmen DNA dalam ukuran yang cukup panjang. *Meganuclease* umumnya dikodekan oleh intron bergerak, sementara target pemotongannya biasanya ditemukan pada gen homolog yang tidak memiliki intron tersebut.

Mekanisme kerjanya dimulai dengan pengikatan *meganuclease* pada sekuens DNA yang sesuai dengan daerah pengenalan, kemudian enzim tersebut melakukan pemotongan pada untai ganda DNA. Setelah pemotongan terjadi, elemen genetik bergerak yang membawa kode *meganuclease* dapat disisipkan ke dalam lokasi pemotongan tersebut, sehingga memungkinkan terjadinya perpindahan genetik (**Gambar 24**).



Gambar 24. Mekanisme kerja *meganuclease*

Keunggulan penggunaan *meganuclease* dalam rekayasa genetik adalah toksisitasnya yang relatif rendah karena berasal dari sumber alami, sehingga lebih aman dibandingkan dengan beberapa enzim rekayasa lain. Selain itu, *meganuclease* memiliki tingkat spesifisitas yang sangat tinggi berkat panjangnya sekuens pengenalan. Panjang sekuens pengenalan ini biasanya tidak berulang dalam genom organisme, sehingga mengurangi risiko pemotongan di lokasi yang tidak diinginkan (*off-target*). Oleh karena itu, *meganuclease* menjadi salah satu alat penting dalam bioteknologi modern, terutama dalam bidang terapi

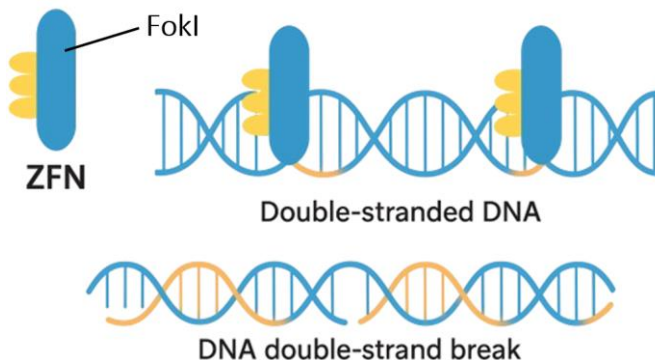
gen, rekayasa genom, dan pengembangan organisme hasil rekayasa genetik (GMO) dengan presisi yang tinggi.

6.2.2 Zinc Finger Nucleases (ZFNs)

Zinc Finger Nuclease merupakan salah satu teknologi awal yang digunakan dalam rekayasa genom berbasis target. Prinsip dasar dari ZFN adalah pemanfaatan *finger protein* dari seng, yaitu suatu faktor transkripsi alami yang mampu mengenali sekuens DNA tertentu, kemudian difusikan dengan domain pemotong DNA dari endonuklease restriksi, umumnya FokI.

ZFN memiliki kemampuan untuk mengenali urutan DNA spesifik sepanjang tiga pasangan basa. Dengan menggabungkan beberapa domain seng secara berurutan, maka dapat dibentuk suatu protein hibrida yang mampu mengenali sekuens DNA yang lebih panjang. Hal ini memberikan tingkat spesifisitas yang tinggi, karena setiap susunan domain seng secara bertahap menambah akurasi dalam mengenali target DNA.

Sementara itu, domain endonuklease FokI berfungsi sebagai "mesin pemotong" DNA, tetapi sifatnya inaktif jika berdiri sendiri. Aktivitas pemotongan hanya akan terjadi jika FokI membentuk dimer, yaitu ketika dua molekul FokI berpasangan. Oleh karena itu, untuk menghasilkan pemotongan DNA untai ganda, diperlukan dua molekul ZFN yang masing-masing mengenali sekuens berbeda yang letaknya berdekatan pada untai DNA berlawanan (Gambar 25). Mekanisme ini menciptakan kontrol alami, sebab pemotongan hanya terjadi bila kedua ZFN berhasil berikatan secara tepat di lokasi target, sehingga mengurangi kemungkinan pemotongan di luar target (*off-target effects*).



Gambar 25. Mekanisme kerja ZFN

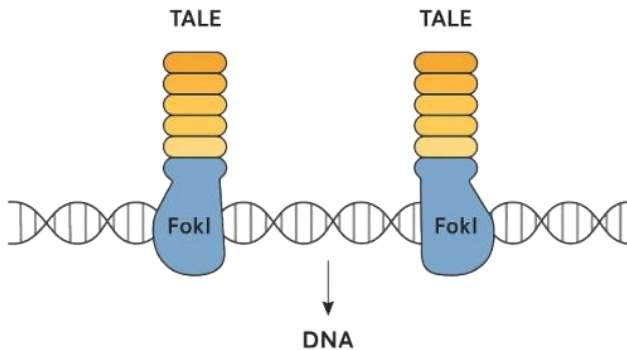
Desain dan penggunaan ZFN tidak sepenuhnya sederhana. Salah satu tantangan utamanya adalah bahwa motif ZFN yang ditempatkan bersebelahan dapat saling memengaruhi spesifisitas pengikatan, sehingga tidak selalu bekerja secara independen. Hal ini menjadikan perancangan susunan ZFN yang efisien lebih kompleks, karena setiap kombinasi baru berpotensi menghasilkan perubahan afinitas maupun spesifisitas pengikatan. Akibatnya, memprediksi dengan tepat sekuens DNA yang akan dikenali oleh ZFN sering kali sulit dilakukan. Meskipun memiliki keterbatasan teknis dalam desain dan prediksi spesifisitas, ZFN tetap menjadi salah satu pionir dalam teknologi rekayasa genom. Keberadaannya membuka jalan bagi lahirnya teknologi lain yang lebih modern dan presisi, seperti TALEN dan CRISPR-Cas9, yang kini lebih luas digunakan.

6.2.3 *Transcription Activator-Like Effector Nucleases (TALENs)*

TALENs merupakan enzim rekayasa hasil fusi antara protein TALE (*Transcription Activator-Like Effector*) yang berasal dari bakteri *Xanthomonas* dengan domain endonuklease FokI. Kehadiran TALEN menandai perkembangan penting dalam teknologi rekayasa genom, karena memberikan alternatif yang lebih mudah dirancang dibandingkan pendahulunya, yaitu ZFN.

Sama seperti ZFN, prinsip dasar TALEN terletak pada asosiasi spesifik antara protein dan DNA target. Pada TALEN, pengenalan sekuens DNA dilakukan oleh domain TALE, setiap motif TALE hanya mengenali satu nukleotida tunggal. Serangkaian motif TALE kemudian dapat disusun berurutan untuk membentuk suatu protein yang mampu mengenali sekuens DNA yang lebih panjang dengan presisi tinggi (Gambar 26). Berbeda dengan ZFN yang sering mengalami gangguan akibat interaksi antar-motif zinc finger yang berdekatan, domain TALE bekerja secara lebih independen. Artinya, aktivitas pengikatan satu motif TALE tidak memengaruhi spesifisitas motif TALE lain di sekitarnya. Hal inilah yang membuat desain dan rekayasa TALEN jauh lebih sederhana serta lebih dapat diprediksi dibandingkan ZFN.

Domain TALE pada TALEN juga difusikan dengan endonuklease FokI. Enzim FokI ini hanya aktif ketika berpasangan (dimerisasi), sehingga pemotongan DNA untai ganda akan terjadi apabila dua molekul TALEN berikatan secara bersamaan pada sekuens DNA target yang saling berdekatan tetapi berada pada untai DNA yang berlawanan. Mekanisme ini menambah tingkat spesifisitas dan mengurangi kemungkinan pemotongan pada lokasi yang tidak diinginkan (*off-target*).



Gambar 26. Mekanisme kerja TALEN

Dengan keunggulan berupa desain yang lebih mudah, tingkat spesifisitas yang tinggi, serta toksisitas yang relatif rendah, TALEN menjadi salah satu alat penting dalam rekayasa genom modern. Teknologi ini telah banyak dimanfaatkan dalam penelitian dasar biologi, terapi gen, rekayasa tanaman, serta pengembangan organisme hasil rekayasa genetika, meskipun kini sebagian perannya mulai tergantikan oleh sistem yang lebih baru dan fleksibel, seperti CRISPR-Cas9.

6.3 Aplikasi CRISPR dalam Pengembangan Benih Unggul

Kehadiran teknologi CRISPR-Cas9 memberikan terobosan baru karena mampu memodifikasi sifat genetika tanaman dengan presisi tinggi, cepat, dan efisien. Melalui pendekatan ini, berbagai sifat penting dapat diperbaiki atau ditingkatkan secara langsung pada genom tanaman, sehingga menghasilkan varietas unggul yang lebih adaptif, produktif, dan berkualitas tinggi. Berikut beberapa contoh aplikasi CRISPR dalam pengembangan benih unggul:

1. Peningkatan ketahanan terhadap penyakit

CRISPR-Cas9 dapat digunakan untuk memodifikasi gen tanaman agar lebih tahan terhadap serangan patogen (virus, bakteri, jamur). Misalnya, dengan mengedit atau menonaktifkan gen yang menjadi pintu masuk patogen, sehingga tanaman dapat membangun ketahanan alami tanpa perlu penggunaan pestisida berlebihan.

Contoh:

- Mutasi OsERA1 pada tanaman padi untuk meningkatkan ketahanan terhadap asam absisat dan kekeringan (Ogata et al., 2020)

- b. Seleksi tanaman anggur “Merlot” tahan patogen (Fizikova et al., 2024)
- c. Peningkatan ketahanan penyakit pada tanaman gandum (Waites et al., 2025)

2. Toleransi terhadap cekaman abiotik

CRISPR juga berperan dalam menciptakan benih yang mampu beradaptasi dengan kondisi lingkungan ekstrem, seperti kekeringan, salinitas, atau suhu tinggi. Hal ini penting untuk mendukung pertanian di wilayah dengan iklim yang tidak menentu akibat perubahan iklim global.

Contoh:

- a. Tomat tahan bercak bakteri dengan pengeditan SIJAZ2 (Ortigosa et al., 2019)
- b. *Knockout* faktor transkripsi OsbHLH024 yang dimediasi CRISPR/Cas9 untuk meningkatkan ketahanan terhadap stres garam pada padi (*Oryza sativa* L.) (Alam et al., 2022)
- c. Pengeditan CRISPR AsDREBL Meningkatkan Toleransi Stres Abiotik pada *Agrostis stolonifera* L. (Di et al., 2025)

3. Peningkatan kualitas

Dengan mengedit gen yang berhubungan dengan pertumbuhan dan perkembangan tanaman, CRISPR dapat menghasilkan varietas unggul dengan hasil panen lebih tinggi, umur panen lebih singkat, atau ukuran buah dan biji yang lebih besar.

Contoh:

- a. Rekayasa Genetika Indeks Panen Tembakau Melalui Overekspresi Gen Fitokrom (Robson et al., 1996)
- b. Peningkatan sifat yang berkaitan dengan hasil melalui pengeditan gen CLE pada jagung (Liu et al., 2021)
- c. Mutasi gen TaRPK1 yang dimediasi CRISPR/Cas9 menghasilkan peningkatan hasil pada gandum (Rahim et al., 2024)

DAFTAR PUSTAKA

- Rahim, A.A., Uzair, M., Rehman, N., Fiaz, S., Attia, K.A., Abushady, A.M., Hwan Yang, S., Ramzan Khan, M., 2024. CRISPR/Cas9 mediated TaRPK1 root architecture gene mutagenesis confers enhanced wheat yield. *J King Saud Univ Sci* 36. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2023.103063>
- Alam, M.S., Kong, J., Tao, R., Ahmed, T., Alamin, M., Alotaibi, S.S., Abdelsalam, N.R., Xu, J.H., 2022. CRISPR/Cas9 Mediated Knockout of the OsBHLH024 Transcription Factor Improves Salt Stress Resistance in Rice (*Oryza sativa* L.). *Plants* 11. <https://doi.org/10.3390/plants11091184>
- Angeline, K.W., 2020. CRISPR-Inovasi Biologi Molekuler dan Medis yang Kontroversial. *Analisis* 47, 218–284.
- Di, R., Ravikumar, S., Daddio, R., Bonos, S., 2025. CRISPR-Editing AsDREBL Improved Creeping Bentgrass Abiotic Stress Tolerance. *International Journal of Plant Biology* 16, 89. <https://doi.org/10.3390/ijpb16030089>
- Fizikova, A., Tukhuzheva, Z., Zhokhova, L., Tvorogova, V., Lutova, L., 2024. A New Approach for CRISPR/Cas9 Editing and Selection of Pathogen-Resistant Plant Cells of Wine Grape cv. 'Merlot.' *Int J Mol Sci* 25. <https://doi.org/10.3390/ijms251810011>
- Liu, L., Gallagher, J., Arevalo, E.D., Chen, R., Skopelitis, T., Wu, Q., Bartlett, M., Jackson, D., 2021. Enhancing grain-yield-related traits by CRISPR–Cas9 promoter editing of maize CLE genes. *Nat Plants* 7, 287–294. <https://doi.org/10.1038/s41477-021-00858-5>
- Nicole Lynn, 2023. CRISPR-Cas9, TALENs and ZFNs - the battle in gene editing – Proteintech Group [WWW Document]. <https://www.ptglab.com/news/blog/crispr-cas9-talens-and-zfns-the-battle-in-gene-editing/>. URL <https://www.ptglab.com/news/blog/crispr-cas9-talens-and-zfns-the-battle-in-gene-editing/> (accessed 9.9.25).
- Ogata, T., Ishizaki, T., Fujita, M., Fujita, Y., 2020. CRISPR/Cas9-targeted mutagenesis of OsERA1 confers enhanced responses to abscisic acid and drought stress and increased primary root growth under nonstressed conditions in rice. *PLoS One* 15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0243376>

- Ortigosa, A., Gimenez-Ibanez, S., Leonhardt, N., Solano, R., 2019. Design of a bacterial speck resistant tomato by CRISPR/Cas9-mediated editing of *SlJAZ2*. *Plant Biotechnol J* 17, 665–673. <https://doi.org/10.1111/pbi.13006>
- Radbakhsh, S., Moghaddam, H.N., 2024. Advantages, Disadvantages and Risks of CRISPR/Cas9 Technique for Gene Therapy. *Advanced Therapies Journal* 6, 27–35. <https://doi.org/10.22034/atj.2024.198823>
- Redman, M., King, A., Watson, C., King, D., 2016. What is CRISPR/Cas9? *Arch Dis Child Educ Pract Ed* 101, 213–215. <https://doi.org/10.1136/archdischild-2016-310459>
- Robson, P. r h, McCormac, A.C., Irvine, A.S., Smith, H., 1996. Genetic engineering of harvest index in tobacco through overexpression of a phytochrome gene. *Nat Biotechnol* 14, 995–998.
- Shao, M., Xu, T.R., Chen, C.S., 2016. The big bang of genome editing technology: development and application of the CRISPR/Cas9 system in disease animal models. *Dongwuxue Yanjiu*. <https://doi.org/10.13918/j.issn.2095-8137.2016.4.191>
- Waites, J., Achary, V.M.M., Syombua, E.D., Hearne, S.J., Bandyopadhyay, A., 2025. CRISPR-mediated genome editing of wheat for enhancing disease resistance. *Front Genome Ed*. <https://doi.org/10.3389/fgeed.2025.1542487>
- Wolyniak, M.J., Pattison, D.L., Pieczynski, J.N., Santisteban Editors, M.S., 2025. Introduction to CRISPR-Cas9 Techniques Learning Materials in Biosciences. Springer, USA.

BAB 7

PRODUKSI BENIH TRANSGENIK

Oleh: Sakka Samudin

7.1 Konsep Tanaman Transgenik

Tanaman transgenik merupakan hasil dari penerapan teknologi rekayasa genetika yang memungkinkan masuknya satu atau lebih gen asing (*transgen*) ke dalam genom tanaman tertentu. Melalui pendekatan ini, gen dari organisme lain dapat dipindahkan secara langsung untuk menghasilkan tanaman dengan sifat baru yang sebelumnya tidak dapat dicapai melalui metode pemuliaan konvensional. Proses transfer gen ini dilakukan menggunakan teknik seperti *Agrobacterium tumefaciens-mediated transformation* atau *particle bombardment*, yang keduanya memungkinkan penyisipan gen ke dalam sel tanaman secara presisi. Inovasi ini menandai kemajuan penting dalam bidang bioteknologi pertanian karena membuka peluang luas bagi modifikasi genetik lintas spesies dengan tingkat keberhasilan yang tinggi (Agrawal & Rami, 2022; Ebrahimi & A. Hashemi, 2025).

Tujuan utama dari pengenalan gen tersebut umumnya adalah untuk memperkuat ketahanan tanaman terhadap tekanan biotik seperti serangan hama dan penyakit, maupun tekanan abiotik seperti kekeringan, salinitas, dan suhu ekstrem. Selain itu, teknologi ini juga diarahkan untuk meningkatkan mutu hasil panen, baik dari segi nilai gizi, produktivitas, maupun umur simpan produk. Melalui pengembangan tanaman transgenik, sektor pertanian memperoleh alternatif strategis untuk menjawab tantangan global seperti keterbatasan lahan dan perubahan iklim yang kian kompleks. Dengan kemampuan adaptif dan efisiensi produksinya, tanaman hasil rekayasa genetika berpotensi mendukung ketersediaan pangan berkelanjutan dan memperkuat ketahanan pangan dunia (Huey et al., 2022; Ashoka P. et al., 2023).

Prinsip dasar dari pengembangan tanaman transgenik adalah pemahaman terhadap dogma sentral biologi molekuler, di mana DNA sebagai pembawa informasi genetik dapat dimodifikasi dan disisipkan ke dalam genom tanaman. Proses ini melibatkan isolasi gen target, konstruksi vektor ekspresi, transformasi ke sel tanaman, dan regenerasi tanaman baru yang membawa sifat transgenik. Salah satu teknik paling umum adalah penggunaan

Agrobacterium tumefaciens sebagai vektor alami, meskipun metode *gene gun* atau biolistika juga banyak digunakan untuk tanaman tertentu (Huang et al., 2016).

Perbedaan mendasar antara tanaman transgenik dengan hasil persilangan konvensional terletak pada kecepatan dan ketepatan. Pemuliaan konvensional sering membutuhkan waktu bertahun-tahun untuk menggabungkan sifat unggul, sementara teknik transgenik memungkinkan introduksi satu sifat spesifik secara langsung ke dalam varietas yang sudah beradaptasi di lapangan. Oleh karena itu, teknologi ini dianggap lebih efisien dan presisi, meskipun memerlukan pengawasan ketat terkait aspek keamanan hayati dan etika (Ammann, 2014; Kumar et al., 2018).

Konsep tanaman transgenik tidak hanya mencakup peningkatan hasil dan ketahanan, tetapi juga pengembangan sifat nutrisi dan fungsional. Sebagai contoh, beras emas (*Golden Rice*) dikembangkan dengan menambahkan gen yang berperan dalam biosintesis β -karoten untuk mengatasi defisiensi vitamin A. Demikian pula, beberapa tanaman transgenik telah dikembangkan untuk menurunkan kandungan alergen, meningkatkan kandungan protein, atau memodifikasi komposisi minyak nabati. Inovasi ini menunjukkan bahwa transgenik bukan hanya instrumen peningkatan produksi, melainkan juga strategi untuk perbaikan gizi masyarakat (Sandhu et al., 2023).

Namun, penerimaan masyarakat terhadap tanaman transgenik masih bervariasi. Di beberapa negara maju, resistensi publik muncul akibat kekhawatiran akan dampak kesehatan, lingkungan, dan dominasi korporasi multinasional. Sementara itu, di negara berkembang, tanaman transgenik lebih diterima karena manfaat langsungnya dalam mengurangi kerugian akibat hama dan meningkatkan produktivitas pertanian. Oleh karena itu, pemahaman konsep tanaman transgenik harus selalu dikaitkan dengan aspek ilmiah, regulasi, dan sosial-ekonomi (Qaim, 2020).

Secara keseluruhan, konsep tanaman transgenik mencerminkan perkembangan pesat dalam bidang bioteknologi pertanian yang berorientasi pada efisiensi, ketahanan, dan keberlanjutan produksi pangan. Dengan regulasi yang ketat serta pendekatan komunikasi sains yang tepat, teknologi ini dapat menjadi solusi inovatif untuk mendukung ketahanan pangan global, mengurangi dampak perubahan iklim, serta memperkuat sistem pertanian modern. Masa depan tanaman transgenik akan semakin terarah pada integrasi dengan teknik baru seperti penyuntingan gen CRISPR/Cas, yang menjanjikan modifikasi genetik lebih presisi dan dapat diterima publik lebih luas (Scheben & D. Edwards, 2017).

7.2 Teknik Transformasi Genetik (*Agrobacterium* & Biolistik)

Transformasi genetik merupakan tahapan krusial dalam pengembangan tanaman transgenik, karena memungkinkan penggabungan gen asing yang memiliki fungsi spesifik ke dalam genom tanaman sasaran. Melalui proses ini, peneliti dapat memperkenalkan gen baru yang berasal dari spesies lain untuk memberikan sifat-sifat unggul seperti ketahanan terhadap hama, toleransi terhadap stres lingkungan, atau peningkatan kandungan nutrisi. Keberhasilan transformasi genetik tidak hanya bergantung pada kemampuan memasukkan gen asing, tetapi juga pada kestabilan ekspresinya dalam jaringan tanaman yang ditransformasi (Raji et al., 2018).

Salah satu metode yang paling banyak digunakan adalah transformasi yang dimediasi oleh *Agrobacterium tumefaciens*, yaitu bakteri tanah yang secara alami mampu mentransfer sebagian DNA-nya (T-DNA) ke dalam sel tanaman. Pendekatan ini dianggap efisien karena menghasilkan integrasi gen yang stabil dan biasanya hanya melibatkan sedikit salinan gen yang disisipkan. Selain itu, metode ini relatif tidak merusak jaringan tanaman dan memberikan peluang lebih besar bagi ekspresi gen yang konsisten dalam generasi berikutnya. Teknik ini telah berhasil diterapkan pada berbagai spesies tanaman dikotil seperti kedelai, tomat, dan tembakau, serta beberapa tanaman monokotil setelah dilakukan modifikasi prosedur.

Metode transformasi lain yang banyak digunakan adalah biolistik atau penembakan partikel, yang melibatkan penyisipan DNA asing ke dalam sel tanaman menggunakan partikel mikroskopis yang dilapisi DNA. Meskipun metode ini cenderung lebih kasar terhadap jaringan tanaman dibanding pendekatan *Agrobacterium*, biolistik memiliki keunggulan utama dalam hal cakupan spesies karena dapat diterapkan pada tanaman yang sulit diinfeksi oleh bakteri tersebut, termasuk sebagian besar tanaman monokotil seperti padi dan jagung. Dengan demikian, kombinasi kedua teknik ini memungkinkan perluasan cakupan spesies tanaman yang dapat dimodifikasi secara genetik, serta membuka peluang lebih besar dalam pengembangan varietas unggul dengan sifat yang diinginkan secara presisi (Raji et al., 2018).

Metode *Agrobacterium*-mediated transformation memanfaatkan kemampuan alami bakteri tanah ini dalam mentransfer segmen DNA tertentu yang disebut T-DNA ke dalam sel tanaman inang. Proses ini terjadi secara alami pada tanaman yang terinfeksi *Agrobacterium tumefaciens*, di mana bakteri tersebut menyisipkan sebagian materi genetiknya ke dalam genom tanaman untuk membentuk jaringan tumor atau *crown gall*. Teknologi modern kemudian memodifikasi mekanisme alami ini dengan mengganti gen

penyebab tumor dengan gen asing yang diinginkan, sehingga T-DNA menjadi vektor alami yang efisien untuk transformasi tanaman (Schwarzacher, 2009).

Dalam perkembangannya, teknik ini menjadi metode standar di banyak laboratorium bioteknologi tanaman karena integrasi gen yang dihasilkan cenderung tunggal dan stabil. Integrasi tunggal berarti hanya satu atau beberapa salinan gen yang disisipkan ke dalam kromosom tanaman, sehingga ekspresi gen menjadi lebih konsisten antar generasi. Selain itu, risiko mutasi insersi dan ketidakstabilan genetik yang sering terjadi pada metode fisik dapat diminimalkan. Faktor-faktor ini menjadikan metode *Agrobacterium* sangat ideal untuk tanaman model maupun tanaman pangan penting seperti kedelai, tomat, dan kentang (Karthikeyan et al., 2011).

Keunggulan lain dari teknik ini adalah kemudahan penerapannya dan biaya yang relatif rendah dibandingkan metode lainnya. Banyak spesies tanaman, termasuk gandum, barley, dan oat, telah menunjukkan efisiensi transformasi yang tinggi menggunakan pendekatan ini. Protokol kerja *Agrobacterium*-mediated transformation juga lebih ramah terhadap jaringan tanaman, karena tidak memerlukan tekanan fisik ekstrem atau bahan kimia berbahaya. Kombinasi antara efisiensi biologis dan keterjangkauan menjadikan metode ini tetap relevan dalam pengembangan varietas transgenik baru yang berorientasi pada peningkatan ketahanan terhadap cekaman biotik dan abiotik.

Sebaliknya, metode biolistik atau *particle bombardment* menggunakan pendekatan fisik untuk mentransfer DNA ke dalam sel tanaman. Dalam teknik ini, partikel mikroskopis yang terbuat dari emas atau tungsten dilapisi DNA dan ditembakkan ke jaringan tanaman dengan kecepatan tinggi menggunakan perangkat yang disebut *gene gun*. DNA yang menempel pada partikel kemudian menembus dinding dan membran sel tanaman, sehingga dapat berintegrasi dengan genom tanaman sasaran (Matsumoto & Gonsalves, 2011).

Keunggulan utama dari metode biolistik terletak pada fleksibilitasnya dalam mentransformasi berbagai jenis spesies tanaman, termasuk tanaman yang sulit diinfeksi oleh *Agrobacterium*. Misalnya, tanaman monokotil seperti jagung, gandum, dan beberapa varietas kapas serta kedelai berhasil ditransformasi menggunakan pendekatan ini. Biolistik juga memungkinkan peneliti mentransfer DNA tanpa bergantung pada kompatibilitas antara inang dan bakteri, yang sering kali menjadi kendala pada metode biologis. Namun, teknik ini juga memiliki kelemahan, seperti risiko menghasilkan banyak salinan

gen yang terintegrasi secara acak, yang dapat mengganggu ekspresi gen target dan menyebabkan ketidakstabilan genetik pada keturunan berikutnya.

Walaupun demikian, metode biolistik tetap penting dalam penelitian tanaman transgenik, terutama pada tahap eksplorasi awal atau pada spesies yang masih sulit ditransformasi dengan pendekatan biologis. Kemajuan dalam teknologi partikel dan sistem penembakan juga terus memperbaiki efisiensi serta menurunkan tingkat kerusakan jaringan akibat proses penembakan. Dengan adanya optimasi dalam ukuran partikel, tekanan gas, dan kondisi jaringan tanaman, metode biolistik kini mampu menghasilkan tingkat transformasi yang lebih stabil dan dapat diandalkan untuk berbagai aplikasi bioteknologi tanaman modern.

Perkembangan terbaru menunjukkan adanya upaya untuk menggabungkan metode *Agrobacterium* dan biolistik guna memperoleh efisiensi transformasi yang lebih tinggi. Pendekatan hibrida ini memanfaatkan keunggulan biologis dari *Agrobacterium* dalam menghasilkan integrasi gen yang stabil dan keunggulan fisik biolistik dalam menembus dinding sel tanaman yang sulit diinfeksi. Studi yang dilakukan pada kapas dan kedelai memperlihatkan bahwa kombinasi keduanya meningkatkan tingkat regenerasi tanaman transgenik, mengurangi pembentukan tanaman chimera, serta mempercepat proses regenerasi jaringan (Gurusaravanan et al., 2020; Paes de Melo et al., 2020).

Dari segi stabilitas jangka panjang, metode *Agrobacterium* terbukti lebih unggul karena menghasilkan jumlah salinan gen yang lebih sedikit dan integrasi gen yang lebih rapi. Sebaliknya, transformasi dengan biolistik sering kali menghasilkan banyak salinan gen yang dapat menimbulkan gangguan pada kaset ekspresi atau bahkan menonaktifkan gen target. Oleh karena itu, untuk pengembangan varietas transgenik yang ditujukan untuk pelepasan komersial, *Agrobacterium* masih menjadi pilihan utama (Mohammed et al., 2019).

Meskipun demikian, keputusan pemilihan metode transformasi tetap bergantung pada spesies tanaman, infrastruktur laboratorium, serta tujuan modifikasi genetik yang diinginkan. Dalam konteks produksi benih transgenik, faktor efisiensi, biaya, waktu regenerasi, serta kepatuhan terhadap regulasi biosafety perlu menjadi pertimbangan utama. Dengan pendekatan yang tepat, baik metode biologis maupun fisik dapat saling melengkapi untuk mendukung kemajuan bioteknologi pertanian yang berkelanjutan dan berdaya saing tinggi (Gurusaravanan et al., 2020; Mohammed et al., 2019).

Dalam hal stabilitas dan ekspresi gen jangka panjang, metode *Agrobacterium* masih unggul. Studi perbandingan menunjukkan bahwa tanaman hasil transformasi *Agrobacterium* memiliki tingkat salinan gen yang lebih rendah dan integrasi gen yang lebih utuh dibandingkan dengan metode biolistik, yang cenderung menghasilkan banyak salinan dan kerusakan pada kaset ekspresi gen (Mohammed et al., 2019).

Kedua metode transformasi ini secara umum digunakan dalam produksi benih transgenik tergantung pada spesies target, infrastruktur laboratorium, dan tujuan modifikasi genetik. Oleh karena itu, pemilihan teknik yang tepat perlu mempertimbangkan efisiensi transformasi, biaya, waktu regenerasi, serta kepatuhan terhadap regulasi biosafety. Dalam konteks pertanian modern dan rekayasa genetika tanaman, baik metode *Agrobacterium* maupun biolistik tetap memainkan peran penting dalam mendukung inovasi varietas tanaman unggul.

7.3 Karakteristik dan Seleksi Tanaman Transgenik

Karakterisasi tanaman transgenik adalah tahap penting untuk memastikan bahwa gen asing yang diintroduksi telah berhasil terintegrasi secara stabil ke dalam genom tanaman. Proses ini melibatkan analisis molekuler seperti PCR, Southern blot, atau qPCR untuk mendeteksi keberadaan dan jumlah salinan gen transgenik. Selain itu, ekspresi fenotipik dari gen target juga diamati melalui parameter morfologi, fisiologi, dan biokimia. Deteksi awal bahkan bisa dilakukan dari biji, sehingga mempercepat siklus seleksi dan efisiensi produksi benih (Peterhänsel et al., 2004).

Seleksi tanaman transgenik pada tahap awal sering menggunakan penanda seleksi berbasis antibiotik atau herbisida, seperti gen *hpt* (*hygromycin phosphotransferase*) atau *bar* (*phosphinotricin acetyltransferase*). Meskipun efektif, pendekatan ini memiliki tantangan dari segi etika dan regulasi, karena penggunaan gen resistensi dapat memicu kekhawatiran terhadap keamanan pangan dan lingkungan. Oleh karena itu, sistem seleksi alternatif yang lebih ramah lingkungan terus dikembangkan, seperti penggunaan gen marka spesifik jaringan atau sistem berbasis metabolisme (Joersbo, 2001).

Salah satu pendekatan inovatif adalah penggunaan sistem seleksi spesifik kalus seperti *CSP:mALS*, yang hanya diekspresikan pada tahap kalus. Sistem ini tidak hanya mengurangi beban metabolik tanaman saat dewasa, tetapi juga meningkatkan akumulasi produk transgenik di dalam biji. Studi pada padi menunjukkan bahwa seleksi berbasis *CSP:mALS* menghasilkan akumulasi

protein transgenik yang 1,2 hingga 2 kali lebih tinggi dibandingkan sistem konvensional berbasis antibiotik (Wakasa & Takaiwa, 2012).

Metode seleksi modern juga memanfaatkan pendekatan non-destruktif seperti sistem fluoresensi. Salah satunya adalah penggunaan ekspresi gen penanda seperti *GFP* atau β -*glucosidase* yang memungkinkan identifikasi biji transgenik tanpa perlu perkecambahan. Teknik ini sangat efisien untuk skrining awal dalam jumlah besar dan mengurangi waktu serta ruang laboratorium secara signifikan. Seleksi berdasarkan fluoresensi juga menghindari penggunaan antibiotik dan lebih mudah diterima secara sosial dan regulatif (Li et al., 2020; Wei et al., 2004).

Karakterisasi lebih lanjut dilakukan untuk memastikan bahwa ekspresi gen asing tidak mengalami silencing atau ketidakstabilan pada generasi berikutnya. Analisis segregasi pada generasi T1 dan T2 sering dilakukan untuk menilai pola pewarisan gen dan mendeteksi tanaman yang telah menjadi homozigot. Teknik PCR kuantitatif dapat digunakan secara langsung pada bibit untuk mengidentifikasi status zigosititas, sehingga mempercepat pemuliaan menuju garis murni transgenik (German et al., 2003).

Di samping itu, untuk memperkuat karakterisasi molekuler, teknik seperti *droplet digital* PCR (dPCR) kini banyak digunakan karena kemampuan kuantisasi absolutnya yang lebih presisi dibandingkan qPCR konvensional, sehingga lebih andal untuk menentukan jumlah salinan gen dan status zigosititas pada tanaman dengan genom besar (F. Liu et al., 2021). Pendekatan ini sangat bermanfaat ketika ekspresi gen asing tampak fluktuatif atau cenderung mengalami silencing; dalam beberapa kasus, mutasi-tertarget atau modifikasi epigenetik (misalnya knockout elemen yang memicu metilasi) dapat digunakan untuk mengurangi risiko silencing dan memastikan ekspresi gen yang stabil dalam jangka panjang (Einhaus et al., 2025). Sebagai contoh, Tran et al., (2023) berhasil memodifikasi protokol qPCR universal berbasis elemen nos terminator untuk mengidentifikasi garis homogen (homozigotik) dengan akurasi mendekati 100 % pada tanaman padi T1, sekaligus menyajikan kerangka yang dapat diterapkan pada berbagai jenis tanaman transgenik lainnya. Implementasi teknik berkeandalan tinggi semacam ini menjadi kunci dalam mempercepat pemuliaan menuju garis murni transgenik yang stabil dan tahan terhadap dekade pengujian biotik dan abiotik.

Secara keseluruhan, seleksi dan karakterisasi tanaman transgenik merupakan proses krusial yang tidak hanya menjamin keberhasilan transformasi genetik, tetapi juga menjaga keamanan dan kualitas benih yang dihasilkan. Perkembangan teknik seleksi berbasis biologi molekuler, fisiologi,

dan bioteknologi memungkinkan efisiensi produksi yang lebih tinggi, serta kepatuhan terhadap standar biosafety yang semakin ketat di berbagai negara.

7.4 Keamanan Hayati dan Uji Lapangan

Keamanan hayati (*biosafety*) menjadi landasan penting dalam setiap fase pengembangan tanaman transgenik, terutama ketika tanaman tersebut akan dilepaskan ke lingkungan terbuka atau digunakan sebagai pangan. Tujuan utama penilaian biosafety adalah memastikan bahwa organisme hasil rekayasa genetika tidak membawa efek merugikan terhadap manusia, hewan, maupun lingkungan—baik secara langsung maupun tidak langsung. Dalam praktiknya, pengevaluasian meliputi uji toksisitas (termasuk analisis terhadap toksin metabolik dan senyawa baru), pengujian alergenitas (untuk memastikan bahwa protein baru tidak memicu reaksi alergi), analisis dampak terhadap organisme non-target (misalnya serangga, mikroba tanah, tanaman liar), serta pemantauan stabilitas gen dan ekspresinya di berbagai kondisi lingkungan. Selain itu, aspek kemungkinan transfer gen (*horizontal gene transfer* atau *gene flow*) ke tanaman terkait liar atau varietas non-transgenik juga menjadi perhatian penting dalam kerangka biosafety (Domingo, 2025; Liu, 2025).

Lebih jauh lagi, penilaian keamanan hayati kini juga mencakup analisis ekologi jangka panjang di lapangan, yang memantau dinamika populasi organisme non-target, kualitas tanah (termasuk aktivitas enzim dan biomassa mikroba), serta potensi munculnya resistensi atau adaptasi ekologis baru. Misalnya, beberapa studi menunjukkan bahwa efek tanaman transgenik terhadap mikroba tanah cenderung bersifat menarik (sifatnya fluktuatif dan tergantung konteks lahan) daripada efek yang konsisten merusak (Wei & Stewart, 2023). Regulasi internasional seperti Protokol Cartagena memberikan kerangka normatif yang mengedepankan prinsip kehati-hatian (*precautionary principle*) dalam penanganan organisme termodifikasi secara lintas batas negara. Evaluasi biosafety secara komprehensif—meliputi aspek kesehatan pangan, ekologi, sosial-ekonomi, dan etika—menjadi prasyarat agar pelepasan tanaman transgenik mendapat kepercayaan dari masyarakat dan otoritas regulator (Koch et al., 2025).

Sebelum dilakukan uji lapangan, tanaman transgenik harus melewati serangkaian uji laboratorium dan rumah kaca untuk menilai stabilitas genetik dan ekspresi fenotipik. Setelah itu, uji lapangan dilakukan untuk mengamati perilaku tanaman dalam kondisi lingkungan alami serta potensi interaksinya dengan ekosistem sekitar. Hal ini meliputi pengamatan terhadap efisiensi

agronomis, dampak ekologis, dan risiko penyebaran gen transgenik melalui aliran gen (*gene flow*) (Saraswathi et al., 2018; Bravo-Almonacid et al., 2012).

Salah satu tantangan utama dalam biosafety adalah potensi perpindahan gen dari tanaman transgenik ke spesies liar atau kerabat dekat melalui penyerbukan silang. Risiko ini sangat tergantung pada spesies tanaman, karakteristik gen yang ditransfer, dan kondisi geografis tempat uji lapangan dilakukan. Strategi mitigasi seperti penggunaan *buffer zone*, modifikasi plastid (*plastome transformation*), atau gen mitigator telah dikembangkan untuk membatasi risiko tersebut (Gressel, 2010).

Dalam praktiknya, pelaksanaan uji lapangan melibatkan perizinan dan pengawasan ketat dari lembaga pemerintah. Di banyak negara, terdapat sistem tiga tingkat pengawasan yang mencakup komite keamanan hayati institusional, komite nasional, dan komite pengawasan genetik. Hal ini bertujuan untuk memastikan bahwa setiap pelepasan terbatas tanaman transgenik dilakukan secara bertanggung jawab dan sesuai dengan protokol yang telah ditetapkan (Sriwatanapongse et al., 1997).

Uji lapangan juga dimanfaatkan untuk menilai performa agronomis tanaman transgenik secara langsung. Misalnya, penelitian terhadap varietas padi transgenik menunjukkan bahwa tanaman tersebut memiliki kinerja agronomis dan daya hasil yang lebih tinggi dibandingkan varietas non-transgenik, tanpa menunjukkan efek negatif terhadap komponen lingkungan lokal (Dastan et al., 2020).

Asesmen biosafety juga mencakup pengujian terhadap kemungkinan efek alelopati dan pengaruh terhadap biodiversitas. Studi terhadap tanaman poplar transgenik menunjukkan tidak adanya zat alelopati berbahaya, serta tidak ada perbedaan signifikan terhadap keanekaragaman hayati di lingkungan sekitar uji lapangan, mendukung kesimpulan bahwa pelepasan tanaman tersebut relatif aman secara ekologis (Taniguchi et al., 2008).

Namun, tidak semua negara memiliki infrastruktur regulasi dan kapasitas teknis yang cukup untuk mengelola biosafety secara efektif. Di negara berkembang, keterbatasan ini menjadi hambatan besar dalam pengembangan bioteknologi lokal. Rendahnya kesiapan hukum dan teknologi menyebabkan ketergantungan pada perusahaan multinasional dan membatasi akses terhadap pengembangan transgenik yang berbasis kebutuhan lokal (Katen, A, 2016).

Sebagai kesimpulan, keamanan hayati dan uji lapangan merupakan tahap krusial dalam siklus produksi benih transgenik. Regulasi yang ketat, sistem pengawasan yang transparan, serta pendekatan ilmiah berbasis risiko

diperlukan untuk memastikan bahwa teknologi ini dapat dimanfaatkan secara aman dan berkelanjutan, baik dari segi lingkungan maupun sosial.

7.5 Contoh Aplikasi Transgenik pada Tanaman Komersial

Penerapan teknologi transgenik pada tanaman komersial telah menjadi tonggak penting dalam revolusi pertanian modern. Tanaman transgenik dirancang dengan cara menyisipkan gen asing ke dalam genom tanaman untuk menghasilkan sifat-sifat unggul seperti resistensi terhadap hama, toleransi terhadap herbisida, atau peningkatan kandungan nutrisi. Produksi benih transgenik dilakukan melalui metode rekayasa genetika, di mana gen target dimasukkan menggunakan teknik seperti *Agrobacterium tumefaciens*-mediated transformation atau gene gun. Setelah seleksi dan karakterisasi, benih yang membawa sifat diinginkan diperbanyak secara konvensional dalam sistem perbenihan formal (Cheng et al., 2024; Pallett, 2022).

Salah satu contoh yang paling berhasil adalah tanaman kapas Bt (*Bt cotton*), yang mengandung gen dari bakteri *Bacillus thuringiensis* (gen Cry) yang menghasilkan toksin spesifik terhadap serangga tertentu, seperti *Helicoverpa armigera*. Dengan mekanisme ini, tanaman kapas secara aktif melindungi dirinya dari serangan hama, sehingga mengurangi kebutuhan pestisida kimia dan meningkatkan hasil panen (Ahmad et al., 2019; Cattaneo et al., 2006; Qaim & Zilberman, 2003).

Salah satu contoh tanaman transgenik yang paling dikenal secara global adalah jagung transgenik MON 810, yang dikembangkan oleh Monsanto. Varietas ini mengandung gen *Cry1Ab* yang berasal dari bakteri *Bacillus thuringiensis* (Bt), sehingga mampu menghasilkan protein toksik spesifik terhadap hama penggerek batang jagung (*Ostrinia nubilalis*). Protein Bt tersebut bekerja dengan merusak saluran pencernaan larva serangga target tanpa memengaruhi organisme non-target atau manusia. Mekanisme ini menjadikan MON 810 sangat efektif dalam mengendalikan serangan hama utama dan menekan penggunaan pestisida kimia. Selain itu, ekspresi gen yang stabil dan kompatibilitas dengan berbagai latar belakang genetik menjadikan varietas ini mudah diintegrasikan dalam program pemuliaan jagung komersial di berbagai wilayah. Dengan demikian, MON 810 menjadi tonggak penting dalam sejarah rekayasa genetika tanaman, yang menandai transisi dari eksperimen laboratorium menuju penerapan luas dalam sistem pertanian modern (Bertho et al., 2020).

Lebih lanjut, penerapan jagung Bt MON 810 telah memberikan dampak ekonomi, ekologis, dan sosial yang nyata bagi sektor pertanian di berbagai

negara. Hasil kajian multi-lokasi menunjukkan peningkatan produktivitas antara 5–25% tergantung intensitas serangan hama dan kondisi lingkungan, serta pengurangan penggunaan insektisida hingga 60%. Secara ekonomi, petani memperoleh margin keuntungan yang lebih tinggi karena biaya produksi menurun, terutama dalam hal tenaga kerja dan bahan kimia pengendali hama. Secara ekologis, keberadaan jagung Bt turut menurunkan residu pestisida di tanah dan air, mendukung konservasi serangga penyerbuk, serta menjaga keseimbangan agroekosistem. Dampak positif ini mendorong negara-negara produsen besar seperti Amerika Serikat, Brasil, dan Filipina untuk memperluas areal tanam MON 810 dan varietas sejenis, menjadikannya simbol keberhasilan bioteknologi pertanian modern yang berkelanjutan (Carzoli et al., 2018; Brookes, 2022).

Selain resistensi terhadap hama, modifikasi transgenik juga ditujukan pada toleransi herbisida. Tanaman kedelai “Roundup Ready” yang dikembangkan oleh Monsanto mengandung gen CP4-EPSPS yang memungkinkan tanaman bertahan dari aplikasi herbisida glifosat. Dengan demikian, petani dapat mengendalikan gulma secara efektif tanpa merusak tanaman utama (Rizqoni, et al., 2024; USDA, 2016). Di Amerika Serikat, lebih dari 90% lahan kedelai menggunakan varietas transgenik ini, membuktikan adopsinya yang luas (Maskar et al., 2015; Cheng et al., 2024; Pallett, 2022).

Tanaman canola atau rapeseed juga telah mengalami rekayasa genetik, terutama untuk sifat tahan herbisida dan modifikasi kandungan minyak. Beberapa varietas transgenik dikembangkan untuk menghasilkan profil minyak yang lebih sehat, seperti kandungan rendah asam lemak jenuh. Penanaman canola transgenik sangat populer di Kanada dan Australia karena memberikan hasil lebih tinggi dan pengendalian gulma yang lebih mudah (Rizzati et al., 2023).

Salah satu contoh paling inovatif dari penerapan rekayasa genetika dalam bidang pangan adalah Golden Rice, atau padi emas, yang dirancang untuk menghasilkan β -karoten—prekursor vitamin A—di bagian endosperma beras. Teknologi ini dikembangkan untuk menjawab permasalahan global kekurangan vitamin A (*Vitamin A Deficiency/VAD*), yang banyak ditemukan di negara berkembang, terutama di Asia dan Afrika, di mana beras merupakan makanan pokok utama. Kekurangan vitamin A dapat menyebabkan gangguan penglihatan, menurunkan sistem imun, bahkan meningkatkan risiko kematian pada anak-anak. Golden Rice dikembangkan dengan menyisipkan dua gen penting, yaitu *psy* (phytoene synthase) dari jagung dan *crtI* (carotene desaturase) dari bakteri *Pantoea ananatis*, yang secara sinergis mengaktifkan

jalur biosintesis karotenoid di endosperma padi—bagian yang secara alami tidak menghasilkan pigmen ini. Keberhasilan teknik ini menunjukkan bahwa pendekatan transgenik dapat digunakan tidak hanya untuk ketahanan hama, tetapi juga untuk peningkatan kandungan gizi tanaman pangan (Potrykus, 2001; Sowndarya, 2023; Palmer, 2025).

Meskipun potensinya besar sebagai solusi gizi publik, Golden Rice berada di persimpangan regulasi, sosial-politik, dan skeptisisme publik. Di Filipina, misalnya, meskipun tanaman ini telah disetujui untuk komersialisasi pada Juli 2021, pengajuan penanaman komersial kemudian dihentikan oleh putusan pengadilan pada 2024 menyusul gugatan terhadap penggunaan tanaman hasil rekayasa genetika (Dubock, 2024). Komunitas ilmiah terus mendorong agar penilaian keamanan hayati dan kajian lapangan dilanjutkan, terutama terkait bioavailabilitas vitamin A dari β -karoten dalam beras emas dan dampak agronomisnya di berbagai lokasi uji. Pada saat yang sama, proyek Golden Rice tetap dianggap tonggak penting dalam evolusi aplikasi bioteknologi untuk memperbaiki kualitas nutrisi pangan pokok secara berkelanjutan di negara berkembang (De Steur et al., 2022; Palmer, 2025).

India juga mengembangkan mustard transgenik DMH-11, yang menggunakan sistem gen Barnase-Barstar untuk menghasilkan sterilitas jantan, sehingga memungkinkan produksi hibrida dengan efisiensi tinggi. Selain itu, varietas ini tahan terhadap herbisida glufosinat. Meskipun masih menunggu persetujuan penuh, DMH-11 menawarkan potensi besar untuk meningkatkan produksi minyak nasional (Jayaraman, 2017; Kaur, 2023; Dwivedi et al., 2023).

Meskipun banyak manfaat yang ditawarkan, tanaman transgenik tetap menghadapi tantangan serius, terutama dalam hal biosafety, resistensi hama sekunder, dan penerimaan masyarakat. Oleh karena itu, pengujian ekologis, penilaian risiko kesehatan, serta pelibatan publik menjadi bagian integral dalam pengembangan dan peredaran benih transgenik (Chang et al., 2023; Wolt, 2009; Carstens et al., 2012). Stabilitas genetik dan regulasi ketat menjadi faktor penting untuk menjamin keberhasilan komersialisasi teknologi ini dalam jangka panjang.

DAFTAR PUSTAKA

- Agrawal, S., & Rami, E. (2022). A Review: Agrobacterium-mediated Gene Transformation to Increase Plant Productivity. *The Journal of Phytopharmacology*, 11(2), 111–117.
<https://doi.org/10.31254/phyto.2022.11211>
- Ahmad, S., Cheema, H. M. N., Khan, A. A., Khan, R. S. A., & Ahmad, J. N. (2019). Resistance status of *Helicoverpa armigera* against Bt cotton in Pakistan. *Transgenic Research*, 28(2), 199–212.
<https://doi.org/10.1007/s11248-019-00114-9>
- Ammann, K. (2014). Genomic misconception: A fresh look at the biosafety of transgenic and conventional crops. A plea for a process agnostic regulation. *New Biotechnology*, 31(1), 1–17.
<https://doi.org/10.1016/j.nbt.2013.04.008>
- Ashoka P., Sangeeta, Spandana, B., Saikanth, D. R. K., Kesarwani, A., Nain, M., Pandey, S. K., Singh, B. V., & Maurya, C. L. (2023). Bio-fortification and Its Impact on Global Health. *Journal of Experimental Agriculture International*, 45(10), 106–115.
<https://doi.org/10.9734/jeai/2023/v45i102203>
- Bertho, L., Schmidt, K., Schmidtke, J., Brants, I., Cantón, R. F., Novillo, C., & Head, G. (2020). Results from ten years of post-market environmental monitoring of genetically modified MON 810 maize in the European Union. *PLoS ONE*, 15(4), 1–19.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217272>
- Bravo-Almonacid, F., Rudoy, V., Welin, B., Segretin, M. E., Bedogni, M. C., Stolicz, F., Criscuolo, M., Foti, M., Gomez, M., López, M., Serino, G., Cabral, S., Dos Santos, C., Huarte, M., & Mentaberry, A. (2012). Field testing, gene flow assessment and pre-commercial studies on transgenic *Solanum tuberosum* spp. *tuberosum* (cv. Spunta) selected for PVY resistance in Argentina. *Transgenic Research*, 21(5), 967–982.
<https://doi.org/10.1007/s11248-011-9584-9>
- Brookes, G. (2022). Genetically Modified (GM) Crop Use 1996–2020: Environmental Impacts Associated with Pesticide Use CHANGE. *GM Crops and Food*, 13(1), 262–289.
<https://doi.org/10.1080/21645698.2022.2118497>
- Carstens, K., Anderson, J., Bachman, P., de Schrijver, A., Dively, G., Federici, B., Hamer, M., Gielkens, M., Jensen, P., Lamp, W., Rauschen, S., Ridley, G., Romeis, J., & Waggoner, A. (2012). Genetically modified crops and

- aquatic ecosystems: Considerations for environmental risk assessment and non-target organism testing. *Transgenic Research*, 21(4), 813–842. <https://doi.org/10.1007/s11248-011-9569-8>
- Carzoli, A. K., Aboobucker, S. I., Sandall, L. L., Lübberstedt, T. T., & Suza, W. P. (2018). Risks and opportunities of GM crops: Bt maize example. *Global Food Security*, 19(August), 84–91. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2018.10.004>
- Cattaneo, M. G., Yafuso, C., Schmidt, C., Huang, C. Y., Rahman, M., Olson, C., Eilers-Kirk, C., Orr, B. J., Marsh, S. E., Antilla, L., Dutilleul, P., & Carrière, Y. (2006). Farm-scale evaluation of the impacts of transgenic cotton on biodiversity, pesticide use, and yield. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103(20), 7571–7576. <https://doi.org/10.1073/pnas.0508312103>
- Chang, J. J., Mi, Z., & Wei, Y. M. (2023). Temperature and GDP: A review of climate econometrics analysis. *Structural Change and Economic Dynamics*, 66(March), 383–392. <https://doi.org/10.1016/j.strueco.2023.05.009>
- Cheng, X., Li, H., Tang, Q., Zhang, H., Liu, T., & Wang, Y. (2024). Trends in the global commercialization of genetically modified crops in 2023. *Journal of Integrative Agriculture*, 23(12), 3943–3952. <https://doi.org/10.1016/j.jia.2024.09.012>
- Dastan, S., Ghareyazie, B., & Abdollahi, S. (2020). Field trial evidence of non-transgenic and transgenic Bt. rice genotypes in north of Iran. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 18(1). <https://doi.org/10.1186/s43141-020-00028-8>
- De Steur, H., Stein, A. J., & Demont, M. (2022). From Golden Rice to Golden Diets: How to turn its recent approval into practice. *Global Food Security*, 32(November 2021), 100596. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2021.100596>
- Domingo, J. L. (2025). Genetically modified Crops: Balancing safety, sustainability, and global security. *Environmental Research*, 286(P2), 122892. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.122892>
- Dubock, A. (2024). Golden Rice: some considerations for Philippine pending legal decisions and expected local and global implications. *Medical Research Archives*, 12(8), 1–6. <https://doi.org/10.18103/mra.v12i8.5884>
- Dwivedi, S. L., Garcia-Oliveira, A. L., Govindaraj, M., & Ortiz, R. (2023). Biofortification to avoid malnutrition in humans in a changing climate: Enhancing micronutrient bioavailability in seed, tuber, and storage roots. *Frontiers in Plant Science*, 14(January), 1–24.

- <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1119148>
- Ebrahimi, V., & A. Hashemi. (2025). CRISPR-based gene editing in plants: Focus on reagents and their delivery tools. *Bioimpacts*, 15, 30019. <https://doi.org/10.34172/bi.30019>
- Einhaus, A., Krieger, A., Köhne, L., Rautengarten, B., Jacobebbinghaus, N., Saudhof, M., Baier, T., & Kruse, O. (2025). Genome editing of epigenetic transgene silencing in *Chlamydomonas reinhardtii*. *Trends in Biotechnology*, 43(8), 1961–1981. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2025.04.019>
- German, M. A., Kandel-Kfir, M., Swarzberg, D., Matsevit, T., & Granot, D. (2003). A rapid method for the analysis of zygosity in transgenic plants. *Plant Science*, 164(2), 183–187. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(02\)00381-3](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(02)00381-3)
- Gressel, J. (2010). Gene flow of transgenic seed-expressed traits: Biosafety considerations. *Plant Science*, 179(6), 630–634. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.02.012>
- Gurusaravanan, P., Vinoth, S., & Jayabalan, N. (2020). An improved *Agrobacterium*-mediated transformation method for cotton (*Gossypium hirsutum* L. ‘KC3’) assisted by microinjection and sonication. *In Vitro Cellular and Developmental Biology - Plant*, 56(1), 111–121. <https://doi.org/10.1007/s11627-019-10030-6>
- Huang, S., Weigel, D., Beachy, R. N., & Li, J. (2016). A proposed regulatory framework for genome-edited crops. *Nature Genetics*, 48(2), 109–111. <https://doi.org/10.1038/ng.3484>
- Huey, S. L., Krisher, J. T., Bhargava, A., Friesen, V. M., Konieczynski, E. M., Mbuya, M. N. N., Mehta, N. H., Monterrosa, E., Nyangaresi, A. M., & Mehta, S. (2022). *Food Products*. 1–25.
- Jayaraman, K. (2017). Activists bury India’s GM mustard hopes. *Nature Biotechnology*, 35(12), 1124. <https://doi.org/10.1038/nbt1217-1124a>
- Joersbo, M. (2001). Advances in the selection of transgenic plants using non-antibiotic marker genes. *Physiologia Plantarum*, 111(3), 269–272. <https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.2001.1110301.x>
- Karthikeyan, A., Pandian, S. K., & Ramesh, M. (2011). *Agrobacterium*-mediated transformation of leaf base derived callus tissues of popular indica rice (*Oryza sativa* L. sub sp. indica cv. ADT 43). *Plant Science*, 181(3), 258–268. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2011.05.011>
- Katen, A. de. (2016). *Biotechnology, Biosafety and Impact Assessment: Field Trials of Transgenic Crops in Developing Countries*. *Biosafety Journal*,

- 3(April 1997), 1–12.
- Kaur, A. (2023). GMOs Science Communication in India: The Broken Link between the Scientist and the Society. *Open Journal of Social Sciences*, 11(05), 221–235. <https://doi.org/10.4236/jss.2023.115016>
- Koch, M., DeMond, J., Pence, M. G., Schaefer, E. A., & Rudgers, G. (2025). One risk assessment for genetically modified plants. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 13(July), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2025.1619857>
- Kumar, M., Singh, S. P., Kumar, M., Kumar, A., Kumar, S., & Kumari, P. (2018). Biosafety Issues in Commercialization and Development of Transgenic Crops. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 7(04), 2161–2174. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.704.246>
- Li, M., Jiang, L. Y., Liu, Q., Wu, Y. H., Liu, G. D., Chen, Y. H., & Luo, L. J. (2020). A method combining TA cloning and fluorescence screening for rapid acquisition of transgenic seeds. *BioTechniques*, 68(5), 251–256. <https://doi.org/10.2144/BTN-2019-0141>
- Liu, A. (2025). Toward the effective implementation of the Biosafety Protocol: A Chinese regulatory capacity-building perspective. *Journal of Law and the Biosciences*, 12(1). <https://doi.org/10.1093/jlb/laf011>
- Liu, F., Cheng, J., Liu, X., & Wang, X. Q. (2021). High-throughput and accurate determination of transgene copy number and zygosity in transgenic maize: From dna extraction to data analysis. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(22). <https://doi.org/10.3390/ijms222212487>
- Maskar, D. H., Hardinsyah, H., Damayanti, E., Astawan, M., Wresdiyati, T., Hermanianto, J., & Winandita, T. (2015). Pengaruh Kedelai Produk Rekayasa Genetik Terhadap Kadar Malonaldehid, Aktivitas Superoksida Dismutase Dan Profil Darah Pada Tikus Percobaan. *Penelitian Gizi Dan Makanan (The Journal of Nutrition and Food Research)*, 38(1), 41–50. <https://doi.org/10.22435/pgm.v38i1.4421.41-48>
- Matsumoto, T. K., & Gonsalves, D. (2011). Biolistic and other non-Agrobacterium technologies of plant transformation. In *Plant Biotechnology and Agriculture: Prospects for the 21st Century* (First Edit, Issue 1989). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-381466-1.00008-0>
- Mohammed, S., Samad, A. A., & Rahmat, Z. (2019). Agrobacterium-Mediated Transformation of Rice: Constraints and Possible Solutions. *Rice Science*,

- 26(3), 133–146. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2019.04.001>
- Paes de Melo, B., Lourenço-Tessutti, I. T., Morgante, C. V., Santos, N. C., Pinheiro, L. B., de Jesus Lins, C. B., Silva, M. C. M., Macedo, L. L. P., Fontes, E. P. B., & Grossi-de-Sa, M. F. (2020). Soybean Embryonic Axis Transformation: Combining Biolistic and Agrobacterium-Mediated Protocols to Overcome Typical Complications of In Vitro Plant Regeneration. *Frontiers in Plant Science*, 11(August), 1–14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01228>
- Pallett, K. (2022). The Current Status of GM and GE Crops. *Outlooks on Pest Management*, April 2021, 10–13. <https://doi.org/10.1564/v32>
- Palmer, A. C. (2025). Golden Rice: A Quarter-Century of Innovation, Challenges, and the Promise of Better Nutrition. *Journal of Nutrition*, 155(9), 2846–2853. <https://doi.org/10.1016/j.tjnut.2025.06.025>
- Peterhänsel, C., Hahnen, S., Kalamajka, R., Offermann, S., Miedl, B., & Rüger, B. (2004). Quantitative detection of transgenic and endogenous DNA sequences in seeds after automated DNA preparation. *Biomedical Engineering - Applications, Basis and Communications*, 16(1), 1–6. <https://doi.org/10.4015/S1016237204000025>
- Potrykus, I. (2001). Golden rice and beyond. *Plant Physiology*, 125(3), 1157–1161. <https://doi.org/10.1104/pp.125.3.1157>
- Qaim, M. (2020). Role of New Plant Breeding Technologies for Food Security and Sustainable Agricultural Development. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 42(2), 129–150. <https://doi.org/10.1002/aep.13044>
- Qaim, M., & Zilberman, D. (2003). Yield effects of genetically modified crops in developing countries. *Science*, 299(5608), 900–902. <https://doi.org/10.1126/science.1080609>
- Raji, J. A., Frame, B., Little, D., Santoso, T. J., & Wang, K. (2018). Agrobacterium- and biolistic-mediated transformation of maize B104 inbred. *Methods in Molecular Biology*, 1676, 15–40. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-7315-6_2
- Rizzati, M., Standardi, G., Guastella, G., Parrado, R., Bosello, F., & Pareglio, S. (2023). The local costs of global climate change: spatial GDP downscaling under different climate scenarios. *Spatial Economic Analysis*, 18(1), 23–43. <https://doi.org/10.1080/17421772.2022.2096917>
- Sandhu, R., Chaudhary, N., Bindia, Shams, R., Singh, K., & Pandey, V. K. (2023). A critical review on integrating bio fortification in crops for sustainable agricultural development and nutritional security. *Journal of Agriculture and Food Research*, 14(October), 100830.

- <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100830>
- Saraswathi, M. S., Kalaiponmani, K., Uma, S., & Backiyarani, S. (2018). Critical Evaluation of the Benefits and Risks of Genetically Modified Horticultural Crops. In *Genetic Engineering of Horticultural Crops*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-810439-2.00014-3>
- Scheben, A., & D. Edwards. (2017). Genome Editors Take on Crops. *Science*, 355, 1–3.
- Schwarzacher, T. (2009). Transgenic Wheat, Barley and Oats. *Methods*, 478(1), 227–246. <https://doi.org/10.1007/978-1-59745-379-0>
- Sowndarya, K. (2023). Golden Rice : A Genetically Modified (GM) Food Golden Rice : A Genetically Modified (GM) Food. *Agriculture & Food: E-Newsletter*, 3(July 2021), 87–89.
- Sriwatanapongse, S., Wongsasithorn, D., & Attathom, S. (1997). Management of field testing of transgenic plants: Thailand experience. *The 3rd JIRCAS International Symposium: "The 4th International Symposium on The Biosafety Results of Field Tests of Genetically Modified Plants and Microorganisms"*. *JIRCAS International Symposium Series*, 5, 145-150 ST-Management of field testing of trans.
- Taniguchi, T., Ohmiya, Y., Kurita, M., Tsubomura, M., Kondo, T., Park, Y. W., Baba, K., & Hayashi, T. (2008). Biosafety assessment of transgenic poplars overexpressing xyloglucanase (AaXEG2) prior to field trials. *Journal of Wood Science*, 54(5), 408–413. <https://doi.org/10.1007/s10086-008-0967-3>
- Tran, H. T., Schramm, C., Huynh, M. M., Shavrukov, Y., Stangoulis, J. C. R., Jenkins, C. L. D., & Anderson, P. A. (2023). An accurate, reliable, and universal qPCR method to identify homozygous single insert T-DNA with the example of transgenic rice. *Frontiers in Plant Science*, 14(October), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1221790>
- Wakasa, Y., & Takaiwa, F. (2012). Use of a callus-specific selection system to develop transgenic rice seed accumulating a high level of recombinant protein. *Methods in Molecular Biology*, 847, 467–478. https://doi.org/10.1007/978-1-61779-558-9_36
- Wei, S., Bravdo, B. A., & Shoseyov, O. (2004). Fluorescent screening of transgenic arabidopsis seeds without germination. *Plant Physiology*, 135(2), 709–714. <https://doi.org/10.1104/pp.104.040709>
- Wei, W., & Stewart, C. N. (2023). Biosafety and Ecological Assessment of Genetically Engineered and Edited Crops. *Plants*, 12(13), 16–19. <https://doi.org/10.3390/plants12132551>

- Wolt, J. D. (2009). Advancing environmental risk assessment for transgenic biofeedstock crops. *Biotechnology for Biofuels*, 2(1), 1–13. <https://doi.org/10.1186/1754-6834-2-27>

BAB 8

BIOTEKNOLOGI BENIH

Oleh: Primadiyanti Arsela

8.1 Pendahuluan Umum

8.1.1 Definisi Bioteknologi

Bioteknologi adalah bidang ilmu yang menghasilkan produk atau teknologi yang bermanfaat bagi kehidupan manusia dengan menggunakan biologi, kimia, dan rekayasa. Secara sederhana, bioteknologi berarti menghasilkan barang dan jasa yang bermanfaat secara ekologis dan ekonomis dengan memanfaatkan organisme hidup, bagian organisme, atau produk metaboliknya. Bioteknologi dapat meningkatkan produksi pangan, kualitas tanaman, dan ketahanan tanaman terhadap berbagai pengganggu.

Revolusi genetika dan molekuler memengaruhi kemajuan bioteknologi saat ini. Pada awalnya, bioteknologi hanya terbatas pada pemuliaan konvensional, fermentasi, dan kultur jaringan. Namun, saat ini, bioinformatika, rekayasa genetika, pengeditan genom dengan CRISPR-Cas, dan penerapan teknologi omics (genomik, proteomik, dan metabolomik). Semua kemajuan ini memberikan peluang besar untuk mengatasi tantangan global dalam bidang pertanian, termasuk masalah ketahanan tanaman terhadap cekaman.

8.1.2 Relevansi Bioteknologi dalam Pertanian Modern

Pertanian modern dihadapkan pada tantangan yang semakin kompleks, mulai dari perubahan iklim, degradasi lahan, keterbatasan sumber daya air, hingga ancaman hama dan penyakit yang semakin beragam. Sementara itu, populasi dunia diproyeksikan mencapai lebih dari 9,7 miliar jiwa pada tahun 2050, sehingga kebutuhan pangan meningkat secara signifikan. Dalam kondisi seperti ini, pendekatan konvensional dalam pemuliaan tanaman saja tidak cukup untuk menghasilkan varietas unggul yang mampu bertahan di lingkungan ekstrem.

Bioteknologi hadir sebagai solusi strategis. Melalui teknologi ini, para ilmuwan dapat mengidentifikasi, mengisolasi, dan memodifikasi gen-gen penting yang berperan dalam ketahanan terhadap cekaman biotik maupun abiotik. Misalnya, gen toleransi kekeringan dari spesies tertentu dapat dipindahkan ke tanaman pangan utama, atau gen ketahanan terhadap serangga

dapat disisipkan ke dalam kapas untuk menghasilkan kapas Bt. Dengan demikian, bioteknologi tidak hanya meningkatkan produktivitas tetapi juga memperkuat ketahanan pangan secara global (Rahmawati and Fitrianingsih, 2023).

8.1.3 Konsep Cekaman pada Tanaman

Cekaman (stress) pada tanaman adalah kondisi lingkungan atau biologis yang menyebabkan gangguan fisiologis, morfologis, maupun biokimia sehingga pertumbuhan dan produktivitas tanaman menurun. Secara umum, cekaman dibagi menjadi dua kategori utama, yaitu:

1. Cekaman Abiotik, yaitu cekaman yang disebabkan oleh faktor lingkungan non-hidup, seperti kekeringan, salinitas, suhu ekstrem (panas maupun dingin), defisiensi atau toksisitas unsur hara, serta pencemaran logam berat. Cekaman abiotik seringkali bersifat kompleks karena beberapa faktor dapat terjadi secara bersamaan, misalnya kekeringan yang diikuti oleh suhu tinggi (Syafitri and Ikhsan Harahap, 2023).
2. Cekaman Biotik, yaitu cekaman yang berasal dari organisme hidup, seperti infeksi oleh bakteri, jamur, virus, nematoda, serangan serangga hama, atau kompetisi dengan gulma. Cekaman ini umumnya menimbulkan gejala khas pada tanaman, seperti bercak daun, layu, atau deformasi jaringan (Hidayat, Nurulita and Wiyono, 2012).

Kedua jenis cekaman tersebut dapat menurunkan hasil pertanian secara signifikan. Menurut laporan FAO, sekitar 20–40% hasil panen global hilang setiap tahun akibat hama, penyakit, dan gulma. Sementara itu, cekaman abiotik seperti kekeringan dan salinitas diperkirakan memengaruhi lebih dari 50% lahan pertanian di dunia. Fakta ini menunjukkan pentingnya strategi inovatif, termasuk bioteknologi, dalam mengurangi dampak cekaman terhadap pertanian (Avivi *et al.*, 2022).

8.1.4 Pentingnya Ketahanan Tanaman

Ketahanan tanaman terhadap cekaman menjadi kunci dalam menjamin stabilitas produksi pangan. Tanaman yang tidak mampu beradaptasi dengan kondisi lingkungan yang menekan akan menunjukkan penurunan pertumbuhan, penurunan fotosintesis, serta kerusakan jaringan yang pada akhirnya berdampak pada hasil panen. Oleh karena itu, pengembangan

tanaman yang tahan cekaman merupakan salah satu tujuan utama dalam program pemuliaan modern.

Bioteknologi menawarkan banyak peluang untuk mencapai tujuan tersebut. Misalnya, varietas tanaman dapat diperbanyak dengan cepat dan seragam melalui teknik kultur jaringan. Rekayasa genetika memungkinkan penempatan gen ketahanan yang spesifik tanpa membawa sifat yang tidak diinginkan. Sebaliknya, gen penting yang berkontribusi pada mekanisme toleransi dapat ditemukan melalui metode bioinformatika dan analisis genom. Semua metode ini membantu para ilmuwan membuat tanaman yang paling tahan lama (Putri *et al.*, 2021).

8.1.5 Hubungan Bioteknologi dengan Ketahanan Tanaman

Secara fundamental, hubungan bioteknologi dengan ketahanan tanaman dapat dipahami dalam beberapa aspek berikut:

1. **Identifikasi gen ketahanan:** Bioteknologi memungkinkan eksplorasi keragaman genetik dari berbagai spesies tanaman maupun mikroorganisme untuk menemukan gen-gen yang berperan penting dalam toleransi cekaman.
2. **Transfer gen dan rekayasa genom:** Gen yang telah diidentifikasi dapat dimasukkan ke dalam tanaman target melalui teknik transformasi genetik atau pengeditan genom sehingga tanaman tersebut memperoleh sifat ketahanan baru.
3. **Peningkatan mekanisme fisiologis:** Beberapa pendekatan bioteknologi bertujuan memperkuat mekanisme alami tanaman dalam menghadapi cekaman, seperti peningkatan produksi osmolit, protein pelindung, atau enzim antioksidan.
4. **Pemanfaatan mikroba:** Bioteknologi juga memfasilitasi pengembangan inokulan mikroba (misalnya bakteri rizosfer atau jamur mikoriza) yang dapat membantu tanaman menghadapi cekaman melalui peningkatan penyerapan hara atau produksi senyawa bioaktif.

8.2 Cekaman pada Tanaman

8.2.1 Definisi Cekaman

Dalam terminologi fisiologi tanaman, cekaman (stress) didefinisikan sebagai kondisi yang menyebabkan ketidakseimbangan antara kebutuhan metabolik tanaman dengan ketersediaan sumber daya yang diperlukan, baik dari lingkungan biotik maupun abiotik. Kondisi ini menimbulkan tekanan fisiologis sehingga fungsi normal tanaman terganggu. Respon tanaman

terhadap cekaman dapat berupa perubahan morfologi, fisiologi, biokimia, hingga molekuler (Bhuja *et al.*, 2022).

Konsep cekaman menjadi penting karena sebagian besar lingkungan pertanian tidaklah ideal. Meskipun pemuliaan tanaman berupaya menghasilkan varietas unggul, faktor lingkungan yang tidak menentu serta adanya interaksi dengan organisme lain seringkali mengurangi hasil panen yang sebenarnya dapat dicapai.

8.2.2 Klasifikasi Cekaman pada Tanaman

Cekaman pada tanaman secara umum dapat dibedakan menjadi dua kelompok besar, yaitu cekaman biotik dan cekaman abiotik.

1. Cekaman Biotik

- Disebabkan oleh makhluk hidup, termasuk patogen (jamur, bakteri, virus, nematoda) dan hama (serangga, tungau, vertebrata) (Paradisa *et al.*, 2022).
- Menyebabkan gejala khas pada tanaman, misalnya bercak daun akibat infeksi jamur, mosaik akibat virus, atau lubang-lubang daun akibat serangan serangga.
- Dampak cekaman biotik sangat bervariasi, mulai dari kerugian kecil hingga gagal panen total.

2. Cekaman Abiotik

- Disebabkan oleh faktor lingkungan fisik atau kimia yang tidak menguntungkan, seperti kekeringan, banjir, salinitas tinggi, suhu ekstrem, logam berat, dan radiasi (Pohan *et al.*, 2021).
- Cekaman abiotik seringkali lebih sulit dikendalikan karena terkait langsung dengan perubahan iklim dan kondisi lingkungan yang berada di luar kendali manusia.
- Dampaknya bersifat luas dan dapat menurunkan produktivitas tanaman hingga 50–80% pada kondisi tertentu.

Kedua jenis cekaman ini sering berinteraksi. Misalnya, tanaman yang kekurangan air lebih rentan terhadap infeksi patogen karena sistem pertahanannya melemah. Oleh karena itu, pendekatan dalam memahami cekaman harus bersifat integratif.

8.2.3 Cekaman Abiotik: Dampak dan Mekanisme

Cekaman abiotik merupakan salah satu faktor pembatas terbesar dalam produktivitas pertanian global. Beberapa bentuk cekaman abiotik yang penting antara lain:

1. Kekeringan

- Mengurangi ketersediaan air bagi tanaman sehingga proses fisiologis, terutama fotosintesis, terganggu (Syafitri and Ikhsan Harahap, 2023).
- Tanaman merespons dengan menutup stomata, mengurangi luas daun, dan meningkatkan sintesis osmolit (misalnya prolin dan trehalosa) untuk mempertahankan turgor sel.

2. Salinitas

- Tingginya kadar garam, terutama natrium (Na^+) dan klorida (Cl^-), menyebabkan ketidakseimbangan ion dan stres osmotik.
- Akibatnya, tanaman mengalami penghambatan pertumbuhan akar dan daun, serta penurunan aktivitas fotosintesis (Syafitri and Ikhsan Harahap, 2023).

3. Suhu Tinggi (*Heat Stress*)

- Mengakibatkan denaturasi protein, kerusakan membran sel, dan peningkatan produksi spesies oksigen reaktif (ROS).
- Beberapa tanaman memproduksi *heat shock proteins* (HSPs) untuk membantu mempertahankan struktur protein penting.

4. Suhu Rendah (*Cold/Freezing Stress*)

- Membatasi pertumbuhan tanaman dengan menurunkan fluiditas membran sel dan menghambat enzim-enzim metabolisme.
- Tanaman yang toleran biasanya meningkatkan kadar asam lemak tak jenuh dalam membrannya untuk menjaga kelenturan.

5. Logam Berat dan Pencemar Lingkungan

- Logam berat seperti Cd, Pb, dan Hg bersifat toksik karena mengganggu fungsi enzim dan menghasilkan ROS.
- Beberapa tanaman mampu melakukan fitoremediasi, yakni menyerap dan mengakumulasi logam berat untuk menurunkan konsentrasi pencemar di tanah.

8.2.4 Cekaman Biotik: Dampak dan Mekanisme

Cekaman biotik berasal dari interaksi tanaman dengan organisme lain, khususnya patogen dan hama.

1. Patogen Bakteri dan Jamur

- Menyerang jaringan tanaman, menyebabkan bercak, busuk, atau layu.

- Tanaman memiliki mekanisme pertahanan berupa respon hipersensitif (HR) yang mematikan sel di sekitar area infeksi agar patogen tidak menyebar.

2. Virus

- Menyebabkan penyakit mosaik, klorosis, hingga deformasi organ tanaman.
- Pertahanan tanaman melibatkan mekanisme RNA silencing, yaitu penghancuran RNA virus oleh enzim Dicer dan Argonaute.

3. Hama Serangga

- Menyebabkan kerusakan fisik pada jaringan, menurunkan fotosintesis, dan seringkali menjadi vektor penyebaran virus.
- Tanaman merespons dengan menghasilkan metabolit sekunder (misalnya alkaloid, flavonoid) atau protein penghambat pencernaan serangga.

4. Nematoda dan Gulma

- Nematoda merusak akar sehingga penyerapan hara terganggu.
- Gulma bersaing dengan tanaman utama untuk mendapatkan cahaya, air, dan nutrisi.

8.2.5 Dampak Cekaman terhadap Produktivitas

Dampak cekaman pada tanaman bersifat multidimensi, mencakup:

- **Fisiologis:** penurunan laju fotosintesis, respirasi, transpirasi, dan efisiensi penggunaan air.
- **Morfologis:** pertumbuhan terhambat, ukuran daun mengecil, sistem akar melemah.
- **Biokimia:** peningkatan produksi ROS, akumulasi senyawa stres, kerusakan DNA.
- **Ekonomi:** penurunan hasil panen, kualitas biji, buah, atau umbi menurun.

Sebagai contoh, menurut laporan *International Rice Research Institute (IRRI)*, kekeringan dapat menurunkan hasil padi hingga 60% di lahan tadah hujan. Sementara itu, penyakit blas yang disebabkan oleh *Magnaporthe oryzae* dapat menyebabkan kehilangan hasil hingga 50% pada kondisi parah (Salampessy *et al.*, 2018; Salimah, Kuswinanti and Nasruddin, 2021).

8.2.6 Mekanisme Adaptasi dan Toleransi

Meskipun cekaman menurunkan produktivitas, tanaman memiliki berbagai mekanisme adaptasi:

- **Morfologi:** akar lebih dalam untuk mencari air, daun menggulung untuk mengurangi transpirasi.
- **Fisiologi:** penutupan stomata, pengaturan osmotik dengan akumulasi prolin atau gula.
- **Biokimia:** produksi enzim antioksidan (*superoksida dismutase*, *katalase*, *peroksidase*).
- **Molekuler:** aktivasi gen-gen stres, ekspresi protein pelindung, mekanisme RNAi terhadap virus.

8.3 Peran Bioteknologi dalam Meningkatkan Ketahanan Tanaman

8.3.1 Latar Belakang

Seiring meningkatnya tekanan cekaman biotik dan abiotik, strategi konvensional dalam pemuliaan tanaman sering kali tidak cukup cepat atau efisien untuk menghasilkan varietas unggul yang tahan terhadap kondisi ekstrem. Dalam situasi inilah bioteknologi hadir sebagai solusi ilmiah yang mampu mempercepat proses identifikasi, pemilihan, dan pengembangan sifat ketahanan. Melalui bioteknologi, tanaman dapat dirancang dengan sifat-sifat spesifik yang sebelumnya sulit dicapai melalui metode tradisional (Rahmawati and Fitrianingsih, 2023).

8.3.2 Bioteknologi Konvensional

Sebelum era rekayasa genetika modern, bioteknologi konvensional telah digunakan dalam pemuliaan tanaman, diantaranya:

1. Pemuliaan Konvensional Berbasis Hibridisasi

- Menggabungkan sifat dari dua varietas atau spesies berbeda untuk menghasilkan keturunan yang memiliki kombinasi sifat unggul (Syauqi and Amzeri, 2023).
- Contoh: persilangan varietas padi toleran kekeringan dengan varietas berproduksi tinggi.
- Kelemahan: memerlukan waktu lama dan hasilnya sering tidak spesifik.

2. Kultur Jaringan Tanaman

- Teknik *in vitro* untuk memperbanyak tanaman secara cepat, seragam, dan bebas penyakit.
- Salah satu contoh nyata penerapan seleksi *in vitro* adalah pada penelitian padi untuk memperoleh varietas yang tahan salinitas. Pada tahap awal, kalus padi diinduksi dari biji steril menggunakan media Murashige and Skoog (MS) yang telah ditambahkan hormon pertumbuhan. Setelah kalus terbentuk, dilakukan perlakuan dengan menambahkan NaCl ke dalam media kultur dengan konsentrasi bertingkat, misalnya 2.922 mg/L, 5.844 mg/L, 9.766 mg/L.
- Kalus yang mampu bertahan hidup dan tetap tumbuh pada konsentrasi tinggi garam dianggap memiliki toleransi salinitas. Selanjutnya, kalus tersebut diregenerasikan kembali menjadi tanaman lengkap (*plantlet*) melalui tahapan organogenesis (Latifah, Suhermiati and Ermawati, 2017; Hardianti and Soetopo, 2018; Saepudin, Yulianto and Aeni, 2020).
- Pendekatan serupa juga dilakukan pada tanaman jagung dan kedelai untuk ketahanan terhadap logam berat seperti aluminium (Al) atau kadmium (Cd). Pada kasus ini, kalus atau suspensi sel ditempatkan pada media yang mengandung ion logam berat dalam konsentrasi tertentu. Sel yang mampu bertahan kemudian diregenerasikan, dan tanaman hasil seleksi diuji kandungan logam pada jaringan akarnya untuk memastikan mekanisme eksklusi atau detoksifikasi logam.

3. Fusi Protoplasma

- Menggabungkan protoplasma dari dua spesies berbeda untuk menghasilkan tanaman hibrida somatik.
- Teknik ini memungkinkan kombinasi sifat dari spesies yang secara alami sulit dikawinkan.
- Kentang × Tomat → “Pomato”
Protoplas daun kentang dan tomat digabungkan dengan PEG atau electrofusion, lalu diregenerasikan. Hasilnya tanaman yang bisa menghasilkan umbi kentang di akar dan buah tomat di batang.
- Jeruk Manis × Jeruk Liar

Protoplas jeruk manis digabung dengan jeruk liar untuk menghasilkan hibrida somatik yang lebih tahan penyakit dan cekaman kekeringan.

- Padi × Padi Liar

Penggabungan protoplas padi (*Oryza sativa*) dengan padi liar (*Oryza officinalis*) dilakukan untuk memperoleh tanaman dengan toleransi salinitas dan ketahanan hama/penyakit.

Bioteknologi konvensional menjadi fondasi penting, namun keterbatasan dalam spesifisitas dan kecepatan membuatnya tidak selalu cukup untuk menghadapi tantangan pertanian modern (Herdhiansyah *et al.*, 2025).

8.3.3 Bioteknologi Modern

Kemajuan biologi molekuler memungkinkan lahirnya bioteknologi modern yang lebih presisi dalam meningkatkan ketahanan tanaman.

1. Rekayasa Genetika (*Genetic Engineering*)

- Memungkinkan penyisipan gen tertentu ke dalam genom tanaman untuk memberikan sifat baru, seperti ketahanan terhadap hama atau toleransi terhadap kekeringan.
- Contoh: **tanaman transgenik Bt** (kapas, jagung) yang membawa gen *Bacillus thuringiensis* untuk menghasilkan protein toksik bagi serangga hama.

2. Pengeditan Genom (*Genome Editing*)

- Teknologi **CRISPR-Cas9** menjadi revolusi besar karena memungkinkan modifikasi gen dengan presisi tinggi tanpa perlu memasukkan DNA asing.
- Contoh: padi dengan gen OsSWEET yang diedit untuk meningkatkan ketahanan terhadap penyakit hawar bakteri.

3. RNA Interference (RNAi)

- Mekanisme alami tanaman yang dapat dimanfaatkan untuk membungkam ekspresi gen patogen atau gen tanaman yang rentan.
- Contoh: penggunaan RNAi untuk melawan virus pada pepaya dan pisang.

4. *Marker Assisted Selection* (MAS)

- Menggunakan penanda molekuler (DNA *marker*) untuk melacak gen ketahanan dalam program pemuliaan.

- Teknik ini mempercepat seleksi varietas unggul tanpa harus menunggu ekspresi fenotip di lapangan.

5. Omics dan Bioinformatika

- **Genomik:** memetakan seluruh gen tanaman untuk menemukan gen terkait stres.
- **Transkriptomik:** mempelajari ekspresi gen dalam kondisi stres.
- **Proteomik:** menganalisis protein yang terlibat dalam respon cekaman.
- **Metabolomik:** mengidentifikasi metabolit penting dalam adaptasi stres.
- Semua pendekatan ini didukung oleh bioinformatika untuk menganalisis big data biologis.

8.3.4 Aplikasi Bioteknologi untuk Cekaman Abiotik

1. Kekeringan

- Penyisipan gen yang meningkatkan akumulasi osmolit (misalnya prolin, glisin betain).
- Contoh: jagung transgenik yang toleran kekeringan.

2. Salinitas

- Transfer gen pompa ion (misalnya NHX, HKT) yang mengatur homeostasis ion natrium dan kalium (Bhuja *et al.*, 2022).
- Contoh: padi transgenik dengan gen AtNHX1 (*Arabidopsis*) yang lebih toleran terhadap garam.

3. Suhu Ekstrem

- Rekayasa ekspresi protein pelindung seperti ***Heat Shock Proteins (HSPs)*** atau ***antifreeze proteins*** dari organisme lain.
- Contoh: tomat dengan gen AFP (*Antifreeze Protein*) dari ikan kutub yang lebih toleran suhu dingin.

4. Logam Berat

- Transfer gen yang mengkode **fitokelatin sintase** atau metalotionein untuk meningkatkan detoksifikasi logam berat.
- Contoh: tembakau transgenik dengan gen PCS1 untuk toleransi kadmium.

8.3.5 Aplikasi Bioteknologi untuk Cekaman Biotik

1. Ketahanan terhadap Penyakit

- Ekspresi gen ketahanan (*R genes*) yang mengenali patogen spesifik.
- Contoh: padi dengan gen Xa21 yang tahan terhadap hawar bakteri (Afidzatuttama, Anwar and Amara, 2025).

2. Ketahanan terhadap Serangga

- Tanaman Bt yang memproduksi protein toksik terhadap serangga tertentu (Amirhusin, 2002).
- Contoh: kapas Bt yang mengurangi penggunaan insektisida hingga 50%.

3. Pengendalian Virus dengan RNAi

- Pepaya transgenik tahan virus ringspot (*Papaya Ringspot Virus*, PRSV) yang dikembangkan di Hawaii menjadi contoh sukses RNAi (Hidayat, Nurulita and Wiyono, 2012; Farida *et al.*, 2022).

4. Mikroba Endofit dan Biopestisida

- Pemanfaatan bakteri *Pseudomonas fluorescens* atau jamur *Trichoderma* untuk meningkatkan imunitas tanaman.
- Mikroba rekayasa genetika juga sedang dikembangkan sebagai agen hayati.

8.3.6 Keuntungan dan Tantangan

1. Keuntungan bioteknologi dalam ketahanan tanaman:

- Meningkatkan produktivitas dan stabilitas hasil panen.
- Mengurangi penggunaan pestisida dan pupuk kimia.
- Mempercepat proses pemuliaan.
- Mendukung pertanian berkelanjutan.

2. Tantangan yang dihadapi:

- Resistensi hama atau patogen akibat penggunaan berulang (contoh: beberapa serangga mulai resisten terhadap Bt).
- Isu etika dan regulasi tanaman transgenik.
- Penerimaan masyarakat yang masih rendah.
- Keterbatasan akses teknologi di negara berkembang.

8.4 Pendekatan Bioteknologi terhadap Cekaman Abiotik

8.4.1 Pendahuluan

Cekaman abiotik mencakup berbagai faktor lingkungan yang tidak menguntungkan, seperti kekeringan, salinitas, suhu ekstrem, serta pencemaran logam berat. Faktor-faktor ini merupakan penyebab utama penurunan produktivitas tanaman global. Berbeda dengan cekaman biotik yang dapat dikendalikan melalui penggunaan pestisida atau praktik budidaya, cekaman abiotik lebih sulit diatasi karena terkait langsung dengan iklim, geografi, dan kondisi lingkungan yang kompleks. Oleh karena itu, bioteknologi memegang peranan penting dalam merancang tanaman yang memiliki toleransi lebih tinggi terhadap kondisi-kondisi ekstrem ini (Azmi, 2018; Avivi *et al.*, 2022; Sativa *et al.*, 2022).

8.4.2 Ketahanan terhadap Kekeringan

Kekeringan merupakan salah satu cekaman abiotik paling merugikan, terutama di wilayah tropis dan subtropis. Tanaman yang mengalami kekeringan menunjukkan gejala penurunan turgor, stomata menutup, penurunan fotosintesis, hingga kematian sel.

Pendekatan bioteknologi untuk mengatasi kekeringan antara lain:

1. Rekayasa Osmoprotektan

- Peningkatan akumulasi senyawa osmolit seperti prolin, trehalosa, dan glisin betain.
- Gen *P5CS* (*Pyrroline-5-Carboxylate Synthetase*) dari *Arabidopsis thaliana* telah diintroduksi pada padi untuk meningkatkan akumulasi prolin, sehingga tanaman lebih tahan kekeringan.

2. Regulasi Transkripsi

- Penggunaan faktor transkripsi (*transcription factors*) seperti DREB (*Dehydration Responsive Element Binding Protein*) dan AREB (*ABA Responsive Element Binding Protein*).
- Tanaman yang mengekspresikan gen DREB1A menunjukkan toleransi lebih tinggi terhadap kekeringan.

3. Pemuliaan Berbantuan Marka/*Marker Assisted Selection* (MAS)

- Pemetaan *Quantitative Trait Loci* (QTL) yang terkait dengan efisiensi penggunaan air.

- Contoh: varietas padi *Swarna-Sub1* yang tahan genangan dan kekeringan dengan memanfaatkan marka molekuler.

4. Transgenik untuk Efisiensi Air

- Jagung transgenik *DroughtGard* dari Monsanto mengandung gen *CspB* (*cold shock protein*) yang membantu menjaga metabolisme dalam kondisi kekeringan (Amalia, Hidayati and Sa'id, 2023).

8.4.3 Ketahanan terhadap Salinitas

Salinitas menyebabkan ketidakseimbangan ionik dan stres osmotik, terutama pada tanah dengan kandungan garam tinggi. Dampaknya adalah gangguan pertumbuhan akar, klorosis daun, hingga kematian tanaman.

Pendekatan bioteknologi untuk mengatasi salinitas:

1. Transporter Ion

- Padi dengan gen *AtNHX1* dari *Arabidopsis* menunjukkan toleransi lebih tinggi terhadap salinitas.

2. Enzim Biosintesis Osmolit

- Gen *BADH* (*Betaine Aldehyde Dehydrogenase*) meningkatkan produksi glisin betain untuk mengurangi kerusakan osmotik.
- Tomat transgenik dengan gen ini mampu tumbuh dikondisi salinitas tinggi.

3. Mikroba Toleran Garam

- Inokulasi bakteri rizosfer seperti *Halomonas* atau jamur mikoriza dapat meningkatkan kemampuan tanaman menghadapi salinitas (Azmi, 2018).

8.4.4 Ketahanan terhadap Suhu Tinggi

Suhu tinggi menimbulkan denaturasi protein, ketidakstabilan membran, serta akumulasi ROS (*Reactive Oxygen Species*). Tanaman yang tidak tahan panas biasanya mengalami penurunan produksi biji dan hasil panen.

Pendekatan bioteknologi untuk ketahanan panas:

1. Ekspresi *Heat Shock Proteins* (HSPs)

- HSPs berfungsi sebagai chaperone untuk melindungi protein dari denaturasi.
- Gandum dengan gen *HSP101* menunjukkan peningkatan toleransi panas.

2. Faktor Transkripsi

- TFs seperti HSFA1 berperan dalam regulasi ekspresi gen respons panas.
- Overekspresi HSFA1 meningkatkan toleransi panas pada tomat.

3. Metabolit Sekunder

- Peningkatan produksi antioksidan (misalnya asam askorbat, glutathione) untuk mengurangi ROS.

8.4.5 Ketahanan terhadap Suhu Rendah

Suhu rendah menghambat metabolisme, mengganggu fluiditas membran, dan menyebabkan pembentukan es intraseluler.

Pendekatan bioteknologi:

1. Gen CBF (*C-repeat Binding Factor*)

- Regulasi ekspresi gen *cold-responsive* (COR).
- Padi transgenik dengan gen CBF menunjukkan peningkatan toleransi dingin.

2. Protein Antibeku (*Antifreeze Proteins/AFPs*)

- AFPs diisolasi dari ikan kutub atau serangga Arktik, kemudian diintroduksi ke tanaman.
- Tomat transgenik dengan AFP lebih tahan terhadap pembekuan.

8.4.6 Ketahanan terhadap Logam Berat

Logam berat (Cd, Pb, Hg, As) bersifat toksik bagi tanaman karena menyebabkan kerusakan protein, DNA, dan membran sel.

Pendekatan bioteknologi:

1. Fitokelatin dan Metalotionein

- Gen yang mengkode *fitokelatin sintase* (PCS) atau *metalotionein* (MT) digunakan untuk meningkatkan kapasitas detoksifikasi logam.
- Tembakau transgenik dengan gen PCS1 lebih toleran terhadap Cd.

2. Fitoremediasi Rekayasa

- Tanaman yang direkayasa untuk mengakumulasi logam berat dapat digunakan untuk membersihkan lahan tercemar.
- Contoh: *Brassica juncea* transgenik dengan peningkatan akumulasi arsenik.

3. Mikroba Pendegradasi Logam

- Rekayasa bakteri rizosfer agar mampu mengikat dan menetralkan logam berat, sehingga tanaman lebih aman tumbuh di tanah tercemar.

8.4.7 Integrasi Teknologi Omics

Bioteknologi terhadap cekaman abiotik semakin diperkuat dengan pendekatan **omics**:

- **Genomik** → mengidentifikasi QTL terkait toleransi stres.
- **Transkriptomik** → memetakan pola ekspresi gen di bawah cekaman.
- **Proteomik** → mempelajari protein stres seperti enzim antioksidan.
- **Metabolomik** → menganalisis metabolit kunci (prolin, trehalosa, glisin betain).

Dengan integrasi ini, pengembangan varietas tahan cekaman abiotik dapat dilakukan lebih terarah dan efisien.

8.5 Pendekatan Bioteknologi terhadap Cekaman Biotik

8.5.1 Pendahuluan

Cekaman biotik berasal dari interaksi tanaman dengan organisme hidup lain, baik patogen (jamur, bakteri, virus, nematoda) maupun hama (serangga, tungau, vertebrata). Gangguan biotik ini menjadi salah satu penyebab utama penurunan produksi pertanian. Menurut *Food and Agriculture Organization* (FAO), sekitar 20–40% hasil panen global hilang setiap tahun akibat hama dan penyakit tanaman.

Pemanfaatan pestisida kimia memang dapat mengurangi kerugian tersebut, namun penggunaan berlebihan menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan, kesehatan manusia, serta munculnya resistensi hama dan patogen. Oleh karena itu, bioteknologi hadir sebagai solusi alternatif yang lebih ramah lingkungan, efektif, dan berkelanjutan dalam meningkatkan ketahanan tanaman terhadap cekaman biotik.

8.5.2 Mekanisme Pertahanan Tanaman terhadap Cekaman Biotik

Secara alami, tanaman memiliki dua lapis pertahanan utama terhadap organisme pengganggu:

1. Pertahanan bawaan (*innate immunity*)

- Melibatkan pengenalan pola molekul yang berhubungan dengan patogen (PAMPs) melalui reseptor tanaman.
- Contoh: pengenalan flagelin bakteri oleh reseptor FLS2.

2. Pertahanan adaptif (*Effector-Triggered Immunity, ETI*)

- Melibatkan interaksi gen ketahanan tanaman (*R genes*) dengan gen efektor patogen.
- Menyebabkan respon hipersensitif (HR) berupa kematian sel lokal untuk menghentikan penyebaran patogen.

Bioteknologi dapat memperkuat mekanisme pertahanan ini dengan mengintroduksi gen ketahanan baru, memperbaiki ekspresi gen pertahanan, atau memanfaatkan mikroba yang mendukung sistem imun tanaman (Rahmawati and Fitriainingsih, 2023).

8.5.3 Bioteknologi terhadap Penyakit yang Disebabkan Patogen

1. Bakteri

Penyakit bakteri seperti hawar daun padi (*Xanthomonas oryzae pv. oryzae*) menimbulkan kerugian besar di Asia.

- **Pendekatan Bioteknologi:**

1. Gen Ketahanan (*R genes*): Misalnya padi dengan gen Xa21 yang memberikan ketahanan luas terhadap berbagai strain hawar bakteri.
2. CRISPR-Cas: Mengedit gen kerentanan (*S genes*), seperti *OsSWEET*, sehingga bakteri tidak dapat mengeksploitasi tanaman.
3. RNAi terhadap faktor virulensi bakteri untuk menekan kemampuan infeksi.

2. Jamur

Jamur patogen seperti *Magnaporthe oryzae* (penyebab blas pada padi) dan *Fusarium oxysporum* (penyebab layu fusarium) merupakan ancaman serius.

- **Pendekatan Bioteknologi:**

1. Transfer Gen Ketahanan Spesifik: Misalnya padi dengan gen Pi54 tahan blas.

2. Over Ekspresi Gen Antioksidan: Mengurangi kerusakan oksidatif akibat infeksi jamur.
3. Mikroba Antagonis Rekayasa: *Trichoderma* rekayasa dapat menghasilkan enzim hidrolitik lebih efektif dalam melawan jamur patogen.

3. Virus

Virus tanaman, seperti *Papaya Ringspot Virus* (PRSV), *Banana Bunchy Top Virus* (BBTV), dan *Tomato Yellow Leaf Curl Virus* (TYLCV), seringkali sulit dikendalikan.

- **Pendekatan Bioteknologi:**

1. *RNA Interference* (RNAi): Membungkam RNA virus sehingga siklus replikasinya terhenti. Pepaya transgenik tahan PRSV di Hawaii adalah contoh sukses.
2. CRISPR-Cas9: Digunakan untuk merusak genom DNA virus sehingga infeksi terhambat.
3. Ekspresi Protein Viral Coat: Beberapa tanaman transgenik diekspresikan dengan protein selubung virus untuk memberikan ketahanan (*pathogen-derived resistance*).

4. Nematoda

Nematoda parasit seperti *Meloidogyne incognita* (penyebab bengkak akar) dapat menurunkan produktivitas banyak tanaman.

- **Pendekatan Bioteknologi:**

1. RNAi untuk membungkam gen penting nematoda.
2. Tanaman Transgenik yang mengekspresikan protein inhibitor terhadap enzim pencernaan nematoda.

8.5.4 Bioteknologi terhadap Hama Serangga

Serangga hama seperti ulat *Helicoverpa armigera*, penggerek batang padi, dan kutu kebul merupakan penyebab utama kerugian pertanian.

1. Tanaman Bt

Tanaman Bt (*Bacillus thuringiensis*) merupakan salah satu pencapaian paling sukses dalam bioteknologi pertanian.

- Kapas Bt, jagung Bt, dan kedelai Bt menghasilkan protein kristal toksik (*Cry protein*) yang spesifik menyerang serangga tertentu (Amirhusin, 2002).
- Keuntungan: mengurangi penggunaan insektisida kimia hingga 50–70%.

- Tantangan: munculnya resistensi pada beberapa spesies serangga sehingga perlu strategi rotasi gen *Cry* atau kombinasi dengan metode lain.

2. RNAi terhadap Serangga

RNA interference dapat digunakan untuk menargetkan gen vital dalam tubuh serangga, misalnya gen pencernaan atau reproduksi.

- Contoh: jagung transgenik dengan RNAi terhadap gen kutu kebul (*Bemisia tabaci*).

3. Senyawa Antinutrisi dan Protein Penghambat

- Protein penghambat pencernaan (*protease inhibitor*) atau enzim kitinase dapat diperkenalkan ke dalam tanaman untuk mengganggu metabolisme serangga.
- Tanaman transgenik tomat dengan protease inhibitor terbukti mengurangi serangan ulat daun.

8.5.5 Mikroba Endofit dan Biopestisida

Selain rekayasa genetik, bioteknologi juga memanfaatkan mikroorganisme yang secara alami bersimbiosis dengan tanaman.

1. Endofit Bakteri dan Jamur

- Mikroba endofit seperti *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus subtilis*, dan *Trichoderma spp.* dapat meningkatkan resistensi tanaman melalui mekanisme *induced systemic resistance (ISR)*.
- Beberapa strain endofit telah direkayasa agar lebih efektif dalam menghasilkan antibiotik atau enzim antifungal.

2. Biopestisida Rekayasa

- Bakteri *Bacillus thuringiensis* telah dimodifikasi untuk menghasilkan protein *Cry* baru yang lebih luas spektrumnya.
- Fungi entomopatogen rekayasa (misalnya *Beauveria bassiana*) dapat digunakan sebagai agen hayati yang lebih efektif terhadap serangga hama.

8.5.6 Teknologi Omics dalam Cekaman Biotik

Pendekatan omics (genomik, transkriptomik, proteomik, metabolomik) memberikan wawasan lebih dalam mengenai interaksi tanaman-patogen.

- **Genomik:** identifikasi gen R baru dalam plasma nutfah liar.

- **Transkriptomik:** memetakan gen yang diinduksi selama infeksi patogen.
- **Proteomik:** analisis protein defensif seperti kitinase, glukonase.
- **Metabolomik:** menemukan metabolit sekunder penting, seperti flavonoid atau alkaloid, yang berperan dalam ketahanan alami.

8.5.7 Keuntungan dan Tantangan

Keuntungan:

- Mengurangi ketergantungan pada pestisida kimia.
- Memberikan perlindungan tanaman yang lebih efektif dan spesifik.
- Meningkatkan hasil panen dan kualitas produk.
- Lebih ramah lingkungan dan mendukung pertanian berkelanjutan.

Tantangan:

- Potensi resistensi patogen atau hama terhadap teknologi tertentu.
- Biaya riset dan pengembangan yang tinggi.
- Perdebatan publik mengenai keamanan tanaman transgenik.
- Regulasi yang ketat di berbagai negara.

8.6 Peran Omics dalam Ketahanan Tanaman

8.6.1 Pendahuluan

Perkembangan bioteknologi modern telah membawa disiplin ilmu *omics* ke garis depan penelitian ketahanan tanaman. Istilah *omics* mencakup berbagai pendekatan sistematis untuk mempelajari komponen biologis secara menyeluruh, seperti genomik, transkriptomik, proteomik, dan metabolomik. Dengan kemajuan teknologi sekuensing generasi baru (*next-generation sequencing*/NGS), spektrometri massa, serta bioinformatika, *omics* memungkinkan analisis kompleksitas interaksi tanaman dengan lingkungan biotik maupun abiotik secara lebih komprehensif.

Pendekatan ini sangat penting dalam memahami mekanisme ketahanan tanaman terhadap cekaman lingkungan. Jika pendekatan konvensional hanya berfokus pada satu atau beberapa gen, maka *omics* menawarkan gambaran menyeluruh mengenai respons sistem biologis secara utuh. Dengan demikian, *omics* dapat menjadi dasar dalam pengembangan strategi pemuliaan tanaman berbasis ketahanan serta rekayasa genetik yang lebih presisi.

8.6.2 Genomik dalam Ketahanan Tanaman

Genomik berfokus pada pemetaan, sekuensing, dan analisis keseluruhan materi genetik tanaman.

1. Identifikasi Gen Ketahanan (*R genes*)

- Banyak tanaman memiliki gen R yang berfungsi mengenali efektor patogen dan memicu pertahanan.
- Teknologi genomik mempermudah identifikasi dan isolasi gen R baru, misalnya gen Xa21 pada padi untuk ketahanan hawar bakteri.

2. Pemetaan *Quantitative Trait Loci* (QTLs)

- Sifat ketahanan terhadap cekaman abiotik maupun biotik seringkali dikendalikan oleh banyak gen dengan efek kecil (poligenik).
- Analisis genomik memungkinkan pemetaan QTL yang terkait dengan toleransi kekeringan, salinitas, atau ketahanan terhadap penyakit.

3. *Genome-Wide Association Studies* (GWAS)

- GWAS menghubungkan variasi genetik alami dengan sifat fenotipik ketahanan.
- Contoh: identifikasi alel yang berkontribusi terhadap toleransi aluminium pada sorgum.

4. *Genomic Selection* (GS)

- Digunakan dalam pemuliaan untuk mempercepat seleksi tanaman tahan cekaman dengan memanfaatkan data genomik prediktif.

Dengan genomik, tanaman dapat dirakit lebih cepat dan lebih tepat untuk menghadapi berbagai tantangan lingkungan.

8.6.3 Transkriptomik dalam Ketahanan Tanaman

Transkriptomik mempelajari ekspresi gen secara global menggunakan teknologi seperti RNA-seq.

1. Profil Ekspresi Gen

- Transkriptomik membantu memahami gen-gen apa saja yang diaktifkan atau ditekan saat tanaman menghadapi cekaman.
- Misalnya, pada tanaman kedelai yang menghadapi kekeringan, gen penyandi aquaporin dan dehidrinasin meningkat secara signifikan.

2. Identifikasi Gen Kandidat

- Dengan membandingkan transkriptom tanaman toleran dan rentan, peneliti dapat menemukan gen kunci yang berperan dalam ketahanan.
- Contoh: gen *DREB* (*Dehydration Responsive Element Binding*) pada gandum yang berperan dalam toleransi kekeringan.

3. Analisis Jaringan Regulasi Gen

- Transkriptomik memungkinkan pemetaan hubungan antar-gen dalam bentuk *gene regulatory networks* (GRNs).
- Hal ini memperlihatkan interaksi kompleks yang mengatur respon pertahanan tanaman.

4. Single-cell Transcriptomics

- Teknologi baru ini memberikan pemahaman mengenai heterogenitas respon sel terhadap cekaman, misalnya bagaimana sel akar berbeda dalam merespons salinitas.

8.6.4 Proteomik dalam Ketahanan Tanaman

Proteomik mempelajari seluruh protein yang dihasilkan oleh tanaman. Protein adalah pelaku utama dalam respon pertahanan karena langsung terlibat dalam proses fisiologis.

1. Identifikasi Protein Pertahanan

- Protein seperti kitinase, glukonase, dan peroksidase terdeteksi meningkat pada tanaman saat melawan jamur patogen.
- Pada tanaman kapas, proteomik berhasil mengidentifikasi protein terkait *pathogenesis-related* (PR) saat terinfeksi *Verticillium dahliae*.

2. *Post-Translational Modifications* (PTMs)

- Banyak protein pertahanan diatur melalui modifikasi pasca-translasi, seperti fosforilasi, asetilasi, atau ubiquitinasi.
- Analisis proteomik dapat mendeteksi PTM penting yang menentukan efektivitas protein pertahanan.

3. Protein Signaling

- Protein reseptor membran, seperti *pattern recognition receptors* (PRRs), memainkan peran sentral dalam mengenali patogen.
- Proteomik membantu memahami jalur sinyal ini, misalnya interaksi FLS2 dengan flagelin bakteri.

4. Proteomik Komparatif

- Membandingkan tanaman toleran dan rentan terhadap cekaman untuk menemukan protein biomarker ketahanan.

8.6.5 Metabolomik dalam Ketahanan Tanaman

Metabolomik meneliti profil metabolit (senyawa kecil) dalam tanaman. Metabolit berperan sebagai molekul sinyal maupun senyawa antimikroba (Florenika *et al.*, 2022).

1. Identifikasi Metabolit Pertahanan

- Flavonoid, fenolik, terpenoid, dan alkaloid seringkali meningkat selama infeksi patogen.
- Contoh: akumulasi fitoaleksin resveratrol pada anggur sebagai respon terhadap infeksi jamur.

2. Metabolomik Targeted dan Untargeted

- *Targeted*: menganalisis metabolit spesifik yang sudah diketahui, seperti asam jasmonat.
- *Untargeted*: menelusuri seluruh profil metabolit untuk menemukan kandidat baru.

3. Integrasi dengan Transkriptomik dan Proteomik

- Metabolomik membantu menghubungkan ekspresi gen dengan fenotipe aktual.
- Misalnya, ekspresi gen jalur flavonoid berhubungan langsung dengan akumulasi antosianin pada stres UV.

8.6.6 Integrasi Multi-Omics

Pendekatan integrasi *multi-omics* memberikan pemahaman menyeluruh mengenai ketahanan tanaman.

- **Genomik + Transkriptomik**: menghubungkan variasi genetik dengan pola ekspresi gen.
- **Proteomik + Metabolomik**: menunjukkan dampak nyata dari ekspresi gen terhadap metabolisme pertahanan.
- **Sistem Biologi**: dengan bioinformatika dan kecerdasan buatan (AI), data multi-omics dapat digunakan untuk memodelkan jaringan pertahanan tanaman secara sistemik.

Contoh sukses: pada padi, integrasi genomik, transkriptomik, dan metabolomik berhasil mengidentifikasi jalur asam jasmonat sebagai kunci ketahanan terhadap serangan *Magnaporthe oryzae*.

8.6.7 Aplikasi Omics dalam Pemuliaan Tanaman

1. *Marker-Assisted Selection (MAS)*

- Data genomik digunakan untuk mengembangkan penanda molekuler yang memudahkan seleksi tanaman tahan cekaman.

2. *Genomic Selection (GS)*

- Menggunakan model prediktif berbasis data multi-omics untuk mempercepat siklus pemuliaan.

3. *Editing Gen Presisi*

- Dengan data omics, gen target untuk CRISPR-Cas dapat ditentukan lebih akurat.

4. *Synthetic Biology*

- Data metabolomik memungkinkan rekayasa jalur biosintesis metabolit pertahanan baru.

8.6.8 Tantangan dan Prospek

Tantangan:

- Kompleksitas data multi-omics yang sangat besar.
- Keterbatasan sumber daya di negara berkembang untuk teknologi berbiaya tinggi.
- Diperlukan tenaga ahli bioinformatika yang mumpuni.
- Translasi dari hasil laboratorium ke lapangan masih menjadi tantangan.

Prospek:

- *Precision breeding* berbasis data omics untuk menghasilkan varietas tahan cekaman secara cepat.
- Integrasi omics dengan sensor lapangan dan *machine learning* untuk monitoring real-time ketahanan tanaman.
- Pemanfaatan *pan-genome* untuk mengeksplorasi variasi genetik alami dari plasma nutfah liar.

8.7 Teknologi CRISPR-Cas dalam Peningkatan Ketahanan Tanaman

8.7.1 Pendahuluan

Ketahanan tanaman terhadap cekaman biotik maupun abiotik merupakan salah satu faktor kunci dalam menjaga produktivitas pertanian global. Namun, pemuliaan konvensional sering membutuhkan waktu lama

karena harus melalui persilangan berulang dan seleksi yang kompleks. Revolusi bioteknologi, khususnya melalui *Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats* (CRISPR) dan sistem *CRISPR-associated protein* (Cas), menghadirkan metode baru yang lebih cepat, spesifik, dan efisien untuk memperbaiki sifat tanaman.

Teknologi CRISPR-Cas9 pertama kali dipopulerkan sebagai alat penyuntingan gen (*gene editing*) yang mampu memotong DNA pada lokasi tertentu dengan presisi tinggi. Seiring perkembangan, berbagai varian seperti CRISPR-Cas12, CRISPR-Cas13, dan *prime editing* telah memperluas aplikasinya, termasuk pada ketahanan tanaman. Teknologi ini memungkinkan modifikasi gen yang terlibat dalam mekanisme pertahanan sehingga tanaman lebih tahan terhadap penyakit, hama, serta cekaman lingkungan.

8.7.2 Prinsip Kerja CRISPR-Cas

Sistem CRISPR-Cas diadaptasi dari mekanisme pertahanan bakteri terhadap infeksi virus. Prinsip kerjanya dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. **Guide RNA (gRNA)**

- RNA pendek yang dirancang untuk mengenali urutan DNA target melalui basa komplementer.

2. **Cas Nuclease**

- Enzim Cas (seperti Cas9) yang berfungsi sebagai “gunting molekuler” untuk memotong DNA pada lokasi yang ditentukan oleh gRNA.

3. **Pemotongan DNA**

- Cas membuat patahan untai ganda (*double-strand break*, DSB) pada DNA target.

4. **Perbaikan DNA oleh Sel**

- ***Non-Homologous end Joining* (NHEJ):** menghasilkan mutasi kecil (indel) yang dapat menonaktifkan gen.
- ***Homology-Directed Repair* (HDR):** memungkinkan penyisipan gen baru atau perbaikan gen tertentu dengan donor DNA.

Melalui mekanisme ini, CRISPR dapat digunakan untuk **knockout**, **knock-in**, maupun **regulasi ekspresi gen** yang relevan dengan ketahanan tanaman.

8.7.3 Aplikasi CRISPR-Cas untuk Ketahanan terhadap Cekaman Biotik

Cekaman biotik seperti serangan patogen, virus, bakteri, dan hama sering menurunkan hasil pertanian secara signifikan. CRISPR telah banyak diaplikasikan dalam memperkuat ketahanan tanaman terhadap faktor ini.

1. Penghapusan Gen Kerentanan (*Susceptibility Genes*)

- Banyak tanaman memiliki gen yang justru dimanfaatkan patogen untuk menginfeksi. CRISPR dapat menonaktifkan gen-gen ini.
- Contoh: Knock-out gen MLO pada gandum menghasilkan ketahanan terhadap embun tepung (*powdery mildew*).

2. Modifikasi Gen Reseptor Pertahanan

- CRISPR dapat meningkatkan sensitivitas reseptor tanaman terhadap molekul patogen.
- Misalnya, rekayasa gen eIF4E pada tomat memberikan ketahanan terhadap *Potyvirus*.

3. Peningkatan Produksi Protein Antimikroba

- Penyuntingan gen tertentu dapat meningkatkan produksi protein pertahanan, seperti kitinase atau glukukanase.

4. Kasus pada Tanaman Pangan

- **Padi:** CRISPR menonaktifkan gen *OsSWEET* sehingga tahan terhadap hawar bakteri (*Xanthomonas oryzae*).
- **Jagung:** modifikasi gen memberikan ketahanan terhadap virus *maize streak*.
- **Kentang:** penyuntingan gen terkait reseptor memperkuat ketahanan terhadap *Phytophthora infestans*.

8.7.4 Aplikasi CRISPR-Cas untuk Ketahanan terhadap Cekaman Abiotik

Selain patogen, tanaman juga menghadapi cekaman abiotik seperti kekeringan, salinitas, suhu ekstrem, dan logam berat.

1. Toleransi Kekeringan

- CRISPR digunakan untuk mengatur gen yang berperan dalam respon terhadap kekeringan, seperti *DREB* dan *NF-Y*.
- Pada beras, knock-out gen *OsPYL* meningkatkan efisiensi penggunaan air.

2. Toleransi Salinitas

- Penyuntingan gen *HKT1;5* pada tomat meningkatkan kemampuan tanaman dalam mengeluarkan ion natrium berlebih.

3. Respon terhadap Suhu Ekstrem

- Knock-out gen penyandi protein yang menghambat *heat shock proteins* (HSPs) dapat meningkatkan toleransi terhadap panas.

4. Toleransi Logam Berat

- Penyuntingan gen transportasi ion tertentu meningkatkan kemampuan tanaman dalam menahan akumulasi logam berat, misalnya Cd dan As.

8.7.5 Varian Teknologi CRISPR dalam Ketahanan Tanaman

1. CRISPR-Cas9

- Paling umum digunakan untuk pemotongan DNA spesifik.

2. CRISPR-Cas12a (Cpf1)

- Dapat memotong DNA dengan ujung lengket (*sticky ends*), mempermudah rekayasa genetik kompleks.

3. CRISPR-Cas13

- Menyasar RNA, cocok untuk melawan virus tanaman berbasis RNA.

4. Base Editing dan Prime Editing

- Base editing memungkinkan perubahan satu basa nukleotida tanpa memotong DNA.
- Prime editing lebih presisi untuk koreksi gen tanpa donor DNA.

8.7.6 Integrasi CRISPR dengan Omics dan Pemuliaan Modern

CRISPR tidak berdiri sendiri, melainkan sangat bergantung pada data dari pendekatan *omics* (genomik, transkriptomik, proteomik, metabolomik).

- **Omics → CRISPR:** Data omics mengidentifikasi gen target untuk diedit.
- **CRISPR → Pemuliaan:** Hasil editing mempercepat lahirnya varietas tahan cekaman.
- **Integrasi Multi-Omics + AI:** memungkinkan pemilihan target gen yang paling berpengaruh pada ketahanan.

8.7.7 Tantangan dalam Aplikasi CRISPR-Cas

1. Efisiensi dan Presisi

- *Off-target effect* (pemotongan DNA di lokasi yang tidak diinginkan) masih menjadi tantangan.

2. Regulasi dan Etika

- Beberapa negara memiliki regulasi ketat terhadap organisme hasil rekayasa genetik (GMO). Meski CRISPR kadang tidak menghasilkan DNA asing, perdebatan regulasi tetap ada.

3. Penerimaan Publik

- Masih ada keraguan masyarakat terhadap tanaman hasil rekayasa genetik. Edukasi publik sangat penting.

4. Keterbatasan Infrastruktur

- Teknologi CRISPR memerlukan fasilitas laboratorium canggih yang belum merata, terutama di negara berkembang.

8.7.8 Prospek Masa Depan

- **Precision Breeding:** pemuliaan presisi untuk menghasilkan varietas tahan cekaman secara cepat.
- **CRISPR Multiplexing:** penyuntingan beberapa gen sekaligus untuk ketahanan multi-stress.
- **Synthetic Biology:** rekayasa jalur metabolit pertahanan baru yang tidak ada di tanaman asli.
- **Pertanian Berkelanjutan:** CRISPR mendukung pengurangan penggunaan pestisida dan pupuk kimia.

8.8 Implementasi Bioteknologi dalam Ketahanan Tanaman di Indonesia (Studi Kasus Kalimantan Timur)

8.8.1 Pendahuluan

Indonesia sebagai negara agraris memiliki potensi besar dalam pemanfaatan bioteknologi pertanian untuk meningkatkan ketahanan tanaman terhadap berbagai cekaman lingkungan. Pemanfaatan bioteknologi menjadi semakin penting seiring dengan meningkatnya ancaman perubahan iklim, degradasi lahan, serta serangan organisme pengganggu tanaman (OPT). Melalui pendekatan bioteknologi, tanaman dapat dirancang atau dipilih secara lebih efektif untuk beradaptasi dengan kondisi ekstrem, baik melalui

pemuliaan berbasis molekuler, kultur jaringan, rekayasa genetika, maupun pemanfaatan mikroba fungsional.

Kalimantan Timur (Kaltim) merupakan salah satu provinsi yang menghadapi tantangan besar dalam pengembangan pertanian. Kondisi agroekosistem yang beragam, mulai dari lahan masam, lahan pasang surut, hingga wilayah pesisir, menyebabkan pertanian di daerah ini sangat rentan terhadap cekaman abiotik seperti kekeringan, banjir, salinitas, dan keasaman tanah, serta cekaman biotik berupa hama dan penyakit. Oleh karena itu, implementasi bioteknologi di Kaltim menjadi salah satu strategi penting untuk meningkatkan produktivitas dan ketahanan pangan lokal.

8.8.2 Karakteristik Tantangan Pertanian di Kalimantan Timur

Beberapa tantangan utama dalam sistem pertanian Kaltim yang relevan dengan penerapan bioteknologi antara lain:

1. Cekaman Lahan Masam (Ultisol dan PMK)

Sebagian besar lahan pertanian di Kaltim berupa tanah masam dengan pH rendah, kandungan aluminium tinggi, serta ketersediaan fosfat rendah. Kondisi ini menjadi kendala bagi produktivitas padi, jagung, dan kedelai.

2. Kekeringan Musiman

Saat terjadi El Niño, beberapa wilayah Kaltim mengalami kekeringan panjang yang mengancam pertanian lahan tadah hujan, terutama di Kutai Timur dan Samarinda Seberang.

3. Banjir dan Genangan

Daerah Kutai Kartanegara dan Penajam Paser Utara rawan banjir akibat curah hujan tinggi serta pasang surut sungai Mahakam. Hal ini sering menyebabkan puso pada tanaman padi.

4. Cekaman Salinitas di Wilayah Pesisir

Wilayah pesisir, seperti Penajam Paser Utara, menghadapi masalah intrusi air laut yang meningkatkan kadar garam pada tanah sawah pasang surut.

5. Serangan Hama dan Penyakit

Wereng, penggerek batang, blas pada padi, serta penyakit busuk pangkal batang pada kelapa sawit (*Ganoderma boninense*) menjadi ancaman serius terhadap produktivitas pertanian.

8.8.3 Implementasi Bioteknologi di Kalimantan Timur

1. Padi Toleran Lahan Masam

BPTP Kaltim mengintroduksi varietas padi unggul **Inpari 30**, **Inpari 33**, dan **Inpari Unsoed 79** yang dikembangkan melalui pemuliaan berbasis *marker-assisted selection* (MAS) (Novitaningrum, Buwono and Saputro, 2021; Hutomo and Purwanto, 2023).

- **Hasil:** Produktivitas mencapai 4–5 ton/ha di lahan masam Kutai Kartanegara, dibanding varietas lokal yang hanya 2–3 ton/ha.
- **Pendukung bioteknologi:** Identifikasi gen-gen terkait toleransi lahan masam seperti *ALS* dan *ALMT* mempercepat proses seleksi.

2. Jagung Hibrida Tahan Kekeringan

Program nasional pengembangan jagung hibrida toleran kekeringan juga diujicobakan di lahan kering Kaltim. Varietas **Bima 20 URI** dan **Bima 19 URI** merupakan hasil bioteknologi berbasis DNA *marker*.

- **Hasil:** Produksi stabil (6–7 ton/ha) meskipun curah hujan rendah, sementara varietas non-toleran hanya 3–4 ton/ha.
- **Konteks lokal:** Mendukung program swasembada jagung untuk kebutuhan pakan ternak di Kaltim.

3. Padi Submergence Tolerant (Scuba Rice)

Wilayah rawa pasang surut di Penajam Paser Utara sering tergenang air. Varietas **IR64-Sub1**, yang membawa gen *Sub1A*, telah diuji adaptasi di lahan tersebut.

- **Hasil:** Tanaman mampu bertahan setelah 10–12 hari tergenang penuh.
- **Manfaat:** Mengurangi risiko gagal panen akibat banjir musiman.

4. Kedelai Toleran Salinitas

Galur kedelai toleran salinitas hasil seleksi berbasis marka molekuler diuji coba di lahan pesisir Kaltim.

- **Hasil:** Produksi mencapai 1,8 ton/ha, lebih tinggi dibanding varietas kontrol (≤ 1 ton/ha).
- **Potensi:** Mendukung diversifikasi pangan dan pengembangan pertanian pesisir.

5. Kelapa Sawit Toleran *Ganoderma*

Kelapa sawit adalah komoditas unggulan Kaltim, namun rentan terserang penyakit busuk pangkal batang (*Ganoderma boninense*). Teknologi bioteknologi yang dikembangkan meliputi:

- **Deteksi dini berbasis marka molekuler** untuk seleksi varietas tahan.
- **Kultur jaringan sawit** untuk menghasilkan bibit bebas patogen.
- **Hasil:** Klon sawit hasil kultur jaringan menunjukkan tingkat ketahanan lebih tinggi dibanding bibit konvensional.

6. Bioteknologi Mikrobial untuk Perbaikan Lahan Masam

Selain melalui pemuliaan tanaman, bioteknologi juga diterapkan melalui pemanfaatan mikroba. Penelitian di Kaltim menunjukkan aplikasi **mikroba pelarut fosfat (PSB)** dan **mikroba pengikat nitrogen (*Azospirillum*, *Azotobacter*)** dapat memperbaiki kesuburan tanah masam.

- **Hasil:** Aplikasi *biofertilizer* meningkatkan serapan P tanaman padi dan jagung sebesar 20–30%.
- **Keunggulan:** Solusi ramah lingkungan sekaligus mengurangi ketergantungan pada pupuk kimia.

8.8.4 Faktor Keberhasilan dan Tantangan di Kalimantan Timur

1. Keberhasilan:

- Dukungan lembaga penelitian seperti BPTP Kaltim dan Universitas Mulawarman.
- Adopsi varietas unggul bioteknologi yang sesuai agroekosistem lokal.
- Dukungan program pemerintah dalam meningkatkan swasembada pangan daerah.

2. Tantangan:

- Infrastruktur laboratorium bioteknologi masih terbatas.
- Literasi bioteknologi di kalangan petani masih rendah, sehingga adopsi teknologi lambat.
- Distribusi benih unggul bioteknologi ke daerah terpencil masih kurang merata.

8.9 Tantangan, Etika, dan Prospek Pengembangan Bioteknologi dalam Ketahanan Tanaman

8.9.1 Pendahuluan

Peran bioteknologi dalam menghadapi cekaman biotik maupun abiotik semakin penting seiring meningkatnya ancaman perubahan iklim global, degradasi lahan, serta kebutuhan pangan yang terus bertambah. Namun, implementasi bioteknologi tidak hanya menyangkut aspek teknis dan ilmiah, tetapi juga berkaitan dengan tantangan sosial, etika, regulasi, serta prospek jangka panjang bagi pembangunan pertanian berkelanjutan (Rahmawati and Fitrianingsih, 2023). Pemahaman yang komprehensif tentang tantangan dan peluang ini menjadi kunci dalam menentukan arah kebijakan serta strategi pengembangan bioteknologi di Indonesia, termasuk di daerah-daerah strategis seperti Kalimantan Timur.

8.9.2 Tantangan dalam Implementasi Bioteknologi

A. Tantangan Teknis dan Ilmiah

1. Keterbatasan Infrastruktur

Banyak laboratorium bioteknologi di daerah masih belum dilengkapi dengan peralatan modern untuk analisis molekuler, kultur jaringan, maupun rekayasa genetika.

2. Keragaman Genetik yang Belum Tergali Optimal

Indonesia memiliki plasma nutfah yang melimpah, namun eksplorasi genetik tanaman lokal untuk toleransi cekaman masih terbatas.

3. Biaya Tinggi

Penelitian dan pengembangan bioteknologi memerlukan investasi besar, sehingga sulit diterapkan secara luas tanpa dukungan anggaran memadai.

4. Risiko Biologis

Tanaman hasil rekayasa genetika (transgenik) berpotensi menimbulkan dampak ekologis jika tidak dikontrol dengan baik, misalnya munculnya gulma resisten atau aliran gen ke spesies liar.

B. Tantangan Sosial dan Ekonomi

1. Rendahnya Literasi Bioteknologi di Kalangan Petani

Sebagian besar petani masih mengandalkan metode tradisional, sehingga adopsi teknologi bioteknologi sering berjalan lambat.

2. Distribusi Benih Unggul

Benih hasil bioteknologi sering tidak merata, terutama di daerah terpencil seperti pedalaman Kalimantan Timur.

3. Ketergantungan terhadap Pihak Luar

Terdapat kekhawatiran bahwa penguasaan teknologi hanya dimiliki oleh perusahaan besar, sehingga petani kecil sulit bersaing.

4. Nilai Ekonomi Jangka Pendek

Petani lebih cenderung memilih varietas yang memberi hasil cepat, meskipun belum tahan cekaman, karena faktor ekonomi harian.

C. Tantangan Regulasi dan Kebijakan

1. Kerangka Regulasi yang Rumit

Regulasi mengenai pelepasan tanaman transgenik masih ketat, sehingga memperlambat inovasi.

2. Kurangnya Sinkronisasi Antarlembaga

Koordinasi antara lembaga riset, universitas, dan pemerintah daerah seringkali belum berjalan optimal.

3. Akses Pasar Global

Produk bioteknologi, khususnya tanaman transgenik, sering menghadapi hambatan ekspor karena perbedaan regulasi antar negara.

8.9.3 Aspek Etika dalam Pengembangan Bioteknologi

1. Isu Keamanan Pangan

Pertanyaan utama adalah apakah produk bioteknologi aman dikonsumsi masyarakat. Uji toksisitas, alergenitas, serta keamanan nutrisi harus dilakukan sebelum dilepas ke pasaran.

2. Dampak Lingkungan

Tanaman bioteknologi harus dievaluasi agar tidak menimbulkan gangguan pada biodiversitas lokal. Misalnya, penggunaan varietas transgenik harus diimbangi dengan strategi konservasi plasma nutfah asli Indonesia.

3. Keadilan Akses Teknologi

Etika bioteknologi menekankan bahwa inovasi harus dapat diakses petani kecil, bukan hanya dimonopoli oleh perusahaan besar.

Penyebaran teknologi berbasis komunitas penting dilakukan agar kesenjangan tidak melebar.

4. Kearifan Lokal

Pemanfaatan bioteknologi sebaiknya memperhatikan tradisi lokal. Misalnya, varietas baru sebaiknya tetap selaras dengan preferensi pangan masyarakat (seperti tekstur dan aroma beras yang disukai).

8.9.4 Prospek Pengembangan Bioteknologi

1. Prospek Global

Secara global, bioteknologi dipandang sebagai kunci dalam mengatasi krisis pangan. FAO memprediksi bahwa dengan bioteknologi, produktivitas pangan dapat meningkat 30–40% meski di tengah perubahan iklim.

2. Prospek di Indonesia

Indonesia berpotensi menjadi pusat bioteknologi tropis dunia karena:

- Kekayaan biodiversitas yang dapat dieksplorasi sebagai sumber gen ketahanan cekaman.
- Lahan suboptimal yang luas, termasuk lahan masam, rawa, dan pasang surut, yang membutuhkan solusi berbasis bioteknologi.
- Dukungan pemerintah melalui kebijakan pangan berkelanjutan dan ketahanan pangan nasional.

3. Prospek di Kalimantan Timur

Kalimantan Timur memiliki peluang besar sebagai laboratorium alami bioteknologi pertanian karena:

- **Luasnya lahan suboptimal** (masam, pasang surut, pesisir) yang menantang tetapi potensial.
- **Kebutuhan pangan meningkat** seiring pembangunan Ibu Kota Nusantara (IKN).
- **Kolaborasi riset dan industri** yang mulai berkembang, seperti penelitian biofertilizer dan kultur jaringan sawit.
- **Integrasi dengan ekonomi hijau** yang sejalan dengan visi pembangunan berkelanjutan Kaltim.

8.9.5 Strategi Penguatan Implementasi Bioteknologi

1. Peningkatan Infrastruktur dan SDM

- Pembangunan laboratorium molekuler di daerah, khususnya dekat pusat pertanian.
- Pendidikan dan pelatihan bagi penyuluh serta petani mengenai manfaat bioteknologi.

2. Kolaborasi Multi-Pihak

- Sinergi antara pemerintah daerah, universitas, lembaga riset, dan industri.
- Pemberdayaan kelompok tani sebagai mitra riset lapangan.

3. Kebijakan yang Mendukung

- Regulasi yang fleksibel namun tetap memperhatikan aspek keamanan.
- Subsidi benih bioteknologi untuk mempercepat adopsi.

4. Riset Berbasis Lokal

- Eksplorasi plasma nutfah asli Kalimantan, seperti padi lokal varietas "Adan" atau "Pandan Wangi", untuk dikembangkan dengan teknik bioteknologi.
- Pengembangan biofertilizer berbasis mikroba tanah lokal.

8.9.6 Ringkasan

Pengembangan bioteknologi dalam ketahanan tanaman menghadapi berbagai tantangan teknis, sosial, ekonomi, dan regulasi. Namun, dengan etika yang tepat dan strategi penguatan, bioteknologi memiliki prospek cerah dalam menghadapi cekaman biotik dan abiotik. Kalimantan Timur dapat menjadi contoh implementasi yang kuat, mengingat kondisi lahan suboptimal dan kebutuhan pangan yang terus meningkat, terutama dengan hadirnya Ibu Kota Nusantara.

Dengan pendekatan berbasis riset lokal, kolaborasi multi-pihak, dan dukungan kebijakan yang berpihak pada petani, bioteknologi akan menjadi pilar penting dalam mewujudkan pertanian berkelanjutan di Indonesia dan dunia.

8.10 Penutup

Bioteknologi memiliki peran strategis dalam memperkuat ketahanan tanaman terhadap berbagai bentuk cekaman biotik maupun abiotik. Melalui pendekatan seperti rekayasa genetika, kultur jaringan, pemuliaan berbantuan

marker, serta pemanfaatan mikroorganisme fungsional, bioteknologi mampu menghasilkan varietas unggul yang adaptif, produktif, dan berkelanjutan. Implementasi bioteknologi di Indonesia menghadapi sejumlah tantangan, mulai dari keterbatasan infrastruktur, rendahnya literasi petani, biaya penelitian yang tinggi, hingga regulasi yang kompleks. Namun, tantangan ini dapat diatasi dengan strategi yang tepat, seperti peningkatan kapasitas sumber daya manusia, penguatan kolaborasi multi-pihak, serta eksplorasi plasma nutfah lokal.

Secara khusus, Kalimantan Timur memiliki potensi besar dalam pengembangan bioteknologi pertanian. Kondisi lahan suboptimal, kebutuhan pangan yang meningkat seiring pembangunan Ibu Kota Nusantara, serta kekayaan biodiversitas lokal menjadikan daerah ini sebagai laboratorium alami untuk penerapan bioteknologi. Dengan memanfaatkan sumber daya lokal dan dukungan kebijakan yang tepat, bioteknologi di Kalimantan Timur dapat menjadi model penerapan pertanian berkelanjutan yang berorientasi pada ketahanan pangan dan ekonomi hijau.

DAFTAR PUSTAKA

- AfIdzatuttama, Anwar, K. and Amara, K. (2025) 'Identifikasi dan Karakterisasi Bakteri Penyebab Hawar Daun Padi (*Xanthomonas oryzae* pv . *oryzae*)', *JUSTER: Jurnal Sains dan Terapan*, 4(2), pp. 122–127.
- Amalia, F. N., Hidayati, S. N. and Sa'id, I. bin (2023) 'Pengaruh Rekayasa Genetika Pada Produktivitas Tanaman Jagung (*Zea Mays*) Transgenik', *J. Pertanian Pat Petulai (JPPP)*, 1(1), pp. 37–44.
- Amirhusin, B. (2002) 'Penggunaan *Bacillus thuringiensis* sebagai bio-insektisida', *Buletin AgroBio*, 5(1), pp. 21–28.
- Avivi, S. *et al.* (2022) 'Pengaruh cekaman genangan terhadap pertumbuhan dan hasil beberapa varietas tomat (*Lycopersicum esculentum* Mill .)', 15(1), pp. 1–5.
- Azmi, Y. (2018) 'Evaluasi Galur Dihaploid Padi Terhadap Cekaman Salinitas', *Menara Ilmu*, XII(6), pp. 178–185.
- Bhuja, P. *et al.* (2022) 'Pengaruh Cekaman Salinitas Terhadap Viabilitas Perkecambahan Kultivar Padi Gogo Kabupaten Sumba Barat Daya', *Jurnal Biotropikal Sains*, 19(1), pp. 1–10.
- Farida, N. *et al.* (2022) 'Insidensi dan Identifikasi Molekuler Papaya ringspot virus pada Pepaya di Jawa', *J. Fitopatologi Indonesia*, 18(1), pp. 43–51. doi: 10.14692/jfi.18.1.43.
- Florenika, N. *et al.* (2022) 'Regenerasi Nilam Aceh “Sidikalang” melalui Organogenesis tak Langsung dan Multiplikasi Tunas dalam Produksi Tanaman True-to-Types', *Agriprima: Journal of Applied Agricultural Sciences*, 6(1), pp. 1–11. doi: 10.25047/agriprima.v6i1.447.
- Hardianti, O. and Soetopo, L. (2018) Pengaruh Konsentrasi Pupuk Daun pada Media Anggrek *Dendrobium* dan *Cattleya* secara In Vitro The Effect Foliar Fertilizer Concentration on In Vitro Media of *Dendrobium* and *Cattleya* Orchids, *Jurnal Produksi Tanaman*.
- Herdhiansyah, D. *et al.* (2025) 'Implementasi Iot Untuk Optimasi Budidaya Tanaman Hidroponik Pada Ukm Rumah Bali Hidroponik Untuk Meningkatkan Efisiensi Produksi', *Jurnal Abdi Insani*, 12(6), pp. 2575–2587. doi: 10.29303/abdiinsani.v12i6.2274.
- Hidayat, S. H., Nurulita, S. and Wiyono, S. (2012) 'TEMUAN PENYAKIT BARU Infeksi Papaya ringspot virus pada Tanaman Pepaya di Provinsi Nanggroe Aceh Darussalam', *J. Fitopatologi Indonesia*, 8(6), pp. 184–187.

- Hutomo, P. A. B. and Purwanto (2023) 'Karakter Agronomi dan Fisiologi Tanaman Padi (*Oryza Sativa* L . Cv Inpari Unsoed 79 Agritan) yang Terinfeksi *Xanthomonas Oryzae* Pv . *Oryzae* dan Diinokulasi Rhizobacteria Indigenous Lahan Salin', *Jurnal Penelitian Pertanian Terapan*, 23(1), pp. 13–24.
- Latifah, R., Suhermiatin, T. and Ermawati, N. (2017) 'Optimasi Pertumbuhan Plantlet *Cattleya* Melalui Kombinasi Kekuatan Media Murashige-Skoog dan Bahan Organik', *Agriprima : Journal of Applied Agricultural Sciences*, 1(1), pp. 54–62. doi: 10.25047/agriprima.v1i1.20.
- Novitaningrum, R., Buwono, R. I. and Saputro, W. A. (2021) 'Produktivitas Padi Varietas Inpari 33 Dan Faktor Yang Mempengaruhinya Di Kabupaten Karanganyar Provinsi Jawa Tengah', *JURNAL ILMIAH AGRINECA*, pp. 9–16.
- Paradisa, Y. B. *et al.* (2022) 'Evaluasi 36 Genotipe Padi Gogo Terhadap Cekaman Biotik Dan Abiotik Pada Enam Lokasi Berbeda', *AGROSAINSTEK: Jurnal Ilmu dan Teknologi Pertanian*, 6(1), pp. 12–22.
- Pohan, S. D. *et al.* (2021) 'Modern Plant Breeding For Sustainable Agriculture: A Review', *JERAMI : Indonesian Journal of Crop Science*, 4(1), pp. 9–16. doi: 10.25077/jijcs.4.1.9-16.2021.
- Putri, A. B. S. *et al.* (2021) 'Teknik kultur jaringan untuk perbanyak dan konservasi tanaman kentang (*Solanum tuberosum* L.) secara in vitro', *Filogeni: Jurnal Mahasiswa Biologi*, 1(2), pp. 69–76. doi: 10.24252/filogeni.v1i2.23801.
- Rahmawati, A. and Fitrianiingsih, D. (2023) 'Aplikasi Bioteknologi pada Tanaman sebagai Alternatif Pencegahan Krisis Pangan', *Agritechpedia: Journal of Agriculture and Technology*, 1(1), pp. 57–63.
- Saepudin, A., Yulianto, Y. and Aeni, R. N. (2020) 'Pertumbuhan Eksplan in Vitro Anggrek Hibrida *Dendrobium* Pada Beberapa Media Dasar Dan Konsentrasi Air Kelapa', *Media Pertanian*, 5(2), pp. 97–115. doi: 10.37058/mp.v5i2.2451.
- Salampessy, Y. L. . *et al.* (2018) 'Menakar Kapasitas Adaptasi Perubahan Iklim Petani Padi Sawah (Kasus Kabupaten Pasuruan Jawa Timur)', *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 16(1), pp. 25–34. doi: 10.14710/jil.16.1.25-34.
- Salimah, N. A., Kuswinanti, T. and Nasruddin, A. (2021) 'Eksplorasi dan Penentuan Ras Penyebab Penyakit Blas Padi di Kabupaten Maros', *J.Fitopatologi Indonesia*, 17(2), pp. 41–48. doi: 10.14692/jfi.17.2.4.

- Sativa, N. *et al.* (2022) ‘Uji Cekaman Salinitas Terhadap Viabilitas Dan Vigor Benih Beberapa Kultivar Kedelai (*Glycine max* (L). MERRIL)’, *JAGROS Journal of Agrotechnonogy and Science*, 7(1), pp. 39–50.
- Syafitri, N. and Ikhsan Harahap, M. (2023) ‘Sektor Pertanian Dalam Menghadapi Perubahan Iklim’, *Communnity Development Journal*, 4(4), pp. 7479–7483.
- Syauqi, A. H. and Amzeri, A. (2023) ‘Seleksi Tanaman Jagung Toleran pada Cekaman Kekeringan’, *Rekaya: Journal of Science and Technology*, 16(1), pp. 113–124.

BAB 9

PRODUKSI BENIH

HIBRIDA SECARA BIOTEKNOLOGI

Oleh: Rahmatun Nisful Maghfiroh

Penggunaan benih hibrida merupakan salah satu pendekatan paling efektif untuk meningkatkan produktivitas dan stabilitas hasil tanaman. Peningkatan ini dapat diperoleh melalui pemanfaatan heterosis (keunggulan hibrida). Heterosis memungkinkan kombinasi alel dari dua tetua yang berbeda menghasilkan keturunan (F_1) yang memiliki keragaan agronomis (seperti tinggi hasil, ketahanan terhadap stres, dan keseragaman populasi) yang lebih baik dari kedua tetuanya. Prinsip dan aplikasi heterosis telah menjadi landasan bagi pengembangan banyak varietas unggul di berbagai komoditas pangan dan hortikultura (Labroo, Studer & Rutkoski 2021). Keunggulan benih hibrida ini telah dibuktikan pada tanaman padi, jagung, tomat, dan melon yang dapat meningkatkan hasil 10-50% (Birchler 2010).

Meskipun ada banyak manfaat dari penggunaan benih hibrida, misalnya pada hibrida CMS/sterilitas jantan sitoplasmik, dari sudut pandang agronomis, produksi benih hibrida menghadapi tantangan teknis dan manajerial yang cukup besar. Keberhasilan dalam memproduksi benih hibrida tergantung pada kemampuan untuk (1) menghasilkan tetua yang stabil dan murni, (2) memastikan tetua jantan yang steril dan dapat diandalkan untuk mencegah penyerbukan sendiri pada tanaman betina, dan (3) menyinkronkan waktu berbunga antara tetua jantan dan betina agar penyerbukan silang (hibridisasi) dapat terjadi secara optimal. Keterbatasan dalam salah satu aspek ini dapat mengurangi efisiensi produksi dan kualitas benih hibrida (Bohra et al. 2016; Gaballah et al. 2021).

Saat ini, bioteknologi dan teknologi molekuler telah berkembang menjadi alat bagi para pemulia tanaman untuk mengatasi tantangan-tantangan tersebut. Teknologi seperti sistem sterilitas genetik (*Genic Male Sterility*/GMS) atau sitoplasmik (CMS), identifikasi dan pemanfaatan gen pemulih kesuburan/*restorer* (Rf), serta teknik seleksi berbantu marka (*Marker-Assisted Selection*/MAS) memungkinkan pengelolaan galur tetua, verifikasi identitas genetik, dan perancangan skema produksi yang lebih efisien. Selain itu, penggunaan penanda molekuler mempermudah identifikasi tetua dan verifikasi hibriditas pada tahap bibit, sehingga mempercepat seleksi dan juga

dapat memastikan kemurnian genetik benih (Collard & Mackill 2008; Bohra et al. 2016).

Di samping itu, penerapan manajemen agronomi yang didukung oleh bioteknologi, seperti penjadwalan penanaman, manipulasi lingkungan untuk menyinkronkan pembungaan, dan penggunaan teknik kultur jaringan sebagai upaya percepatan pemuliaan, menjadi semakin penting untuk meningkatkan efisiensi produksi benih. Aspek organisasi produksi, seperti pengaturan isolasi, rotasi tanaman, kontrol kualitas benih, dan logistik, tetap menjadi elemen kunci agar sistem produksi benih hibrida dapat beroperasi secara praktis, efektif, dan berkelanjutan.

Selain itu, pendekatan manajemen agronomi yang didukung bioteknologi, meliputi penjadwalan tanam, manipulasi lingkungan untuk sinkronisasi berbunga, dan penggunaan teknik kultur jaringan sebagai upaya *speed-breeding* semakin krusial untuk meningkatkan efisiensi produksi benih. Aspek organisasi produksi (misal pengaturan isolasi, rotasi tanam, kontrol kualitas benih, dan logistik) tetap merupakan komponen penting agar sistem produksi benih hibrida dapat berjalan secara praktis, efektif, dan berkelanjutan (Gaballah et al. 2021).

Bab 9 ini akan membahas secara rinci setiap sub-bab yang menjelaskan aspek teknis dan ilmiah yang mendasari praktik produksi benih hibrida modern. Sub-bab tersebut meliputi: Dasar genetik benih hibrida (sub-bab 1), Sistem steril jantan restorasi kesuburan (sub-bab 2), pemanfaatan marka untuk identifikasi *parental line* (sub-bab 3), bioteknologi dalam sinkronisasi pembungaan (sub-bab 4), serta efisiensi produksi dan keunggulan benih hibrida (sub-bab 5). Pembahasan menggabungkan konsep dasar, contoh aplikasi pada komoditas penting, serta kajian literatur mutakhir yang relevan untuk memberi landasan teoretis dan praktik bagi mahasiswa dan peneliti yang berkecimpung pada pemuliaan tanaman dan produksi benih.

9.1 Dasar Genetik Benih Hibrida

Dasar genetik benih hibrida didasarkan pada fenomena heterosis (*hybrid vigor*), yaitu peningkatan penampilan fenotipe pada keturunan (F_1) dibandingkan dengan tetuanya. Manifestasi heterosis dapat muncul dalam bentuk peningkatan hasil, vigor pertumbuhan, ketahanan terhadap penyakit, toleransi stres abiotik, atau kualitas hasil yang lebih baik. Konsep ini telah menjadi dasar pengembangan varietas hibrida pada berbagai tanaman pangan (seperti padi, jagung, dan gandum) dan hortikultura (seperti tomat, melon, dan cabai). Heterosis merupakan hasil interaksi kompleks antara komponen

genetik, epigenetik, dan regulasi ekspresi gen yang saling berpengaruh terhadap performa fisiologis tanaman (Birchler 2010).

Heterosis dijelaskan melalui tiga teori utama, yaitu teori dominansi, overdominan, dan epistasis.

1) Teori Dominansi

Teori dominansi dikemukakan pertama kali oleh Davenport (1908) dan Bruce (1910), teori ini menjelaskan bahwa heterosis muncul karena penutupan pengaruh alel resesif yang merugikan oleh alel dominan pada lokus yang berbeda. Dengan demikian, keturunan hibrida memiliki lebih banyak gen dominan yang menguntungkan dibandingkan induknya. Contohnya dapat dilihat pada tanaman jagung (*Zea mays*), di mana lokus-lokus dominan yang mengontrol vigor pertumbuhan berkontribusi terhadap peningkatan hasil F_1 (Crow 1998).

2) Teori Overdominan

Teori overdominan diperkenalkan oleh East (1936) dan Shull (1948), teori ini menyatakan bahwa jika lokus dalam kondisi heterozigot dapat memiliki nilai fenotip lebih tinggi daripada kedua homozigotnya. Misalnya, pada beberapa gen pengatur metabolisme energi dan fotosintesis, heterozigositas menghasilkan kombinasi enzim yang lebih efisien dalam mendukung pertumbuhan (Semel et al., 2006).

3) Teori Epistasis dan Interaksi Gen

Interaksi antar-lokus juga berperan penting. Heterosis tidak hanya berasal dari pengaruh gen tunggal, tetapi juga interaksi antara gen-gen yang berbeda (epistasis) yang membentuk jaringan metabolik dan fisiologis kompleks (Hochholdinger & Baldauf 2018).

Ketiga mekanisme ini dapat bekerja bersamaan, tergantung pada spesies dan kombinasi tetua yang digunakan dalam merakit varietas hibrida.

Analisis genetik pada berbagai tanaman menunjukkan bahwa heterosis bersifat kuantitatif dan poligenik. Lokus-lokus yang berkontribusi terhadap heterosis dikenal sebagai *heterotic loci* atau *heterotic QTLs* (*Quantitative Trait Loci*). Penemuan QTL heterosis pada padi, jagung, dan gandum menunjukkan bahwa pengaruh heterosis tersebar di banyak kromosom dengan kontribusi aditif dan non-aditif.

Pendekatan genom modern telah memungkinkan identifikasi gen yang mendasari fenomena ini. Misalnya 1) Gen *ZmCCT* pada jagung berperan dalam regulasi pembungaan dan adaptasi fotoperiodisasi (Yang et al., 2013);

dan 2) Gen *GS3* dan *GW2* pada padi berperan dalam regulasi ukuran gabah, yang memengaruhi peningkatan hasil (Huang et al. 2016). Analisis ekspresi gen berbasis *RNA-seq* juga menunjukkan bahwa diferensiasi ekspresi alel tetua (*allelic expression bias*) berperan penting pada terjadinya heterosis (Paschold et al., 2012).

Perakitan varietas hibrida yang stabil memerlukan tetua galur murni dengan tingkat homozigositas tinggi dengan karakteristik agronomis yang berbeda namun saling melengkapi. Proses penggaluran parental dilakukan melalui:

1) *Selfing*

Pemurnian galur dilakukan melalui kegiatan *selfing* atau kawin sendiri selama beberapa generasi (biasanya ≥ 6 generasi) hingga diperoleh galur murni yang homozigot.

2) *Doubled Haploid (DH)*

Metode bioteknologi ini bertujuan mempercepat pembentukan galur homozigot dalam satu generasi melalui kultur antera, mikrospora, atau ovul.

3) Pemanfaatan marka molekuler

Marka molekuler digunakan untuk mengevaluasi kemurnian genetik, jarak genetik, dan hubungan antar galur

9.2 Sistem Steril Jantan dan Restorasi Kesuburan

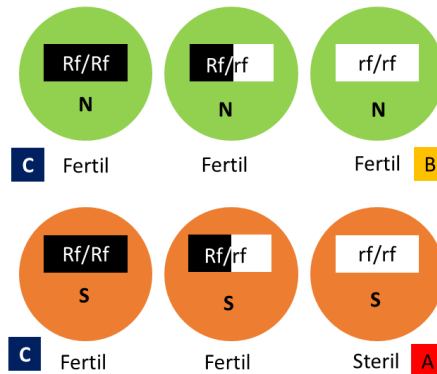
Sistem steril jantan (*male sterile*) merupakan salah satu metode yang digunakan pada produksi benih. Sistem ini memungkinkan produksi hibrida tanpa perlu membuang organ jantan pada tetua betina (misal: *detasseling* pada jagung). Tujuan dari penggunaan teknologi ini salah satunya untuk mempermudah proses produksi dan mengurangi biaya produksi karena tidak perlu melakukan emaskulasi, kepastian bahwa benih yang dihasilkan adalah hibrida sehingga dapat mengurangi biaya uji hibriditas, dan meminimalisir resiko kebocoran tetua betina terhadap pihak luar produsen. Sebelum lebih jauh membahas tentang sistem steril jantan dalam produksi benih hibrida, lebih dulu kita bahas definisi dari steril jantan itu sendiri. Tanaman steril jantan adalah suatu kondisi di mana tanaman gagal memproduksi polen yang berfungsi normal. Kegagalan ini dapat terjadi karena beberapa sebab, yaitu kelainan spesifikasi dan diferensiasi *anther*, abnormalitas microsporogenesis dan perkembangan serbuk sari, *anther* yang tidak pecah, atau ketidakmampuan serbuk sari untuk berkecambah dan membuahi gamet betina (Pei et al. 2024). Oleh karena itu, salah satu kunci keberhasilan perakitan varietas hibrida

dengan sistem steril jantan ini adalah diperolehnya tetua betina yang tidak menghasilkan serbuk sari atau serbuk sari yang *non viable* (gen *rf*) dengan tetua jantan merupakan *restorer* atau pemulih kesuburan pada turunannya sesuai kebutuhan (gen *Rf*).

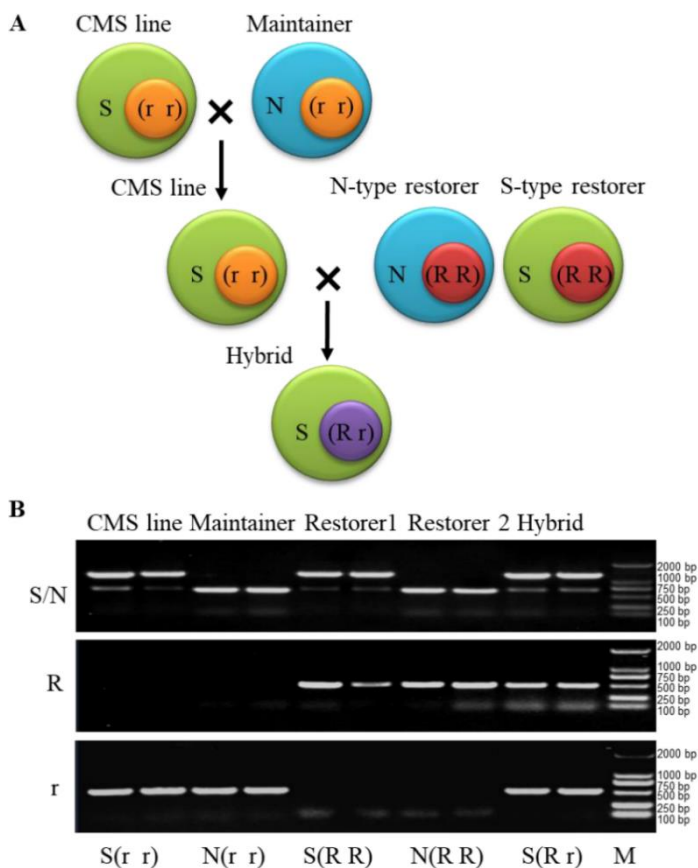
Sistem steril jantan diklasifikasikan ke dalam beberapa tipe, yaitu *Cytoplasmic Male Sterility* (CMS), *Genic (Nuclear) Male Sterility* (GMS/NGMS), *Environmentally-Sensitive Genic Male Sterility* (EGMS/PTGMS/TGMS), dan *Chemical Hybridizing Agents* (CHA).

1) *Cytoplasmic Male Sterility* (CMS)

Komponen CMS terdiri atas tiga galur yang menjadi kunci keberhasilan perakitan varietas CMS, yaitu *A-line* (galur A) sebagai tetua betina persilangan, *B-line* sebagai pasangan dari *A-line* yang berperan sebagai pelestari (*maintainer/maintainer*), dan *C-line* yaitu galur elit yang berperan sebagai tetua jantan persilangan yang menjadi tetua pemulih kesuburan (*restorer*). Gen penyebab mandul jantan di sitoplasma ini diwariskan melalui jalur tetua betina (*maternal*), dan gen resesif mandul jantan (*rf*) di inti diwariskan baik melalui tetua jantan maupun betina. Tanaman akan bersifat steril hanya jika gen di inti dalam kondisi homozigot resesif dan gen di sitoplasma dalam kondisi steril (*S(rf/rf)*). Berikut adalah konsep dasar CMS/CGMS dalam sel (Gambar 27 dan 28).



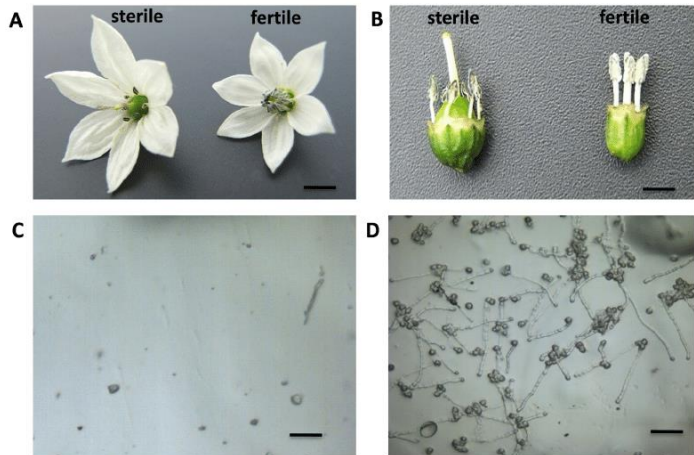
Gambar 27. Konsep CMS: kondisi gen di sitoplasma dan inti sel, serta ekspresinya terhadap fertilitas galur



Gambar 28. Diagram skematik pola genetic tiga galur CMS dan hibridnya pada *Brassica napus* serta identifikasinya dengan marka molekuler. Sumber gambar: (Zhang et al. 2023)

Perbedaan antara bunga steril dan fertil dapat diamati secara struktur morfologi dan juga perkecambahan polen pada uji viabilitas. Perbedaan ini dapat dilihat pada Gambar 29. Gambar 29A memberikan gambaran bahwa anter bunga steril terlihat kurus, tidak berisi, dan polen sangat sedikit, sedangkan anter bunga fertil diselubungi oleh polen dengan penuh dan rapat. Saat bunga fertil sedang antesis, kotak sari pecah dan serbuk sari akan terlihat berhamburan ketika diketuk dengan jari. Pada Gambar 29B, bunga steril terlihat memiliki anter yang lebih kecil dibandingkan

dengan anter pada bunga fertil. Selanjutnya, Gambar 29C dan 29D merupakan hasil uji viabilitas polen di bawah mikroskop. Terlihat bahwa tidak ada polen pada bunga steril (C) dan polen bunga fertil berkecambah secara normal yang menandakan bahwa polen tersebut viabel (D).



Gambar 29. Perbandingan antara bunga fertil dan steril pada cabai. A dan B merupakan struktur morfologi dari bunga fertil dan steril; C. Hasil uji viabilitas polen bunga steril; D. Hasil uji viabilitas polen bunga fertil. Sumber gambar: (Huang et al., 2015)

2) *Genic (Nuclear) Male Sterility* (GMS/NGMS)

Ini disebabkan oleh adanya mutasi atau alel resesif/dominan pada gen inti esensial pada gamet jantan. GMS dapat bersifat stabil (*recessive/dominant*) dan seringkali memerlukan strategi penanganan khusus untuk mempertahankan galur steril.

3) *Environmentally-Sensitive Genic Male Sterility* (EGMS/PTGMS/TGMS)

Sterilitas pada EGMS dipicu oleh kondisi lingkungan, seperti fotoperiodisme atau suhu (*photoperiod-/thermo-sensitive genic male sterility*). Praktik EGMS dalam perakitan varietas tanaman memanfaatkan konsep dua galur, yaitu A line yang berperan sebagai tetua betina merupakan galur yang steril pada kondisi tertentu dan R-line yang merupakan tetua jantan yang bersifat fertil. Sistem dua galur (*two-line*) pada padi memanfaatkan EGMS sehingga tidak memerlukan *restorer*, tetapi metode

ini memiliki kekurangan yaitu rentan terhadap perubahan lingkungan dan memerlukan manajemen lingkungan/penjadwalan tanam yang ketat.

4) *Chemical Hybridizing Agents* (CHA)

CHA adalah agen kimia yang secara sementara menyebabkan sterilitas jantan. Fenomena ini memang bermanfaat, namun memiliki keterbatasan dari aspek keselamatan, konsistensi, dan dampak negatif terhadap agronomi.

Diantara tiga metode tersebut, CMS merupakan metode yang paling ideal jika tersedia restorer yang jelas dan memiliki karakter yang diinginkan, sedangkan EGMS merupakan metode yang dapat dipilih jika lingkungan atau penjadwalannya dapat dikontrol. GMS dan CHA dapat menjadi alternatif, namun terdapat keterbatasan dalam stabilitas dan cukup sulit dalam aspek pemeliharaan.

9.3 Pemanfaatan *Marka* untuk Identifikasi *Parental Line*

Identifikasi dan verifikasi galur tetua merupakan langkah penting dalam program produksi benih hibrida. Ketepatan identifikasi mempengaruhi kemurnian genetik benih F_1 , efisiensi pengujian hibriditas, serta kemampuan pemulia mengenali dan memilih kombinasi parental yang menghasilkan heterosis optimal. Teknologi molekuler (*DNA marker*) memberi alat yang cepat dan akurat, yang dapat menggantikan atau melengkapi metode fenotipik tradisional.

Terdapat beberapa jenis dari teknologi marka molekuler yang umum digunakan, baik yang berbasis hibridisasi (*hybridization-based marker*) yaitu *Restriction Fragment Length Polymorphism* (RFLP) dan *PCR-based marker*, meliputi *Amplified Fragment Length Polymorphism* (AFLP), *Simple Sequence Repeats* (SSR), *Single Nucleotide Polymorphism* (SNP), dan yang terkini yaitu CRISPR-Cas9 *gene editing*.

1) *Restriction Fragment Length Polymorphism* (RFLP)

RFLP adalah teknik yang digunakan dalam biologi molekuler untuk menganalisis variasi urutan DNA. Teknik ini menggunakan enzim restriksi untuk memotong DNA di lokasi tertentu, menghasilkan fragmen dengan panjang yang beragam. Fragmen yang dihasilkan dipisahkan melalui elektroforesis *gel* dan diamati untuk menentukan keragaman genetik di antara individu. Analisis RFLP telah banyak digunakan dalam forensik, tes paternitas, dan pemetaan genetik. Namun, seiring kemajuan teknologi, metode-metode baru dan lebih

efisien seperti *polymerase chain reaction* (PCR) telah menggantikannya dalam banyak aplikasi.

2) *Amplified Fragment Length Polymorphism* (AFLP),

Marka AFLP dihasilkan melalui amplifikasi PCR dari fragmen acak genom. Marka ini didasarkan pada deteksi variasi panjang fragmen yang dihasilkan oleh pemotongan enzim restriksi. Marka AFLP telah digunakan pada berbagai spesies tumbuhan dan sangat berguna untuk mempelajari keragaman genetik, memperkirakan hubungan genetik, dan pemetaan *Quantitative Trait Loci* (QTL).

3) *Simple Sequence Repeats* (SSR)

SSR disebut juga sebagai *microsatellites*, yaitu urutan DNA pendek yang berulang secara tandem dan terdapat di seluruh genom. Marka ini memiliki polimorfisme yang tinggi dan tingkat reproduktivitas yang tinggi. Marka SSR telah banyak digunakan dalam analisis keragaman genetik, uji hibriditas, pemetaan QTL, dan seleksi berbantu marka (*Marker Assisted Selection*/MAS). Uji hibriditas menggunakan marka kodominan (SSR atau SNP kodominan) untuk membuktikan keberadaan alel tetua secara spesifik pada keturunan F₁. Proses ini dapat mempercepat seleksi awal dan menghemat ruang lahan dibanding pengujian fenotipik jangka panjang.

4) *Single Nucleotide Polymorphism* (SNP)

Marka SNP merupakan jenis variasi DNA yang paling umum ditemukan dalam genom dan terjadi ketika pasangan basa nukleotida tunggal berbeda di antara individu. Marka ini telah digunakan secara luas dalam *Genome-Wide Association Studies* (GWAS), pemetaan tautan (*linkage*), uji kemurnian genetik (misal pada *seed lot testing*), mengukur jarak genetik, dan program perbaikan tanaman.

5) *Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats* (CRISPR)-*CRISPR-associated* (Cas)9 *Gene Editing*

Teknik CRISPR-Cas9 *gene editing* adalah teknik yang relatif baru yang memungkinkan peneliti untuk melakukan perubahan yang tepat pada urutan DNA organisme. Teknik ini telah digunakan dalam program perbaikan tanaman untuk memodifikasi sifat-sifat seperti ketahanan terhadap penyakit, hasil panen, dan kualitas. Salah satu keunggulan pengeditan gen CRISPR-Cas9 adalah kemampuannya untuk melakukan perubahan pada lokasi spesifik dalam genom,

menjadikannya teknik yang andal untuk perbaikan sifat. Metode ini ditemukan pada tahun 2012 oleh Jennifer Doudna dan Emmanuelle Charpentier, yang telah menjadi penemuan yang sangat signifikan dalam Sejarah perkembangan bioteknologi. Mereka mendapatkan *Nobel Prize in Chemistry* pada tahun 2020. Penjelasan tentang struktur dan mekanisme dari CRISPR-Cas9 ini dapat dipelajari pada artikel yang ditulis oleh J.A Doudna bersama dengan koleganya, F. Jiang (Jiang & Doudna 2017).

Sistem CRISPR/Cas9 menawarkan alat pengeditan genom yang dapat diandalkan dan digunakan secara bersamaan, memungkinkan para peneliti untuk memanipulasi elemen genomik tertentu dengan akurasi tinggi dan membantu memahami fungsi gen target dalam konteks biologi dan penyakit. CRISPR/Cas9 terdiri atas enzim Cas9 nonspesifik dan sekelompok RNA CRISPR yang dapat diprogram dan spesifik urutan (crRNA), yang dapat mengarahkan Cas9 untuk memotong DNA dan menciptakan patahan ganda pada lokasi target. Proses perbaikan DNA seluler yang terjadi kemudian dapat menyebabkan insersi, delesi, atau substitusi pada lokasi tersebut sesuai keinginan. Karakteristik pemotongan DNA oleh CRISPR/Cas9 memerlukan urutan target yang sesuai dengan crRNA dan motif *protospacer* yang berdekatan yang terletak pada *downstream* dari sekuen target (Acosta-Soto et al. 2024).

Selain dari jenis-jenis marka molekuler yang disebutkan di atas, sebenarnya masih ada beberapa jenis lainnya, antara lain *chloroplast microsatellites* (cpSSRs), *mitochondrial microsatellites*, *Randomly Amplified Microsatellite Polymorphisms* (RAMP), *Sequence-Related Amplified Polymorphisms* (SRAP), *Inter Simple Sequence Repeat* (ISSR), *retrotransposons*, *Inter-Retrotransposon Amplified Polymorphism* (IRAP), *Retrotransposon Microsatellite Amplification Polymorphisms* (REMAP), *Retrotransposon-Based Insertion Polymorphisms* (RBIP), *Cleaved Amplified Polymorphic Sequences* (CAPS), *Sequence-Characterized Amplified Regions* (SCAR), dan *Diversity Array Technology* (DArT Seq) (Kumar & Jorben, 2020).

9.4 Bioteknologi dalam Sinkronisasi Pembungaan

Sinkronisasi waktu pembungaan antar tetua pembentuk hibrida merupakan faktor yang sangat penting dalam keberhasilan produksi benih hibrida. Faktor ini penting karena mempengaruhi keberhasilan polinasi, meningkatkan persen set biji pada tetua betina, dan menurunkan kehilangan polen akibat waktu berbunga yang tidak sinkron. Kegagalan sinkronisasi

pembungaan dapat menurunkan efisiensi produksi benih, meningkatnya biaya produksi (perlu *multiple plantings*), dan risiko kontaminasi genetik. Oleh karena itu, strategi bioteknologi dan pengelolaan lingkungan yang mampu mengatur waktu berbunga menjadi komponen penting dalam sistem produksi benih modern. Beberapa teknik dalam bioteknologi dapat membantu dalam menyukseskan pengaturan waktu pembungaan, yang memungkinkan manipulasi langsung pada genom tanaman, kultur jaringan, dan produksi tanaman transgenik (GM) atau tanaman yang telah diedit genomnya dengan sifat-sifat yang diinginkan.

Pemanfaatan transkriptomik dan ekspresi gen melalui teknik seperti RNA-*seq* dan *qPCR* membantu dalam memahami ekspresi gen selama fase pembungaan, respon stress, dan produksi aroma, serta untuk mengidentifikasi *Differentially Expressed Genes* (DEGs) di bawah pengaruh lingkungan dan hormon. CRISPR-Cas9 juga menjadi teknologi yang memungkinkan modifikasi gen secara presisi sesuai target dengan tanpa memasukkan DNA lain. Teknologi ini dapat diaplikasikan untuk mengedit gen pengatur waktu berbunga (misal: *GhFT gene* pada petunia). Selain melalui dua teknik di atas, RNA interference (RNAi) juga memiliki peran serupa, yaitu dapat menunda senesen atau menghambat produksi alergen pada bunga (Vaishnav & Tiwari 2025)

DAFTAR PUSTAKA

- Acosta-Soto, A.F., López-Díaz, D.M., Esquivel-Ramírez, J., Mora-Soriano, J. & Lazalde-Medina, B., 2024, 'Fundamentals of CRISPR-Cas9: Gene-editing technology and basic', *GSC Advanced Research and Reviews*, 20(1), 042–049. <https://doi.org/10.30574/gscarr.2024.20.1.0223>.
- Birchler, J. A., Yao, H., Chudalayandi, S., Valman, D., Veitia, R. A., 2010, Heterosis, *The Plant Cell*, 22, 105–112. <https://doi.org/10.1105/tpc.110.076133>
- Bohra, A., Jha, U.C., Adhimoolam, P., Bisht, D. & Singh, N.P., 2016, Cytoplasmic male sterility (CMS) in hybrid breeding in field crops, *Plant Cell Reports*, 35(5), 967–993. <https://doi.org/10.1007/s00299-016-1949-3>.
- Collard, B.C.Y. & Mackill, D.J., 2008, Marker-assisted selection: An approach for precision plant breeding in the twenty-first century, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1491), 557–572. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2170>.
- Gaballah, M., Hamad, H., Bamagoos, A., Alharby, H., Ahmed, S., Ismail, I.A., Sohridul Islam, M. & Sabagh, A. El, 2021, 'Flowering synchronization in hybrid rice parental lines at different sowing dates', *Sustainability (Switzerland)*, 13(6). <https://doi.org/10.3390/su13063229>.
- Hochholdinger, F., Baldauf, J. A., 2018, Primer heterosis in plants, *Current Biology*, 28, R1075–R1095.
- Huang, W., Ji, J.J., Li, C., Li, G.Q., Yin, C.C., Chai, W.G. & Gong, Z.H., 2015, 'Novel genetic male sterility developed in (*Capsicum annuum* x *C. chinense*) x *C. pubescens* and induced by HNO₂ showing Mendelian inheritance and aborted at telophase of microspore mother cell stage', *Genetics and Molecular Research*, 14(2), 3318–3329. <https://doi.org/10.4238/2015.April.13.11>
- Huang, X., Yang, S., Gong, J., Zhao, Q., Feng, Q., Zhan, Q., Zhao, Y., Li, W., Cheng, B., Xia, J., Chen, N., Huang, T., Zhang, L., Fan, D., Chen, J., Zhou, C., Lu, Y., Weng, Q. & Han, B., 2016, 'Genomic architecture of heterosis for yield traits in rice', *Nature*, 537(7622), 629–633. <https://doi.org/10.1038/nature19760>.
- Jiang, F. & Doudna, J.A., 2017, CRISPR-Cas9 Structures and Mechanisms, *Annual Review of Biophysics*, 46, 505–529. <https://doi.org/10.1146/annurev-biophys-062215-010822>.

- Kumar R & Jorben J, 2020, 'Kumar and Jorben 2020-types of molecular markers', in Pidigam Saidaiiah (ed.), *Advances in Genetics and Plant Breeding*, vol. 10, pp. 89–106, AkiNik Publ, India.
- Labroo, M.R., Studer, A.J. & Rutkoski, J.E., 2021, Heterosis and hybrid crop breeding: a multidisciplinary review, *Frontiers in Genetics*, 12. <https://doi.org/10.3389/fgene.2021.643761>.
- Paschold, A., Jia, Y., Marcon, C., Lund, S., Larson, N.B., Yeh, C.T., Ossowski, S., Lanz, C., Nettleton D, Schnable, P.S. & Hochholdinger, F., 2012, Complementation contributes to transcriptome complexity in maize (*Zea mays* L.) hybrids relative to their inbred parents, *Genome Research*, 22, 2445–2454. <https://doi.org/doi/10.1101/gr.138461.112>.
- Pei, Q., Liu, J., Guo, C., Ma, X., Liu, X., You, C., Lin, H., Li, Z., Zhao, R., Zhu, B., Wu, Y., Pan, Z. & Nie, X., 2024, 'Morphological and cytological assessments reveal pollen degradation causes pollen abortion in cotton cytoplasmic male sterility lines', *Journal of Cotton Research*, 7(1). <https://doi.org/10.1186/s42397-024-00189-8>.
- Semel, Y., Nissenbaum, J., Menda, N., Zinder, M., Krieger, U., Issman, N., Pleban, T., Lippman, Z., Gur, A. & Zamir, D., 2006, Overdominant quantitative trait loci for yield and fitness in tomato, *PNAS*, 103(35):12981–12986. <https://doi.org/10.1073/pnas.0604635103>.
- Vaishnav, T.D. & Tiwari, A., 2025, Role of molecular biology and biotechnology in flowering crops, *Current Agriculture Trends*, 4(9), 22–25.
- Yang Q, Li Z, Li W, Ku L, Wang C, Ye J, Li K, Yang N, Li Y, Li J, Chen Y, Yan J, Yang X & Xu M, 2013, CACTA-like transposable element in ZmCCT attenuated photoperiod sensitivity and accelerated the postdomestication spread of maize, *PNAS*, 110(42), 16969–16974. <https://doi.org/doi/10.1073/pnas.1310949110>.
- Zhang, Y., An, R., Song, M., Xie, C., Wei, S., Wang, D., Dong, Y., Jia, Q., Huang, S. & Mu, J., 2023, 'A set of molecular markers to accelerate breeding and determine seed purity of cms three-line hybrids in *Brassica napus*', *Plants*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/plants12071514>.

BAB 10

BIOTEKNOLOGI UNTUK PENINGKATAN NILAI GIZI BENIH

Oleh: Sundahri

Bioteknologi memainkan peran krusial dalam meningkatkan nilai gizi benih melalui berbagai pendekatan inovatif, termasuk rekayasa genetika, biofortifikasi, dan teknik budidaya canggih. Dengan memanfaatkan manipulasi genetik, para peneliti berhasil meningkatkan kadar nutrisi esensial pada tanaman pangan pokok seperti padi dan jagung, sehingga efektif dalam memerangi malnutrisi di wilayah berkembang (Das et al., 2020; Mudgalkar et al., 2025; Sen et al., 2024). Teknik seperti CRISPR (*Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats*) telah menjadi kunci dalam meningkatkan kandungan protein pada legum dan sereal, memfasilitasi pengembangan varietas benih yang secara nutrisi lebih unggul (Wang et al., 2024; Shivani et al., 2025). Selain itu, kemajuan bioteknologi memungkinkan penambahan senyawa bioaktif yang meningkatkan penyerapan mineral dan memberikan manfaat kesehatan (Kaur et al., 2024). Selain inovasi genetik, praktik tradisional seperti penumbuhan biji telah dioptimalkan melalui bioteknologi, secara signifikan meningkatkan profil nutrisi biji seperti biji gandum dan kacang inca (*Sacha inchi*), sambil mengurangi keberadaan faktor antinutrisi (Keawkim et al., 2021; Hassan et al., 2022). Penggunaan metabolomik dan teknologi 'omics lainnya membantu mengurai jalur genetik yang mengatur sintesis nutrisi, mengarahkan intervensi terarah untuk mengoptimalkan komposisi nutrisi biji-bijian (Zhang et al., 2024; Yang et al., 2024). Dengan demikian, integrasi berbagai strategi bioteknologi menunjukkan potensi besar dalam meningkatkan nilai gizi biji-bijian, bertujuan untuk mengatasi tantangan keamanan pangan global.

10.1 Malnutrisi dan Peran Biofortifikasi

Malnutrisi, terutama ditandai dengan kekurangan mikronutrien, mempengaruhi lebih dari 2 miliar orang di seluruh dunia, menyebabkan masalah kesehatan serius seperti gangguan kognitif, pertumbuhan terhambat, dan peningkatan angka kematian (Sheoran et al., 2022; Razzaq et al., 2021). Biofortifikasi, praktik pertanian untuk meningkatkan kualitas gizi benih tanaman pangan pokok melalui berbagai metode termasuk modifikasi genetik

dan teknik agronomis, menawarkan solusi berkelanjutan untuk mengatasi kelaparan tersembunyi (Gomes et al., 2021; Ashoka et al., 2023). Dengan fokus pada mikronutrien kunci seperti besi, seng, dan provitamin A, benih tanaman biofortifikasi dapat meningkatkan status gizi dan kesehatan populasi rentan, terutama di negara-negara berkembang (Kiran et al., 2022; Mustafa et al., 2025).

Studi terbaru menyoroti efektivitas tanaman biofortifikasi, seperti ubi jalar berdaging oranye dan jagung yang diperkaya, menunjukkan potensinya untuk mengurangi malnutrisi dan meningkatkan keragaman diet (Siwela et al., 2020). Selain itu, integrasi praktik canggih (seperti penggunaan nanoteknologi dan peningkatan mikroba) dapat lebih meningkatkan ketersediaan hayati nutrisi esensial ini dalam sistem pangan (Torre-Roche et al., 2020; Carmona et al., 2024). Secara keseluruhan, biofortifikasi mewakili strategi krusial untuk memastikan ketahanan pangan dan mempromosikan kesehatan masyarakat di tengah tantangan malnutrisi global yang semakin meningkat (Ashoka et al., 2023; Sen et al., 2024).

10.1.1 Malnutrisi

Malnutrisi merupakan masalah kesehatan masyarakat yang signifikan dan multidimensi, mencakup baik kekurangan maupun kelebihan gizi. Hal ini berkontribusi pada berbagai komplikasi kesehatan dan beban ekonomi secara global, terutama di kalangan populasi rentan seperti anak-anak, lansia, dan mereka yang menderita penyakit kronis. Sub bab ini membahas penyebab, implikasi, pencegahan, dan strategi pengelolaan malnutrisi.

1. Definisi dan Jenis-Jenis Malnutrisi

Malnutrisi merujuk pada kondisi patologis akibat konsumsi makronutrien dan mikronutrien yang tidak memadai atau berlebihan, yang berdampak negatif pada kesehatan fisik dan mental. Organisasi Kesehatan Dunia (WHO) mengkategorikan malnutrisi menjadi tiga jenis utama, yaitu: kekurangan gizi (yang mencakup stunting, wasting, dan berat badan kurang), defisiensi mikronutrien, dan kelebihan berat badan/obesitas (Gold et al., 2022). Misalnya, kekurangan gizi pada anak-anak dikaitkan dengan risiko morbiditas dan mortalitas yang lebih tinggi; seperti dalam sebuah studi menunjukkan bahwa malnutrisi berkontribusi signifikan terhadap mortalitas anak-anak, terutama di negara-negara berkembang (Fatyga et al., 2020).

Kekurangan mikronutrien, seperti yang diamati pada anak-anak dengan gizi buruk akut berat, dapat menyebabkan masalah

perkembangan jangka panjang (Eglseer et al., 2020). Sebaliknya, kelebihan gizi, yang ditandai dengan asupan kalori berlebihan yang menyebabkan obesitas, semakin diakui sebagai aspek malnutrisi, terutama di daerah urban yang pola makannya telah berubah drastis (Kupisz-Urbańska & Marcinowska-Suchowierska, 2022).

2. Prevalensi dan Faktor Risiko

Prevalensi malnutrisi bervariasi secara signifikan di antara populasi yang berbeda dan dipengaruhi oleh berbagai faktor sosio-ekonomi. Di negara-negara berpendapatan tinggi, malnutrisi sering dikaitkan dengan penyakit kronis, sementara di wilayah berpendapatan rendah, hal ini terutama disebabkan oleh asupan makanan yang tidak mencukupi dan keragaman diet yang buruk (Correia et al., 2020). Contohnya, tingkat malnutrisi pada populasi lanjut usia telah terbukti berkorelasi dengan peningkatan rawat inap dan mortalitas, menyoroti kebutuhan akan intervensi yang ditargetkan (Trollebø et al., 2022).

Faktor risiko utama untuk malnutrisi meliputi usia, status sosial-ekonomi, kurangnya pendidikan, dan kondisi kesehatan kronis. Pada lansia, faktor seperti kondisi hidup sendirian, kompleksitas medis, dan penurunan nafsu makan dapat memperburuk defisit gizi (Gusdal et al., 2021).

3. Screening dan Penilaian

Identifikasi dini terhadap individu yang berisiko mengalami malnutrisi sangat penting untuk intervensi yang efektif. Alat skrining seperti *Malnutrition Universal Screening Tool* (MUST) dan *Malnutrition Risk Screening Tool* (MRST) telah terbukti efektif di berbagai setting klinis (Mao et al., 2022). Studi terbaru menekankan pentingnya skrining gizi rutin dalam sistem kesehatan untuk menangani malnutrisi secara proaktif (Dai et al., 2022).

Penilaian komprehensif harus mengevaluasi kebiasaan makan, akses terhadap makanan, kemampuan fisik, dan faktor psikologis yang memengaruhi status gizi (Patlán-Hernández et al., 2021). Misalnya, lansia yang berisiko tinggi mengalami malnutrisi dapat memperoleh manfaat dari penilaian fisik dan gizi untuk mengidentifikasi kebutuhan spesifik dan menyesuaikan intervensi sesuai kebutuhan (Gezimu et al., 2022).

4. Akibat Malnutrisi

Malnutrisi memiliki konsekuensi luas yang memengaruhi hasil kesehatan individu dan sistem perawatan kesehatan. Pada pasien

dengan penyakit kronis, malnutrisi dapat menyebabkan gejala yang memburuk, peningkatan lama rawat inap, risiko komplikasi yang lebih tinggi, dan tingkat mortalitas yang lebih tinggi (Cate et al., 2021). Sebagai contoh, studi menunjukkan bahwa malnutrisi meningkatkan risiko kejadian yang terkait dengan perawatan rumah sakit, seperti infeksi yang didapat di rumah sakit dan waktu pemulihan yang lebih lama (Wong et al., 2020).

Pada anak-anak, kegagalan menangani malnutrisi dapat menyebabkan pertumbuhan terhambat dan kekurangan kognitif, yang dapat mempertahankan siklus kemiskinan dan produktivitas ekonomi yang rendah di usia dewasa (Browne et al., 2021). Anak-anak yang mengalami malnutrisi cenderung tertinggal dari teman sebayanya dalam hal prestasi pendidikan dan kesehatan secara keseluruhan, yang berkontribusi pada siklus kemiskinan antar generasi (Lindberg et al., 2021).

5. Strategi Pengelolaan

Penanganan malnutrisi memerlukan pendekatan multifaset yang mencakup intervensi diet, pendidikan, dan aksesibilitas layanan kesehatan. Terapi nutrisi telah diakui sebagai metode yang efektif dan efisien dalam mengelola malnutrisi, terutama di lingkungan klinis (Molina- Molina et al., 2020). Intervensi dapat mencakup suplementasi diet, pendidikan tentang pola makan seimbang, dan dukungan untuk praktik pertanian berkelanjutan guna memastikan keamanan pangan (Lestari, 2022).

Di lingkungan institusional, seperti rumah sakit dan panti jompo, penerapan rencana perawatan gizi komprehensif dapat secara signifikan meningkatkan hasil penanganan malnutrisi. Pendidikan terstruktur bagi tenaga kesehatan dalam mengenali dan menangani malnutrisi meningkatkan kualitas perawatan pasien (Dewar et al., 2020). Selain itu, melibatkan pengasuh dalam program pendidikan dapat membekali mereka dengan pengetahuan yang lebih baik untuk menangani malnutrisi pada anak-anak, sehingga berdampak signifikan di tingkat komunitas (Loda et al., 2024).

10.1.2 Peran Biofortifikasi

Biofortifikasi merupakan pendekatan pertanian yang krusial, bertujuan untuk meningkatkan kandungan gizi benih tanaman pangan pokok melalui pemuliaan konvensional, praktik agronomis, dan inovasi bioteknologi.

Mengingat prevalensi global kekurangan mikronutrien (sering disebut sebagai "kelaparan tersembunyi"), biofortifikasi menawarkan potensi besar dalam mengatasi masalah kesehatan terkait, terutama di wilayah berkembang di mana keragaman diet seringkali terbatas. Diperkirakan lebih dari dua miliar orang menderita kekurangan gizi, yang menyebabkan komplikasi kesehatan luas seperti gangguan kognitif, anemia, dan pertumbuhan terhambat, terutama akibat konsumsi yang tidak memadai dari mikronutrien esensial seperti besi, seng, dan vitamin A (Sheoran et al., 2022; Razzaq et al., 2021; Rai et al., 2024).

Salah satu manfaat utama biofortifikasi adalah fokus pada tanaman pangan pokok seperti beras, jagung, gandum, dan kacang-kacangan, yang menjadi dasar diet banyak populasi manusia. Tanaman yang telah dibiofortifikasi dengan konsentrasi mikronutrien tertentu yang ditingkatkan tidak hanya meningkatkan status gizi konsumen tetapi juga mengurangi ketergantungan pada suplemen mahal dan proses fortifikasi yang mungkin tidak layak di daerah miskin (Chakrabarty et al., 2024; Paul et al., 2024; Ceballos-Rasgado et al., 2023). Misalnya, upaya dalam pemuliaan jagung protein berkualitas atau *quality protein maize* (QPM) dan jagung yang diperkaya provitamin A telah menunjukkan dampak signifikan pada asupan diet komunitas pedesaan di wilayah di mana biji-bijian ini dikonsumsi secara luas (Prasanna et al., 2020; Virk et al., 2021; Birol et al., 2022; Stangoulis & Knez, 2022). Studi telah menyoroti integrasi yang sukses dari varietas kaya mikronutrien ke dalam sistem pertanian lokal, meningkatkan aksesibilitas nutrisi penting dalam komunitas tanpa memerlukan perubahan besar dalam kebiasaan diet (Siwela et al., 2020; Bachewe et al., 2023; Amagloh et al., 2023).

Biofortifikasi dapat dicapai melalui berbagai metode, masing-masing memiliki keunggulan tersendiri. Pemuliaan konvensional telah berperan penting dalam menciptakan varietas berproduksi tinggi dengan profil nutrisi yang lebih baik (Mandal et al., 2024). Contohnya, jagung dan kacang-kacangan dengan kandungan fitat rendah merupakan varietas menjanjikan yang meningkatkan ketersediaan mineral dengan mengurangi faktor anti-nutrisi yang menghambat penyerapan mineral (Raboy, 2020; Hummel et al., 2020). Biofortifikasi agronomis (di mana tanaman diperkaya dengan aplikasi nutrisi melalui tanah atau metode foliar) menawarkan respons cepat terhadap kekurangan mikronutrien dan dapat diintegrasikan ke dalam praktik pertanian yang ada untuk memberikan manfaat segera (Zevallos et al., 2024; Ghosh et al., 2022; Ahammed et al., 2025).

Kemajuan bioteknologi, termasuk rekayasa genetika dan teknologi CRISPR, juga menawarkan cara untuk menginduksi sifat nutrisi spesifik

langsung ke dalam tanaman. Hal ini berpotensi meningkatkan kandungan nutrisi dengan kecepatan yang jauh lebih cepat daripada pembiakan tradisional (Hirschi, 2020; Sayooj et al., 2025; Mulwa et al., 2022). Sebagai contoh, kacang-kacangan yang diperkaya nutrisi dengan kandungan besi dan seng yang lebih tinggi telah dikembangkan untuk menargetkan populasi yang rentan terhadap kekurangan nutrisi tersebut, menunjukkan efektivitas pendekatan transgenik dalam meningkatkan kualitas nutrisi tanaman pangan pokok (Izquierdo et al., 2024; Maishanu et al., 2020). Perpaduan antara bioteknologi dan nutrisi ini sangat penting karena mengatasi kebutuhan mendesak akan keamanan pangan yang lebih baik dan tujuan jangka panjang praktik pertanian berkelanjutan.

Aspek krusial biofortifikasi adalah bagaimana hal itu mempengaruhi keberlanjutan pertanian. Benih tanaman dengan kandungan fitat rendah tidak hanya meningkatkan ketersediaan nutrisi untuk konsumsi manusia tetapi juga memperbaiki pengelolaan fosfor di tanah, berkontribusi pada keberlanjutan lingkungan dalam praktik pertanian (Raboy, 2020; Mandal et al., 2024). Budidaya varietas biofortifikasi mendorong keanekaragaman hayati yang lebih besar selain meningkatkan kesehatan komunitas dan ketahanan ekonomi (Ashoka et al., 2023; Kachinski et al., 2020). Bukti menunjukkan bahwa mempromosikan tanaman biofortifikasi menghasilkan penerimaan yang lebih besar di kalangan petani dan konsumen seiring meningkatnya kesadaran tentang keamanan pangan dan gizi (Virk et al., 2021; Shohael et al., 2025; Amagloh et al., 2023).

10.2 Teknik Penguatan Kandungan Gizi

Malnutrisi global, terutama kekurangan mikronutrien, menimbulkan tantangan signifikan bagi kesehatan masyarakat, sehingga memerlukan pendekatan inovatif dalam pertanian untuk meningkatkan kandungan gizi tanaman pangan pokok. Bioteknologi, sebagai bidang interdisipliner, menawarkan berbagai teknik untuk meningkatkan hasil dan kualitas sumber pangan berbasis tanaman dengan meningkatkan kadar vitamin, mineral, dan proteinnya. Sub-bab ini membahas kemajuan terbaru dalam teknik bioteknologi yang bertujuan untuk biofortifikasi, dengan fokus pada perannya dalam meningkatkan nilai gizi benih tanaman.

1. Teknik Biofortifikasi

Biofortifikasi adalah strategi dasar yang melibatkan peningkatan kualitas gizi tanaman pangan melalui praktik agronomis, pemuliaan konvensional, dan bioteknologi modern. Tujuannya adalah

meningkatkan konsentrasi mikronutrien esensial seperti vitamin A, besi, dan seng pada bagian tanaman yang dapat dimakan untuk mengatasi kelaparan tersembunyi di kalangan populasi yang bergantung pada tanaman pangan pokok (Hirschi, 2020; Kaur et al., 2024). Di antara metode bioteknologi yang signifikan, modifikasi genetik dan teknik pemuliaan molekuler telah menunjukkan potensi yang luar biasa.

2. Rekayasa Genetika dan Pemuliaan Molekuler

Rekayasa genetika memungkinkan modifikasi presisi genom tanaman untuk memperkenalkan sifat-sifat seperti peningkatan penyerapan mineral dan sintesis protein yang lebih baik. Misalnya, peneliti telah berhasil mengembangkan varietas padi transgenik yang diperkaya dengan beta-karoten, prekursor vitamin A, untuk mengatasi masalah kekurangan vitamin A di banyak negara berkembang (Sisodiya, 2024). Demikian pula, kemajuan dalam pemuliaan molekuler tidak hanya memudahkan pemilihan sifat-sifat yang diinginkan melalui seleksi berbasis penanda, tetapi juga mempercepat identifikasi bahan genetik yang mengandung profil nutrisi tinggi (Anbarasan & Ramesh, 2022).

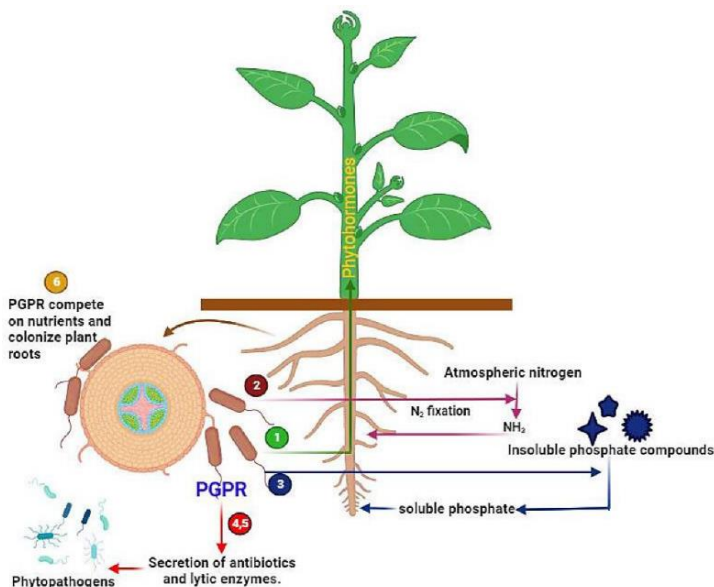
3. *Rhizobacteria* Pendorong Pertumbuhan Tanaman (PGPR)

Pemanfaatan PGPR (*Plant Growth Promoting Rhizobacteria*) merupakan pendekatan bioteknologi inovatif untuk meningkatkan kemampuan penyerapan nutrisi tanaman. Bakteri tanah ini bermanfaat untuk meningkatkan ketersediaan nutrisi esensial dengan cara melarutkannya, sehingga mendorong pertumbuhan tanaman dan meningkatkan kandungan nutrisi tanaman (Meraklı & Memon, 2020; Patel et al., 2020). Sebagai contoh, penelitian menunjukkan bahwa beberapa PGPR dapat secara signifikan meningkatkan ketersediaan besi pada tanaman, sehingga efektif mengatasi anemia defisiensi besi (Reis et al., 2024). Selain itu, fungsi PGPR menawarkan metode langsung dan tidak langsung untuk meningkatkan pertumbuhan tanaman dan mengendalikan patogen tanaman, produksi fitohormon, fiksasi N₂, pelarutan fosfat, produksi antibiotik, pelepasan enzim lisis, dan persaingan ruang dan nutrisi (Sundahri & Saputra, 2024; Saputra et al., 2024; Ansabayeva et al., 2025) seperti ditunjukkan pada Gambar 30.

4. CRISPR dan Pengeditan Genom

Aplikasi terbaru teknologi CRISPR (*Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats*) telah merevolusi bidang perbaikan tanaman

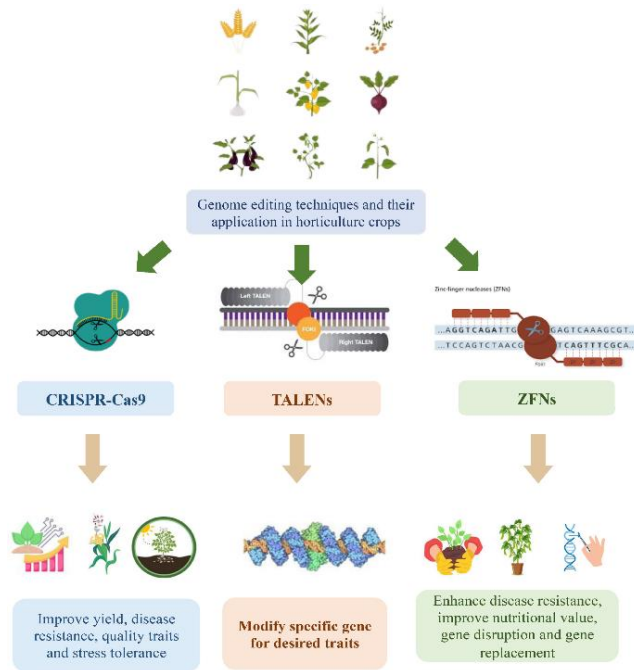
dengan memungkinkan pengeditan gen yang terkait dengan akumulasi nutrisi secara presisi (Das et al., 2024; Nandavaram, 2024). Dengan memanfaatkan genom editing ini, para ilmuwan dapat mempercepat peningkatan sifat-sifat seperti ketahanan terhadap penyakit, toleransi terhadap stres abiotik, peningkatan kandungan nutrisi dan potensi hasil (Daniel et al., 2023; Gautam & Verma, 2025). Dalam tinjauan ini, Daniel et al. (2023) mengkaji aplikasi, metodologi, dan potensi dampak alat penyuntingan genom, termasuk CRISPR-Cas9, TALEN, dan ZFN, pada tanaman hortikultura seperti ditunjukkan pada Gambar 30 dan Tabel 16.



Gambar 30. Fungsi PGPR (Sumber: Ansabayeva et al., 2025)

Teknologi pengeditan genom, khususnya CRISPR/Cas9, telah muncul sebagai alat transformatif dalam meningkatkan kualitas nutrisi tanaman. Dengan memodifikasi gen yang berkaitan dengan atribut nutrisi secara akurat, para peneliti dapat meningkatkan komposisi benih secara signifikan pada berbagai spesies. Misalnya, penyuntingan gen *FAD2* pada camelina telah menghasilkan peningkatan signifikan asam lemak tak jenuh tunggal, yang bermanfaat bagi kesehatan manusia (Lee et al., 2021). Demikian pula,

pendekatan CRISPR/Cas9 pada legum bertujuan untuk meningkatkan kandungan protein dan mengurangi faktor antinutrisi, sehingga mengatasi malnutrisi protein global (Bhowmik et al., 2021; Baloglu et al., 2022).



Gambar 31. Genom editing pada tanaman hortikultura

Kemajuan dalam penyuntingan genom telah memfasilitasi modifikasi kadar oligosakarida pada kedelai, meningkatkan daya cerna dan profil nutrisi, sehingga meningkatkan kualitas pasokan pangan secara keseluruhan (Le et al., 2020; Li et al., 2022). Penerapan teknik penyuntingan gen yang presisi ini memiliki potensi besar, tidak hanya untuk meningkatkan hasil panen tetapi juga untuk memperkaya tanaman pokok guna memenuhi kebutuhan nutrisi populasi yang terus bertambah (El-Mounadi et al., 2020). Secara keseluruhan, mengintegrasikan penyuntingan genom ke dalam praktik pertanian dapat membuka jalan bagi pilihan pangan yang lebih bergizi dan menyehatkan.

Tabel 16. Teknik penyuntingan genom dan penerapannya pada tanaman hortikultura (Sumber: Daniel et al., 2023)

Teknik Genom Editing	Deskripsi	Aplikasi pada Tanaman Hortikultura	Referensi
CRISPR-Cas9	Teknik serbaguna dan banyak digunakan untuk pengeditan DNA yang tepat	Meningkatkan hasil, ketahanan terhadap penyakit, sifat kualitas, dan toleransi terhadap stress	Bhagwat et al., 2022
TALEN	Nuklease efektor mirip dengan aktivator transkripsi untuk pengeditan yang ditargetkan	Memodifikasi gen tertentu untuk sifat yang diinginkan	Sun & Zhao, 2013
Nuklease Jari Seng (ZFNs)	Protein pengikat DNA yang direkayasa untuk penyuntingan gen yang ditargetkan	Meningkatkan ketahanan terhadap penyakit, meningkatkan nilai gizi, gangguan gen, dan penggantian gen	Khanzadi & Khan, 2020

5. Peningkatan Nutrisi pada Tanaman Tertentu

Berbagai tanaman telah menjadi sasaran peningkatan nutrisi melalui teknik bioteknologi, yang menghasilkan perbaikan signifikan dalam bidang kesehatan.

- a. **Legum:** Legum seperti kacang lentil telah menjalani biofortifikasi protein, di mana teknik molekuler digunakan untuk meningkatkan kandungan protein dan memperbaiki profil asam amino (Salaria et al., 2022). Hal ini sangat penting karena legum merupakan sumber protein utama dalam banyak diet di seluruh dunia.
- b. **Sereal:** Tanaman sereal seperti beras, gandum, dan jagung merupakan bahan pangan pokok yang vital. Intervensi bioteknologi berfokus pada peningkatan kandungan mineral pada tanaman ini. Misalnya, varietas beras kaya seng yang dikembangkan melalui biofortifikasi menunjukkan bagaimana pemuliaan tradisional dapat diintegrasikan dengan kemajuan bioteknologi untuk mengatasi tantangan malnutrisi global (Reddy et al., 2024; Kurdekar et al., 2023).
- c. **Sayuran:** Kemajuan dalam kualitas gizi sayuran juga signifikan. Strategi seperti menginduksi mikroorganisme yang melarutkan

unsur hara dalam tanah dapat secara signifikan meningkatkan kandungan mikronutrien pada bagian yang dapat dimakan, memperkuat perannya sebagai makanan yang mempromosikan kesehatan (Nagar et al., 2024; López- Rayo et al., 2023).

6. Dampak pada Kualitas Pasca Panen

Teknik bioteknologi tidak hanya meningkatkan kandungan gizi tanaman sebelum panen tetapi juga memperbaiki kualitas pascapanen, yang berdampak pada penyimpanan dan umur simpan. Teknik seperti aplikasi melatonin selama periode pascapanen telah diidentifikasi dapat menunda penuaan dan menjaga kualitas gizi tanaman, sehingga mempertahankan manfaat kesehatannya bagi konsumen (Aghdam et al., 2021; Corpas et al., 2020). Selain itu, peningkatan konsentrasi oksida nitrat telah terbukti membantu dalam menjaga indeks nutrisi buah-buahan pascapanen (Khan et al., 2023).

10.3 Peningkatan Senyawa Bioaktif dan Antioksidan

Dalam sub bab ini menekankan peran penting bioteknologi tanaman dalam meningkatkan produksi senyawa bioaktif, yang memiliki manfaat signifikan bagi kesehatan manusia, gizi, dan kedokteran. Fokus yang semakin besar pada pertanian berkelanjutan dan konsumen yang peduli kesehatan telah mendorong minat yang meningkat dalam memanfaatkan senyawa-senyawa ini secara efisien melalui inovasi bioteknologi.

1. Pentingnya Senyawa Bioaktif dalam Tanaman Obat

Senyawa bioaktif adalah metabolit sekunder yang diproduksi oleh tanaman, memainkan peran krusial dalam mekanisme pertahanan tanaman dan menawarkan manfaat terapeutik bagi manusia, termasuk sifat anti-inflamasi, antioksidan, dan antikanker (Mohaddab et al., 2022; Dogra & Kumar, 2023). Kemajuan terbaru dalam bioteknologi tumbuhan memungkinkan budidaya tanaman obat dalam lingkungan terkontrol, memungkinkan produsen untuk memanfaatkan potensi penuh tanaman tanpa menguras sumber daya alam (Mondo et al., 2020; Roy, 2020). Selain itu, dengan menggunakan teknik kultur jaringan, khususnya kultur akar berbulu, para peneliti berhasil meningkatkan secara signifikan produksi senyawa fitokimia berharga ini (Roy, 2020; Özyiğit et al., 2023).

2. Metode untuk Meningkatkan Senyawa Bioaktif

Beberapa strategi bioteknologi dapat diterapkan untuk meningkatkan produksi senyawa bioaktif. Kultur jaringan merupakan salah satu

metode paling umum, memungkinkan manipulasi kondisi pertumbuhan untuk meningkatkan biosintesis metabolit sekunder (Patel et al., 2022; Özyiğit et al., 2023). Selain itu, penggunaan elisitor seperti metil jasmonat dan asam salisilat telah terbukti dapat memicu respons stres pada tanaman, sehingga meningkatkan produksi metabolit berharga (Jeyasri et al., 2023; Alcalde et al., 2022). Selain itu, penggunaan sistem mikroalga telah muncul sebagai alternatif menjanjikan untuk produksi berkelanjutan senyawa bioaktif seperti vitamin dan antioksidan (Mondo et al., 2020; Puton et al., 2025).

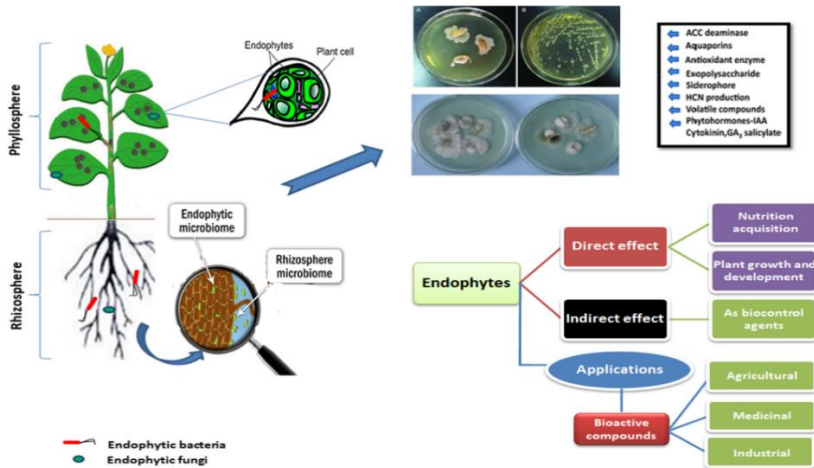
3. Pemanfaatan Sisa Tanaman dalam Bioteknologi

Pendekatan inovatif lainnya untuk meningkatkan senyawa bioaktif adalah melalui pemanfaatan limbah tanaman. Limbah ini seringkali mengandung sumber senyawa bioaktif bermanfaat yang dapat diekstraksi dan dimanfaatkan dalam industri makanan, farmasi, dan kosmetik (Tlais et al., 2020; Pawar et al., 2022). Misalnya, ekstraksi flavonoid dan senyawa fenolik dari limbah buah dan sayuran tidak hanya menawarkan solusi untuk pengurangan limbah tetapi juga menyediakan antioksidan berharga yang dapat berkontribusi pada kesehatan manusia (Tlais et al., 2020; Chávez-González et al., 2020). Pendekatan berkelanjutan ini menyoroti pentingnya mengintegrasikan bioteknologi tanaman dalam model ekonomi sirkular untuk meningkatkan keanekaragaman hayati dan mengurangi dampak lingkungan.

4. Peran Jamur Endofit

Jamur endofit yang hidup di dalam jaringan tanaman merupakan sumber yang belum dimanfaatkan sepenuhnya untuk senyawa bioaktif. Jamur ini dapat menghasilkan berbagai metabolit dengan potensi terapeutik, meningkatkan ketahanan tanaman terhadap stres lingkungan sambil juga menawarkan sumber baru untuk produk alami (Silva et al., 2022; Coertjens et al., 2023). Metode bioteknologi untuk membudidayakan endofit ini dapat membawa kemajuan signifikan dalam penemuan senyawa bioaktif baru (Coertjens et al., 2024; Coertjens et al., 2023). PGPR yang ditemukan di rizosfer dan filosfer, bersama dengan jamur mikoriza, dapat secara langsung merangsang pertumbuhan tanaman dengan meningkatkan penyerapan makronutrien dan mineral, serta meningkatkan kadar hormon vital. Selain itu, mereka juga dapat secara tidak langsung

mendorong pertumbuhan dengan mengurangi efek samping berbagai patogen (Anand et al., 2023) yang ditunjukkan pada Gambar 32.



Gambar 32. Interaksi antara jamur endofit dan PGPR

Integrasi teknik analitis canggih seperti metabolomik dan pembelajaran mesin di masa mendatang akan memfasilitasi prediksi dan optimasi produksi senyawa bioaktif pada tanaman yang dibudidayakan (García-Pérez et al., 2021; Ahmad et al., 2022). Penelitian lanjutan tentang modifikasi genetik dan rekayasa metabolik dapat lebih memperkuat budidaya senyawa bioaktif yang berasal dari sumber berkelanjutan (Ahmad et al., 2022; Coertjens et al., 2023). Seiring dengan peningkatan prioritas industri terhadap produk berbasis tanaman, pemanfaatan strategi bioteknologi ini akan menjadi esensial untuk memenuhi permintaan pasar sambil mempromosikan praktik lingkungan yang berkelanjutan.

10.4 Contoh Kasus: *Golden Rice* dan *Biofortified Maize*

Bioteknologi tanaman telah muncul sebagai bidang transformatif, terutama dalam mengatasi ketahanan pangan global dan kekurangan gizi. Melalui rekayasa genetika dan kemajuan bioteknologi modern, peneliti telah mengembangkan tanaman seperti *Golden Rice* (Beras Emas) dan jagung biofortifikasi, yang merespons peningkatan malnutrisi secara global.

Beras Emas merupakan contoh utama inovasi bioteknologi yang bertujuan untuk mengatasi defisiensi vitamin A atau vitamin A deficiency (VAD), masalah kesehatan utama di banyak negara berkembang. Beras ini dimodifikasi secara genetik untuk memproduksi beta-karoten, prekursor vitamin A, di endosperm butir beras. Pengantar sifat ini diakui berpotensi mengurangi secara signifikan masalah kesehatan terkait VAD, terutama pada anak-anak dan wanita hamil yang paling rentan (Kaur et al., 2024; Ye et al., 2022). Tanaman biofortifikasi ini, termasuk *Golden Rice*, secara efektif mentransfer pencapaian laboratorium menjadi hasil gizi yang lebih baik dalam pertanian (Kaur et al., 2024).

Untuk mencapai kemajuan ini, beberapa metode kunci telah digunakan, termasuk transformasi yang dimediasi *Agrobacterium*, yang memfasilitasi integrasi gen yang diinginkan ke dalam genom tanaman (Thompson et al., 2020). Metode ini dilengkapi dengan teknologi seperti CRISPR, yang memungkinkan modifikasi presisi dengan efek samping yang lebih sedikit (Zhang et al., 2021). Teknologi CRISPR telah menunjukkan potensi dalam mengembangkan tanaman yang tahan stres dan diperkaya nutrisi.

Varietas jagung yang diperkaya nutrisi juga telah dikembangkan melalui pendekatan bioteknologi serupa yang berfokus pada peningkatan kadar nutrisi esensial seperti seng dan besi, sehingga membantu mengatasi malnutrisi secara global (Kaur et al., 2024). Penelitian telah menunjukkan teknik untuk meningkatkan ketersediaan besi secara biologis melalui modifikasi genetik, meningkatkan aksesibilitas bagi mereka yang mengonsumsi benih tanaman ini (Kaur et al., 2024). Pengembangan ini menyoroti peran rekayasa genetika dalam meningkatkan produktivitas tanaman dan kualitas nutrisi.

Berbagai platform pengiriman telah berkembang untuk meningkatkan transformasi genetik pada tanaman. Sistem pengiriman gen yang dimediasi nanopartikel menawarkan metode baru untuk menembus dinding sel tanaman dan mengangkut materi genetik secara efektif (Yan et al., 2022; Wu et al., 2023). Pendekatan ini memungkinkan modifikasi bahkan pada spesies tanaman yang sulit dimodifikasi, memperluas potensi intervensi bioteknologi dalam perbaikan tanaman.

Meskipun telah ada kemajuan ini, tantangan tetap ada dalam adopsi dan persetujuan regulasi organisme transgenik atau *Genetically Modified Organisms* (GMOs) seperti Beras Emas dan jagung yang diperkaya nutrisi. Skeptisisme publik dan hambatan regulasi menghambat penggunaannya secara luas, sehingga memerlukan pendidikan dan advokasi berkelanjutan tentang manfaat bioteknologi dalam mengatasi ketahanan pangan global (Ortíz &

Sansinenea, 2023; Patil et al., 2025). Dampak ekologi potensial dari pengenalan GMOs ke lingkungan juga harus dievaluasi dengan cermat untuk memitigasi konsekuensi yang tidak diinginkan (Ortiz & Sansinenea, 2023).

10.5 Potensi dan Tantangan Biofortifikasi melalui Bioteknologi

Biofortifikasi adalah pendekatan inovatif yang bertujuan untuk meningkatkan kualitas gizi tanaman pangan melalui berbagai teknik, termasuk pemuliaan konvensional, praktik agronomis, dan metode bioteknologi modern. Pendekatan ini terutama menargetkan defisiensi mikronutrien, yang merupakan tantangan kesehatan global yang mempengaruhi lebih dari dua miliar orang. Kondisi ini sering disebut sebagai "kelaparan tersembunyi" (Sheoran et al., 2022; Srivastav et al., 2022). Penerapan strategis nutrisi esensial seperti besi, seng, selenium, dan vitamin A dan D ke dalam tanaman pangan pokok merupakan jalur kritis untuk meningkatkan kesehatan masyarakat, terutama di negara-negara berkembang di mana keragaman diet mungkin terbatas.

Kemajuan terbaru dalam bioteknologi telah menyediakan alat baru untuk biofortifikasi, secara signifikan meningkatkan efisiensi dan efektivitas peningkatan nutrisi. Rekayasa genetika, misalnya, telah memungkinkan modifikasi presisi pada tanaman untuk meningkatkan kandungan mikronutrientnya (Kaur et al., 2024; Kumar et al., 2024). Teknik seperti CRISPR-Cas9 memfasilitasi pengeditan gen yang ditargetkan untuk meningkatkan sifat-sifat terkait penyerapan dan akumulasi nutrisi, menghasilkan tanaman dengan profil nutrisi yang jauh lebih baik (Kaur et al., 2024). Selain itu, pendekatan transgenik telah berhasil menghasilkan tanaman biofortifikasi, seperti *Golden Rice*, yang diperkaya dengan vitamin A (Das et al., 2020).

Biofortifikasi agronomis tetap menjadi strategi komplementer, menggunakan aplikasi pupuk mikronutrien pada tanah dan daun untuk meningkatkan kandungan nutrisi pada bagian tanaman yang dapat dimakan. Metode ini terutama efektif dalam mengatasi defisiensi besi dan seng pada tanaman seperti padi, kacang-kacangan, dan gandum, menunjukkan peningkatan signifikan dalam kepadatan nutrisi benih (Rehman et al., 2020; Wang & Liu, 2025). Selain itu, integrasi praktik manajemen pertanian, seperti rotasi tanaman dan peningkatan kesehatan tanah, dapat meningkatkan ketersediaan nutrisi esensial ini bagi tanaman dan manusia (Teklu et al., 2023; Agyenim- Boateng et al., 2023).

Meskipun potensi biofortifikasi menjanjikan, beberapa tantangan tetap ada. Hambatan regulasi terkait organisme transgenik (GMOs) dapat menghambat adopsi dan implementasi solusi bioteknologi, menimbulkan skeptisisme dan resistensi publik (Kurdekar et al., 2023; Kamchen et al., 2023). Selain itu, faktor-faktor sosioekonomi, seperti akses petani terhadap benih biofortifikasi dan pengetahuan tentang praktik budidaya, juga memengaruhi adopsi teknologi biofortifikasi (Sakellariou & Mylona, 2020; Aparo et al., 2023). Evaluasi aspek sosial ekonomi tanaman biofortifikasi diperlukan untuk memastikan ketersediaan dan aksesibilitasnya bagi mereka yang membutuhkannya, sehingga mendukung perbaikan kesehatan yang adil dan merata (Dhaliwal et al., 2022).

Faktor lingkungan, seperti kesehatan tanah dan perubahan iklim, juga menimbulkan tantangan signifikan terhadap efektivitas biofortifikasi. Perbedaan komposisi tanah dapat memengaruhi ketersediaan dan penyerapan nutrisi, sehingga penting untuk menyesuaikan strategi biofortifikasi dengan kondisi lokal (Τσακίροπούλου et al., 2023; Mahida et al., 2023). Pemahaman komprehensif tentang interaksi antara tanah, tanaman, dan faktor lingkungan sangat penting untuk mengoptimalkan upaya biofortifikasi dan memastikan keberlanjutannya dalam jangka panjang (Bhardwaj et al., 2022).

DAFTAR PUSTAKA

- Aghdam, M., Mukherjee, S., Pardo, F., Arnao, M., Luo, Z., & Corpas, F. 2021. Functions of melatonin during postharvest of horticultural crops. *Plant and Cell Physiology*, 63(12), 1764-1786. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcab175>
- Agyenim-Boateng, K., Zhang, S., Shohag, M., Shaibu, A., Li, J., Li, B., ... & Sun, J. 2023. Folate biofortification in soybean: challenges and prospects. *Agronomy*, 13(1), 241. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010241>
- Ahammed, S., Rahim, R., & Hossain, M. 2025. Biofortification of potato tubers with zinc fertilizer through soil. *Asian Plant Research Journal*, 13(1), 23-36. <https://doi.org/10.9734/aprj/2025/v13i1290>
- Ahmad, A., Ahmad, N., Anis, M., Faisal, M., Alatar, A., Abdel-Salam, E., ... & Sivanesan, I. 2022. Biotechnological advances in pharmacognosy and in vitro manipulation of *Pterocarpus marsupium* Roxb. *Plants*, 11(3), 247. <https://doi.org/10.3390/plants11030247>
- Alcalde, M., Pérez-Matas, E., Escrich, A., Cusidó, R., Palazón, J., & Bonfill, M. 2022. Biotic elicitors in adventitious and hairy root cultures: a review from 2010 to 2022. *Molecules*, 27(16), 5253. <https://doi.org/10.3390/molecules27165253>
- Amagloh, F., Atuna, R., Akabanda, F., Pobi, N., Donkor, E., Koomson, G., ... & Amagloh, F. 2023. The potential of underutilised and biofortified grains, roots, and tubers in Ghana: a nutrition-sensitive approach for improved health. *Cab Reviews Perspectives in Agriculture Veterinary Science Nutrition and Natural Resources*. <https://doi.org/10.1079/cabireviews.2023.0027>
- Anand, U., Pal, T., Yadav, N. *et al.* (2023). Current Scenario and Future Prospects of Endophytic Microbes: Promising Candidates for Abiotic and Biotic Stress Management for Agricultural and Environmental Sustainability. *Microb Ecol* 86, 1455–1486. <https://doi.org/10.1007/s00248-023-02190-1>
- Anbarasan, S. and Ramesh, S. 2022. Advances in plant nutrition: enhancing crop yield and quality. *PSA*, 7(2), 9-13. <https://doi.org/10.51470/psa.2022.7.2.09>
- Ansabayeva, A., Makhambetov, M., Rebouh, N. Y., Abdelkader, M., Saady, H. S., Hassan, K. M., Nasser, M. A., Ali, M. A. A., & Ebrahim, M. (2025). Plant Growth-Promoting Microbes for Resilient Farming Systems: Mitigating Environmental Stressors and Boosting Crops Productivity –

- A Review. *Horticulturae*, 11(3), 260.
<https://doi.org/10.3390/horticulturae11030260>
- Aparo, N., Olum, S., Atimango, A., Odongo, W., Aloka, B., Ongeng, D., ... & Steur, H. 2023. Farmers' intention to adopt agronomic biofortification: the case of iodine biofortified vegetables in Uganda. *Horticulturae*, 9(3), 401. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9030401>
- Ashoka, P., Spandana, B., Saikanth, D., Kesarwani, A., Nain, M., Pandey, S., ... & Maurya, C. 2023. Bio-fortification and its impact on global health. *Journal of Experimental Agriculture International*, 45(10), 106-115. <https://doi.org/10.9734/jeai/2023/v45i102203>
- Bachewe, F., Genye, T., Girma, M., Samuel, A., Warner, J., & Zyl, C. 2023. Biofortification in ethiopia: opportunities and challenges. *Food and Nutrition Bulletin*, 44(3), 151-161. <https://doi.org/10.1177/03795721231188913>
- Baloğlu, M., Altunoğlu, Y., Baloglu, P., Yildiz, A., Türkölmez, N., & Çiftçi, Y. 2022. Gene-editing technologies and applications in legumes: progress, evolution, and future prospects. *Frontiers in Genetics*, 13. <https://doi.org/10.3389/fgene.2022.859437>
- Bhagwat, A.C.; Patil, A.M.; Saroj, S.D. 2022. CRISPR/Cas 9-Based Editing in the Production of Bioactive Molecules. *Mol. Biotechnol*, 64, 245–251. [10.1007/s12033-021-00418-4](https://doi.org/10.1007/s12033-021-00418-4)
- Bhardwaj, A., Chejara, S., Malik, K., Kumar, R., Kumar, A., & Yadav, R. 2022. Agronomic biofortification of food crops: an emerging opportunity for global food and nutritional security. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1055278>
- Bhowmik, P., Konkin, D., Polowick, P., Hodgins, C., Subedi, M., Xiang, D., ... & Kagale, S. 2021. Crispr/cas9 gene editing in legume crops: opportunities and challenges. *Legume Science*, 3(3). <https://doi.org/10.1002/leg3.96>
- Birol, E., Foley, J., Herrington, C., Misra, R., Mudyahoto, B., Pfeiffer, W., ... & Ilona, P. 2022. Transforming nigerian food systems through their backbones: lessons from a decade of staple crop biofortification programing. *Food and Nutrition Bulletin*, 44(1_suppl), S14-S26. <https://doi.org/10.1177/03795721221117361>
- Browne, S., Geraghty, A., & Corish, C. 2021. Advances in knowledge of screening practices and their use in clinical practice to prevent malnutrition. *Proceedings of the Nutrition Society*, 81(1), 41-48. <https://doi.org/10.1017/s0029665121003670>

- Carmona, E., Rojo, C., & Carmona, V. 2024. Nanomaterial-based biofortification: potential benefits and impacts of crops. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 72(43), 23645-23670. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c05079>
- Cate, D., Schoonhoven, L., Waal, G., Schuurmans, M., & Ettema, R. 2021. Hospital and home care nurses' experiences and perceptions regarding nutritional care for older adults to prevent and treat malnutrition: a cross-sectional study. *Journal of Clinical Nursing*, 30(13-14), 2079-2092. <https://doi.org/10.1111/jocn.15764>
- Ceballos-Rasgado, M., Ajmal, S., Mahboob, U., Ander, E., Zia, M., Morán, V., ... & Lowe, N. 2023. Farmers' and millers' experiences and attitudes towards the production and processing of zinc biofortified wheat in pakistan: a mixed methods study. *Frontiers in Nutrition*, 10. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1158156>
- Chakrabarty, S., Paul, D., & Ashokkumar, K. 2024. Key considerations during seed production of biofortified crop varieties. *J. Current Opinion Crop Sci.*, 5(4), 278-286. <https://doi.org/10.62773/jcocs.v5i4.292>
- Chávez-González, M., Sepúlveda, L., Verma, D., Luna-García, H., Rodríguez-Durán, L., Iliná, A., ... & Aguilar, C. 2020. Conventional and emerging extraction processes of flavonoids. *Processes*, 8(4), 434. <https://doi.org/10.3390/pr8040434>
- Coertjens, N., Santos, M., & Batiatote, M. 2023. Endophytic fungi: a natural source of bioactive compounds and biotechnological applications. *Fronteiras Journal of Social Technological and Environmental Science*, 12(3), 163-176. <https://doi.org/10.21664/2238-8869.2023v12i3.p163-176>
- Coertjens, N., Santos, M., & Batistote, M. 2024. Brazilian endophytic fungi: biotechnological potential in evidence. *Diversitas Journal*, 9(3). <https://doi.org/10.48017/dj.v9i3.2840>
- Corpas, F., González-Gordo, S., & Palma, J. 2020. Nitric oxide: a radical molecule with potential biotechnological applications in fruit ripening. *Journal of Biotechnology*, 324, 211-219. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2020.10.020>
- Correia, M., Castro, M., Toledo, D., Farah, D., Sansone, D., Andrade, T., ... & Fonseca, M. 2020. Nutrition therapy cost-effectiveness model indicating how nutrition may contribute to the efficiency and financial sustainability of the health systems. *Journal of Parenteral and Enteral Nutrition*, 45(7), 1542-1550. <https://doi.org/10.1002/jpen.2052>

- Dai, L., Li, W., Zheng, D., Wang, W., Xie, H., & Ma, J. 2022. Prevalence and management recommendations for disease-related malnutrition in chronic kidney disease patients with and without diabetes. *International Journal of Endocrinology*, 2022, 1-7. <https://doi.org/10.1155/2022/4419486>
- Daniel, M. A., Sebastin, R., Yu, J.-K., Soosaimanickam, M. P., & Chung, J. W. 2023. Enhancing Horticultural Crops through Genome Editing: Applications, Benefits, and Considerations. *Horticulturae*, 9(8), 884. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9080884>
- Das, P., Adak, S., & Majumder, A. 2020. Genetic manipulation for improved nutritional quality in rice. *Frontiers in Genetics*, 11. <https://doi.org/10.3389/fgene.2020.00776>
- Das, S., Kwon, M., & Kim, J. 2024. Enhancement of specialized metabolites using CRISPR/cas gene editing technology in medicinal plants. *Frontiers in Plant Science*, 15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1279738>
- Dewar, M., Dickinson, A., & Smeeton, N. 2020. Tracking and treating malnutrition: a retrospective observational study of the nutritional status of vulnerable people accessing a meals-on-wheels (mow) service. *Primary Health Care Research & Development*, 21. <https://doi.org/10.1017/s1463423620000195>
- Dhaliwal, S., Sharma, V., Shukla, A., Verma, V., Kaur, M., Shivay, Y., ... & Hossain, A. 2022. Biofortification—a frontier novel approach to enrich micronutrients in field crops to encounter the nutritional security. *Molecules*, 27(4), 1340. <https://doi.org/10.3390/molecules27041340>
- Dogra, A. and Kumar, J. 2023. Biosynthesis of anticancer phytochemical compounds and their chemistry. *Frontiers in Pharmacology*, 14. <https://doi.org/10.3389/fphar.2023.1136779>
- Eglseer, D., Hoedl, M., & Schoberer, D. 2020. Malnutrition risk and hospital-acquired falls in older adults: a cross-sectional, multicenter study. *Geriatrics and Gerontology International*, 20(4), 348-353. <https://doi.org/10.1111/ggi.13885>
- El-Mounadi, K., Morales-Floriano, M., & García-Ruiz, H. 2020. Principles, applications, and biosafety of plant genome editing using crispr-cas9. *Frontiers in Plant Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00056>
- Fatyga, P., Pac, A., Fedyk-Łukasik, M., Grodzicki, T., & Skalska, A. 2020. The relationship between malnutrition risk and inflammatory biomarkers in outpatient geriatric population. *European Geriatric Medicine*, 11(3), 383-391. <https://doi.org/10.1007/s41999-020-00303-4>

- García-Pérez, P., Zhang, L., Miras-Moreno, B., Lozano-Milo, E., Landín, M., Lucini, L., ... & Gallego, P. 2021. The combination of untargeted metabolomics and machine learning predicts the biosynthesis of phenolic compounds in bryophyllum medicinal plants (genus *kalanchoe*). *Plants*, 10(11), 2430. <https://doi.org/10.3390/plants10112430>
- Gautam, K. and Verma, S. 2025. Contributions of CRISPR and gene editing technologies to plant breeding and biotechnology: advances, integrative approaches, and future directions. *Quest Journals*, 11(7), 22-28. <https://doi.org/10.35629/9459-11072228>
- Gezimu, W., Demeke, A., & Duguma, A. 2022. Noma – a neglected disease of malnutrition and poor oral hygiene: a mini-review. *Sage Open Medicine*, 10. <https://doi.org/10.1177/20503121221098110>
- Ghosh, S., Bollinedi, H., Krishnan, S., Kundu, A., Singh, A., Bhowmick, P., ... & Singh, A. 2022. From farm to plate: spatio-temporal characterization revealed compositional changes and reduced retention of γ -oryzanol upon processing in rice. *Frontiers in Nutrition*, 9. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1040362>
- Gold, S., Rabinowitz, L., Manning, L., Keefer, L., Rivera-Carrero, W., Stanley, S., ... & Ungaro, R. 2022. High prevalence of malnutrition and micronutrient deficiencies in patients with inflammatory bowel disease early in disease course. *Inflammatory Bowel Diseases*, 29(3), 423-429. <https://doi.org/10.1093/ibd/izac102>
- Gomes, M., Martino, H., & Tako, E. 2021. Effects of iron and zinc biofortified foods on gut microbiota in vivo (*Gallus gallus*): a systematic review. *Nutrients*, 13(1), 189. <https://doi.org/10.3390/nu13010189>
- Gusdal, A., Johansson-Pajala, R., Arkkukangas, M., Ekholm, A., & Zander, V. 2021. Preventing falls and malnutrition among older adults in municipal residential care in Sweden: a registry study. *Sage Open Nursing*, 7. <https://doi.org/10.1177/23779608211026161>
- Hassan, S., Zeng, X., Khan, M., Farooq, M., Ali, A., Kumari, A., ... & Liaqat, A. 2022. Recent developments in physical invigoration techniques to develop sprouts of edible seeds as functional foods. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.997261>
- Hirschi, K. 2020. Genetically modified plants: nutritious, sustainable, yet underrated. *Journal of Nutrition*, 150(10), 2628-2634. <https://doi.org/10.1093/jn/nxaa220>

- Hummel, M., Talsma, E., Taleon, V., Londoño, L., Brychkova, G., Gallego-Castillo, S., ... & Spillane, C. 2020. Iron, zinc and phytic acid retention of biofortified, low phytic acid, and conventional bean varieties when preparing common household recipes. *Nutrients*, 12(3), 658. <https://doi.org/10.3390/nu12030658>
- Izquierdo, P., Sadohara, R., Wiesinger, J., Glahn, R., Urrea, C., & Cichy, K. 2024. Genome-wide association and genomic prediction for iron and zinc concentration and iron bioavailability in a collection of yellow dry beans. *Frontiers in Genetics*, 15. <https://doi.org/10.3389/fgene.2024.1330361>
- Jeyasri, R., Muthuramalingam, P., Kannan, K., Shin, H., Choi, S., & Ramesh, M. 2023. Methyl jasmonate and salicylic acid as powerful elicitors for enhancing the production of secondary metabolites in medicinal plants: an updated review. *Plant Cell Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 153(3), 447-458. <https://doi.org/10.1007/s11240-023-02485-8>
- Kachinski, W., Vidigal, J., & Ávila, F. 2020. Zinco no solo, na planta e a saúde humana: uma revisão. *Research Society and Development*, 9(7), e827973544. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i7.3544>
- Kamchen, C., Oliveira, F., Souza, T., Vieira, B., Telles, B., & Morzelle, M. 2023. Biofortification with selenium as an alternative to increase the total phenolic compounds in brassicas: a systematic review and meta-analysis. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 104(3), 1234-1243. <https://doi.org/10.1002/jsfa.13020>
- Kaur, K., Soni, K., Goyal, S., & Ashoka, P. 2024. Biotechnology in addressing malnutrition: biofortification and beyond. *FAB*, 5(1), 1-8. <https://doi.org/10.51470/fab.2024.5.1.01>
- Keawkim, K., Lorjaroenphon, Y., Vangnai, K., & Jom, K. 2021. Metabolite-flavor profile, phenolic content, and antioxidant activity changes in sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.) seeds during germination. *Foods*, 10(10), 2476. <https://doi.org/10.3390/foods10102476>
- Khan, M., Nazir, F., Maheshwari, C., Chopra, P., Chhillar, H., & Sreenivasulu, N. 2023. Mineral nutrients in plants under changing environments: a road to future food and nutrition security. *The Plant Genome*, 16(4). <https://doi.org/10.1002/tpg2.20362>
- Khanzadi, M.N.; Khan, A.A. 2020. CRISPR/Cas9: Nature's gift to prokaryotes and an auspicious tool in genome editing. *J. Basic Microb*, 60, 91–102. [10.1002/jobm.201900420](https://doi.org/10.1002/jobm.201900420)

- Kiran, A., Wakeel, A., Mahmood, K., Mubarak, R., & Haefele, S. 2022. Biofortification of staple crops to alleviate human malnutrition: contributions and potential in developing countries. *Agronomy*, 12(2), 452. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020452>
- Kumar, J., Saini, D., Kumar, A., Kumari, S., Gahlaut, V., Rahim, M., ... & Roy, J. 2024. Biofortification of triticum species: a stepping stone to combat malnutrition. *BMC Plant Biology*, 24(1). <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05161-x>
- Kupisz-Urbańska, M. and Marcinowska-Suchowierska, E. 2022. Malnutrition in older adults—effect on falls and fractures: a narrative review. *Nutrients*, 14(15), 3123. <https://doi.org/10.3390/nu14153123>
- Kurdekar, A., Banu, A., Das, H., Rani, K., Rana, S., Rai, S., ... & Pandey, S. 2023. A promising approach for addressing micronutrient deficiencies and enhancing nutritional quality in food crops through biofortification. *International Journal of Plant & Soil Science*, 35(18), 2127-2134. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2023/v35i183503>
- Le, H., Nguyen, N., Ta, D., Le, T., Bui, T., Le, N., ... & Hà, C. 2020. Crispr/cas9-mediated knockout of galactinol synthase-encoding genes reduces raffinose family oligosaccharide levels in soybean seeds. *Frontiers in Plant Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.612942>
- Lee, K., Jeon, I., Yu, H., Kim, S., Kim, H., Ahn, S., ... & Kim, H. 2021. Increasing monounsaturated fatty acid contents in hexaploid camelina sativa seed oil by FAD2 gene knockout using CRISPR-Cas9. *Frontiers in Plant Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.702930>
- Lestari, D. 2022. Upaya pencegahan risiko gizi buruk pada balita: literature review. *Jurnal Ilmiah Universitas Batanghari Jambi*, 22(1), 532. <https://doi.org/10.33087/jiubj.v22i1.1828>
- Li, C., Wang, Z., Ma, H., Liu, T., Ji, J., & Duan, K. 2022. Multiplex crispr/cas9-mediated raffinose synthase gene editing reduces raffinose family oligosaccharides in soybean. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1048967>
- Lindberg, L., Nhambongo, I., Nhampossa, T., Mungambe, K., & Priebe, G. 2021. A qualitative study of mothers' health literacy related to malnutrition in under 5-year-old children in southern mozambique. *Public Health Nutrition*, 25(7), 1947-1955. <https://doi.org/10.1017/s1368980021004365>
- Loda, I., D'Angelo, E., Marzetti, E., & Kerminen, H. 2024. Prevention, assessment, and management of malnutrition in older adults with early

- stages of cognitive disorders. *Nutrients*, 16(11), 1566.
<https://doi.org/10.3390/nu16111566>
- López-Rayó, S., Valverde, S., & Lucena, J. 2023. [s,s]-edds ligand as a soil solubilizer of fe, mn, zn, and cu to improve plant nutrition in deficient soils. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 71(25), 9728-9737.
<https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c02057>
- Mahida, A., Tandel, Y., Patel, D., & Kumar, M. 2023. Agronomic biofortification with zinc and iron to enhance nutrient concentrations in mango. *Environment Conservation Journal*, 24(4), 192-196.
<https://doi.org/10.36953/ecj.17432548>
- Maishanu, S., Umar, Y., Abdulsalami, M., Ibrahim, A., Chechet, G., & Ahmad, A. 2020. Biosafety baseline for african biofortified sorghum (abs188 and abs203) through feeding bioassay. *International Journal for Research in Applied Sciences and Biotechnology*, 7(5), 70-76.
<https://doi.org/10.31033/ijrasb.7.5.8>
- Mandal, O., Krishnamoorthi, A., Singh, A., Kaur, R., Kalaiselvi, P., Tiwari, U., ... & Mitra, M. 2024. Biofortification: enhancing nutritional content in crops through biotechnology and fighting climate change. *Journal of Advances in Biology & Biotechnology*, 27(2), 186-210.
<https://doi.org/10.9734/jabb/2024/v27i2710>
- Mao, Y., Wu, J., Liu, G., Yu, Y., Chen, B., Liu, J., ... & Wu, J. 2022. Chinese expert consensus on prevention and intervention for the elderly with malnutrition (2022). *Aging Medicine*, 5(3), 191-203.
<https://doi.org/10.1002/agm2.12226>
- Meraklı, N. and Memon, A. 2020. Bitki büyümesinde ve gelişiminde bitki büyümesini teşvik eden rizobakterinin (PGPR) rolü: toprak-bitki ilişkisi. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 8(12), 2590-2602.
<https://doi.org/10.24925/turjaf.v8i12.2590-2602.3785>
- Mohaddab, M., Goumi, Y., Gallo, M., Montesano, D., Zengin, G., Bouyahya, A., ... & Fakiri, M. 2022. Biotechnology and in vitro culture as an alternative system for secondary metabolite production. *Molecules*, 27(22), 8093. <https://doi.org/10.3390/molecules27228093>
- Molina-Molina, E., Garruti, G., Shanmugam, H., Palo, D., Grattagliano, I., Mastronuzzi, T., ... & Portincasa, P. 2020. Aging and nutrition. paving the way to better health. *Romanian Journal of Internal Medicine*, 58(2), 55-68.
<https://doi.org/10.2478/rjim-2020-0005>

- Mondo, A., Smerilli, A., Schepisi, E., Sansone, C., & Brunet, C. 2020. Challenging microalgal vitamins for human health. *Microbial Cell Factories*, 19(1). <https://doi.org/10.1186/s12934-020-01459-1>
- Mudgalkar, S., Avinashe, H., Dubey, N., & Darvhanekar, M. 2025. Biofortification strategies in millets for enhanced nutritional value: a comprehensive review. *Journal of Advances in Biology & Biotechnology*, 28(3), 1019-1030. <https://doi.org/10.9734/jabb/2025/v28i32159>
- Mulwa, C., Heck, S., Maru, J., Mwema, J., & Campos, H. 2022. Effect of nutrition awareness on utilization of orange fleshed sweetpotato among vulnerable populations in Kenya. *Food Security*, 15(2), 479-491. <https://doi.org/10.1007/s12571-022-01326-4>
- Mustafa, H., Munir, H., Farah, U., Arshad, A., Hasan, E., Zahra, F., ... & Laique, A. 2025. Enhancing global nutrition: biofortifying oilseed crops for sustainable health. *P. Bulletin*, 4(1), 72-87. <https://doi.org/10.55627/pbulletin.004.01.927>
- Nagar, B., Thakur, S., Goutam, P., Prajapati, P., Kumar, R., Kumar, S., ... & Kumar, A. 2024. The role of bio-fortification in enhancing the nutritional quality of vegetables: a review. *Advances in Research*, 25(4), 64-77. <https://doi.org/10.9734/air/2024/v25i41082>
- Nandavaram, J. 2024. CRISPR and microbial genomics in plant breeding. *PSR*, 5(2), 14-20. <https://doi.org/10.51470/psr.2024.05.02.14>
- Ortíz, A. and Sansinenea, E. 2023. Genetically modified plants based on bacillus genes and commercial bacillus-based biopesticides for sustainable agriculture. *Horticulturae*, 9(9), 963. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9090963>
- Özyiğit, İ., Doğan, İ., Hocaoglu-Özyiğit, A., Yalçın, B., Erdoğan, A., Yalçın, İ., ... & Kaya, Y. 2023. Production of secondary metabolites using tissue culture-based biotechnological applications. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1132555>
- Patel, P., Bhatt, S., Patel, H., & Saraf, M. 2020. Iron chelating bacteria: a carrier for biofortification and plant growth promotion. *JBS*, 3(3), 111-120. <https://doi.org/10.62400/jbs.v3i3.5309>
- Patel, P., Patel, V., Modi, A., Kumar, S., & Shukla, Y. 2022. Phyto-factories of anti-cancer compounds: a tissue culture perspective. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, 11(1). <https://doi.org/10.1186/s43088-022-00203-5>
- Patil, L., Patil, A., Patil, S., Sancheti, S., & Agrawal, V. 2025. Advancements in crop yield improvement through genetic engineering. *Current*

- Agriculture Research Journal*, 12(3), 1030-1046.
<https://doi.org/10.12944/carj.12.3.01>
- Patlán-Hernández, A., Stobaugh, H., Cumming, O., Angioletti, A., Pantchova, D., Lapègue, J., ... & N'Diaye, D. 2021. Water, sanitation and hygiene interventions and the prevention and treatment of childhood acute malnutrition: a systematic review. *Maternal and Child Nutrition*, 18(1). <https://doi.org/10.1111/mcn.13257>
- Paul, M., Thriveni, V., Niharika, M., Upadhyay, D., Kiro, D., Verma, A., ... & Patil, S. 2024. A review on biofortification of crops: a nutritional strategy for combating malnutrition. *European Journal of Nutrition & Food Safety*, 16(11), 63-77. <https://doi.org/10.9734/ejnfs/2024/v16i111577>
- Pawar, K., Sankpal, P., Patil, S., Patil, P., Pawar, A., & Shinde, P. 2022. Applications of gc-ms used in herbal plants. *Asian Journal of Pharmaceutical Analysis*, 53-55. <https://doi.org/10.52711/2231-5675.2022.00010>
- Prasanna, B., Palacios-Rojas, N., Hossain, F., Muthusamy, V., Menkir, A., Dhlwayo, T., ... & Fan, X. 2020. Molecular breeding for nutritionally enriched maize: status and prospects. *Frontiers in Genetics*, 10. <https://doi.org/10.3389/fgene.2019.01392>
- Puton, B., Oro, C., Bernardi, J., Finkler, D., Venquiaruto, L., Dallago, R., ... & Tres, M. 2025. Sustainable valorization of plant residues through enzymatic hydrolysis for the extraction of bioactive compounds: applications as functional ingredients in cosmetics. *Processes*, 13(5), 1314. <https://doi.org/10.3390/pr13051314>
- Raboy, V. 2020. Low phytic acid crops: observations based on four decades of research. *Plants*, 9(2), 140. <https://doi.org/10.3390/plants9020140>
- Rai, D., Chaudhary, C., Khatak, A., & Banyal, S. 2024. A sustainable approach to combat micronutrient deficiencies and ensure global food security through biofortification. *European Journal of Nutrition & Food Safety*, 16(4), 15-30. <https://doi.org/10.9734/ejnfs/2024/v16i41404>
- Razzaq, A., Tang, Y., & Qing, P. 2021. Towards sustainable diets: understanding the cognitive mechanism of consumer acceptance of biofortified foods and the role of nutrition information. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(3), 1175. <https://doi.org/10.3390/ijerph18031175>
- Reddy, B., Vijayreddy, D., Chandra, K., Emmi, S., Hegde, S., Majumder, B., ... & Kumar, D. 2024. A comprehensive review on biofortification in vegetable crops. *Journal of Advances in Biology & Biotechnology*, 27(8), 1448-1458. <https://doi.org/10.9734/jabb/2024/v27i81267>

- Rehman, A., Farooq, M., Ullah, A., Nadeem, F., Im, S., Park, S., ... & Lee, D. 2020. Agronomic biofortification of zinc in pakistan: status, benefits, and constraints. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.591722>
- Reis, G., Martínez-Burgos, W., Pozzan, R., Pastrana-Puche, Y., Ocán-Torres, D., Mota, P., ... & Soccol, C. 2024. Comprehensive review of microbial inoculants: agricultural applications, technology trends in patents, and regulatory frameworks. *Sustainability*, 16(19), 8720. <https://doi.org/10.3390/su1619872>
- Roy, A. 2020. Hairy root culture an alternative for bioactive compound production from medicinal plants. *Current Pharmaceutical Biotechnology*, 22(1), 136-149. <https://doi.org/10.2174/1389201021666201229110625>
- Sakellariou, M. and Mylona, P. 2020. New uses for traditional crops: the case of barley biofortification. *Agronomy*, 10(12), 1964. <https://doi.org/10.3390/agronomy10121964>
- Salaria, S., Boatwright, J., Thavarajah, P., Kumar, S., & Thavarajah, D. 2022. Protein biofortification in lentils (*lens culinaris medik.*) toward human health. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.869713>
- Saputra, M.W., Sari, V.K., Slameto, S., Setiawati, T.C., Wafa, A., Firmansyah, T. and Sundahri. 2024. Enhancing Vigor and Viability of Deteriorated True Shallot Seed by Matricconditioning Using Biofertilizer and Washed Rice Water, *Journal of Applied Agricultural Science and Technology*, 8(4), pp. 513-524. doi: 10.55043/jaast.v8i4.225
- Sayooj, M., Thakur, J., Prasad, D., Ponniyath, A., & Adithya, J. 2025. Biofortification in crops, recent approaches, challenges and future strategies: a review. *Plant Cell Biotechnology and Molecular Biology*, 26(7-8), 102-115. <https://doi.org/10.56557/pcbmb/2025/v26i7-89395>
- Sen, H., Kumar, A., & Janeja, H. 2024. Biofortification of major crops through conventional and modern biotechnological approaches to fight hidden hunger: an overview. *Journal of Advances in Biology & Biotechnology*, 27(7), 96-113. <https://doi.org/10.9734/jabb/2024/v27i7970>
- Sheoran, S., Kumar, S., Ramtekey, V., Kar, P., Meena, R., & Jangir, C. 2022. Current status and potential of biofortification to enhance crop nutritional quality: an overview. *Sustainability*, 14(6), 3301. <https://doi.org/10.3390/su14063301>
- Shivani, S., Sharma, K., Negi, S., Darkal, N., & Tutlani, A. 2025. Biotechnological advancements in seed quality enhancement: a

- comprehensive review. *Plant Cell Biotechnology and Molecular Biology*, 26(5-6), 33-44. <https://doi.org/10.56557/pcbmb/2025/v26i5-69283>
- Shohael, A., Kelly, J., Venkataraman, S., & Hefferon, K. 2025. Unlocking opportunities and overcoming challenges in genetically engineered biofortification. *Nutrients*, 17(3), 518. <https://doi.org/10.3390/nu17030518>
- Silva, S., Melo, B., Santos, M., Rios, R., Santos, C., Júnior, K., ... & Fraga, A. 2022. Endophytic fungi: benefits for plants and biotechnological potential. *Research Society and Development*, 11(4), e9211427008. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i4.27008>
- Sisodiya, A. 2024. Biotechnology's benefits to agriculture: increasing crop production and quality. *Current Research in Agriculture and Farming*, 5(4), 1-15. <https://doi.org/10.18782/2582-7146.215>
- Siwela, M., Pillay, K., Govender, L., Lottering, S., Mudau, F., Modi, A., ... & Mabhaudhi, T. 2020. Biofortified crops for combating hidden hunger in south africa: availability, acceptability, micronutrient retention and bioavailability. *Foods*, 9(6), 815. <https://doi.org/10.3390/foods9060815>
- Srivastav, P., Vutukuru, M., Gobinath, R., & Awad, M. 2022. Biofortification—present scenario, possibilities and challenges: a scientometric approach. *Sustainability*, 14(18), 11632. <https://doi.org/10.3390/su141811632>
- Stangoulis, J. and Knez, M. 2022. Biofortification of major crop plants with iron and zinc - achievements and future directions. *Plant and Soil*, 474(1-2), 57-76. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05330-7>
- Sun, N.; Zhao, H.M. 2013. Transcription activator-like effector nucleases (TALENs): A highly efficient and versatile tool for genome editing. *Biotechnol. Bioeng*, 110, 1811–1821. 10.1002/bit.24890
- Sundahri & Saputra, M.W. (2024). The Effect of Matriconditioning Enriched Biofertilizer and Washed Rice Water to Enhance Seed Germination, IAA Content and Seeding Growth on Shallot (*Allium cepa* L.). *HAYATI Journal of Biosciences*, 32(1), 1-11. <https://doi.org/10.4308/hjb.32.1.1-11>
- Teklu, D., Gashu, D., Joy, E., Amede, T., & Broadley, M. 2023. Effectiveness of agronomic biofortification strategy in fighting against hidden hunger. *Agronomy*, 13(8), 2173. <https://doi.org/10.3390/agronomy13082173>
- Thompson, M., Moore, W., Hummel, N., Pearson, A., Barnum, C., Scheller, H., ... & Shih, P. 2020. Agrobacterium tumefaciens: a bacterium primed for synthetic biology. *Biodesign Research*, 2020, 8189219. <https://doi.org/10.34133/2020/8189219>

- Tlais, A., Fiorino, G., Polo, A., Filannino, P., & Cagno, R. 2020. High-value compounds in fruit, vegetable and cereal byproducts: an overview of potential sustainable reuse and exploitation. *Molecules*, 25(13), 2987. <https://doi.org/10.3390/molecules25132987>
- Torre-Roche, R., Cantu, J., Tamez, C., Zuverza-Mena, N., Hamdi, H., Adisa, I., ... & White, J. 2020. Seed biofortification by engineered nanomaterials: a pathway to alleviate malnutrition? *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(44), 12189-12202. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c04881>
- Trollebø, M., Skeie, E., Revheim, I., Stangeland, H., Erstein, M., Grønning, M., ... & Dierkes, J. 2022. Comparison of nutritional risk screening with nrs2002 and the glim diagnostic criteria for malnutrition in hospitalized patients. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-23878-3>
- Virk, P., Andersson, M., Arcos, J., Govindaraj, M., & Pfeiffer, W. 2021. Transition from targeted breeding to mainstreaming of biofortification traits in crop improvement programs. *Frontiers in Plant Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.703990>
- Wang, K. and Liu, Z. 2025. Plant synthetic biology-based biofortification, strategies and recent progresses. *Journal of Integrative Plant Biology*, 67(8), 1997-2004. <https://doi.org/10.1111/jipb.13934>
- Wang, L., O'Conner, S., Tanvir, R., Zheng, W., Cothron, S., Towery, K., ... & Li, L. 2024. CRISPR/cas9-based editing of nf-yc4 promoters yields high-protein rice and soybean. *New Phytologist*, 245(5), 2103-2116. <https://doi.org/10.1111/nph.20141>
- Wong, A., Huang, Y., Sowa, P., Banks, M., & Bauer, J. 2020. Adult malnutrition, nutritional interventions and outcomes in singapore: a scoping review of local studies for the past 20 years. *Proceedings of Singapore Healthcare*, 30(3), 225-241. <https://doi.org/10.1177/2010105820964829>
- Wu, K., Xu, C., Li, T., Ma, H., Gong, J., Li, X., ... & Hu, X. 2023. Application of nanotechnology in plant genetic engineering. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(19), 14836. <https://doi.org/10.3390/ijms241914836>
- Yan, Y., Zhu, X., Yu, Y., Li, C., Zhang, Z., & Wang, F. 2022. Nanotechnology strategies for plant genetic engineering. *Advanced Materials*, 34(7). <https://doi.org/10.1002/adma.202106945>
- Yang, J., Wang, Y., Sun, J., Li, Y., Zhu, R., Yin, Y., ... & Qin, L. 2024. Metabolome and transcriptome association analysis reveals mechanism

- of synthesis of nutrient composition in quinoa (*chenopodium quinoa* willd.) seeds. *Foods*, 13(9), 1325.
<https://doi.org/10.3390/foods13091325>
- Ye, R., Yang, X., & Rao, Y. 2022. Genetic engineering technologies for improving crop yield and quality. *Agronomy*, 12(4), 759.
<https://doi.org/10.3390/agronomy12040759>
- Zevallos, S., Salas, E., Gutierrez, P., Burgos, G., Boeck, B., Mendes, T., ... & Lindqvist-Kreuze, H. 2024. Foliar zn application increases Zn content in biofortified potato. *Agriculture*, 14(12), 2186.
<https://doi.org/10.3390/agriculture14122186>
- Zhang, X., Jia, Q., Jia, X., Li, J., Sun, X., Min, L., ... & Zhao, J. 2024. brassica vegetables—an undervalued nutritional goldmine. *Horticulture Research*, 12(2). <https://doi.org/10.1093/hr/uhae302>
- Zhang, Y., Iaffaldano, B., & Qi, Y. 2021. CRISPR ribonucleoprotein-mediated genetic engineering in plants. *Plant Communications*, 2(2), 100168. <https://doi.org/10.1016/j.xplc.2021.100168>
- Τσακίρογλου, Ν., Bueno-Mota, G., Soriano, J., Arcillas, E., Arines, F., Yu, S., ... & Slamet-Loedin, I. 2023. Proof of concept and early development stage of market-oriented high iron and zinc rice expressing dicot ferritin and rice nicotianamine synthase genes. *Scientific Reports*, 13(1).
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-26854-z>

BAB 11

MANAJEMEN PRODUKSI BENIH DI INDUSTRI BIOTEKNOLOGI BENIH

Oleh: Ellok Dwi Sulichantini

11.1 Tahapan Produksi Benih Berbasis Bioteknologi

Produksi benih modern kini tidak lagi hanya berfokus pada praktik agronomi konvensional, melainkan telah bertransformasi menjadi sistem terpadu yang mengombinasikan bioteknologi molekuler, kultur jaringan, metode diagnostik cepat, teknologi peningkatan kualitas benih, serta sistem digital untuk menjamin mutu dan ketelusuran (*traceability*) (Kumar, 2024). Pendekatan berbasis bioteknologi ini memungkinkan percepatan proses pemuliaan, peningkatan kemurnian genetik, pencegahan penyebaran patogen, dan pengawasan kualitas yang jauh lebih akurat dibandingkan metode tradisional, sehingga menghasilkan benih unggul yang lebih stabil dan terpercaya di tingkat petani (Kumar, 2024). Dalam konteks industri, integrasi berbagai teknologi tersebut mengubah seluruh tahapan produksi benih mulai dari akuisisi bahan induk hingga pengemasan dan distribusi menjadi kegiatan yang tersertifikasi, terdokumentasi secara digital, dan diawasi menggunakan data genotipe serta fenotipe. Transformasi ini memerlukan dukungan infrastruktur, sumber daya manusia terlatih, serta regulasi dan standar pengujian yang selaras antarnegara (Alemu, 2024).

Tahapan produksi benih berbasis bioteknologi secara umum mencakup: (1) perolehan dan pengelolaan bahan induk (*breeder seed*), (2) perbanyakan awal (*foundation seed increase* termasuk kultur jaringan), (3) peningkatan volume produksi (*seed increase*), (4) panen dan pengolahan pascapanen, (5) penerapan pengawasan mutu molekuler (QA/QC), (6) teknologi peningkatan mutu benih (*seed enhancement*), (7) penyimpanan dan transportasi berbasis pemantauan digital, serta (8) sertifikasi dan komersialisasi produk akhir (Alemu, 2024). Setiap tahapan memerlukan pemahaman mendalam mengenai penerapan bioteknologi, parameter kualitas, serta tantangan implementasi di lapangan.

1. Perolehan dan Pengelolaan Bahan Induk (*Breeder Seed*)

Tahap pertama dalam sistem produksi benih adalah memastikan tersedianya bahan induk berkualitas tinggi atau *breeder seed*, yang menjadi sumber kemurnian genetik bagi seluruh rantai produksi

selanjutnya. Benih induk ini idealnya berasal dari program pemuliaan tanaman yang telah terverifikasi performanya di berbagai lokasi dan diuji identitas genetiknya menggunakan marka molekuler seperti SNP atau SSR (Kumar, 2024). Teknik *genotyping* semacam ini kini menjadi prosedur baku untuk memastikan bahwa identitas varietas tetap terjaga sebelum benih disebarkan ke fasilitas produksi. Selain verifikasi genetik, tahap pengelolaan *breeder seed* juga melibatkan pengujian kesehatan benih untuk mendeteksi keberadaan virus, bakteri, atau jamur laten yang berpotensi menurunkan mutu di tahap berikutnya. Penggunaan teknologi diagnostik seperti qPCR, digital PCR, maupun NGS memungkinkan deteksi dini dengan sensitivitas tinggi, sehingga penyebaran patogen melalui benih dapat dicegah secara efektif (Delmiglio et al., 2023). Produksi *breeder seed* pada jenis tanaman vegetatif atau yang sulit diperbanyak secara generatif, sering menggunakan teknik kultur meristem yang dikombinasikan dengan terapi panas (*thermotherapy*) dan uji molekuler untuk memperoleh stok induk bebas patogen (Jácome Sarchi et al., 2025). Selain aspek teknis, pengelolaan bahan induk juga perlu memperhatikan kepatuhan terhadap kebijakan akses dan pembagian manfaat (*Access and Benefit Sharing/ABS*) sesuai Protokol Nagoya. Dokumentasi asal-usul plasma nutfah dan perjanjian pemanfaatannya penting dilakukan sejak tahap awal untuk menghindari kendala hukum dalam proses komersialisasi (Colella, 2023).

2. Perbanyak Awal: Kultur Jaringan dan *Foundation Seed Increase*

Setelah *breeder seed* diverifikasi, tahap berikutnya adalah perbanyak awal untuk menghasilkan *foundation seed* atau peningkatan awal populasi. Proses ini dapat dilakukan di fasilitas lapangan atau secara *in vitro* tergantung pada spesies dan metode perbanyak yang digunakan. Kultur jaringan (*micropropagation*) memegang peranan penting untuk tanaman hortikultura dan tanaman yang diperbanyak secara vegetatif, karena mampu menghasilkan tanaman dalam jumlah besar yang seragam dan bebas dari patogen (Choudhary et al., 2023). Tahapan kultur jaringan meliputi inisiasi eksplan, proliferasi, perakaran, dan aklimatisasi *plantlet*, dengan pengawasan ketat terhadap kondisi sterilitas dan pemeriksaan genetik di setiap batch. Inovasi seperti penggunaan bioreaktor, kultur suspensi dan sistem otomatisasi pipet mampu menurunkan biaya produksi sehingga

teknologi ini lebih ekonomis untuk skala besar (Sota, 2025). Aplikasi *foundation seed increase* untuk tanaman yang diperbanyak melalui biji, dilakukan di kebun induk dengan penerapan isolasi spasial dan temporal untuk mencegah kontaminasi silang. Penggunaan marka molekuler juga sangat membantu dalam mengidentifikasi *off-type* lebih dini, bahkan sebelum tanda morfologis muncul (Alemu, 2024). Seluruh batch *foundation seed* dicatat secara digital, mencakup data asal, hasil pengujian molekuler, serta status kesehatannya. Catatan ini diperlukan untuk audit sertifikasi dan sistem penelusuran mutu (Kumar, 2024).

3. Penerapan Genomik pada Seleksi Induk dan *Seed Increase* (MAS & GS)

Teknologi genomik seperti *marker-assisted selection* (MAS) dan *genomic selection* (GS) kini menjadi bagian penting dalam sistem produksi benih modern. MAS membantu pemulia memilih tanaman induk yang memiliki gen unggul tertentu, misalnya gen ketahanan terhadap penyakit, sehingga sifat tersebut dapat dipertahankan selama proses perbanyakan (Kumar et al., 2024). Sementara itu, GS menggunakan ribuan marka genomik untuk memperkirakan nilai pemuliaan genetik secara keseluruhan. Dengan memanfaatkan GS, program benih dapat memilih kombinasi parental yang paling optimal sejak awal, memperpendek siklus pemuliaan, serta meningkatkan efisiensi dan kestabilan genetik antar lingkungan (Alemu, 2024). Implementasi kedua pendekatan ini memerlukan dukungan fasilitas *genotyping*, pipeline bioinformatika, serta database fenotip yang terstandar. Banyak perusahaan memilih bekerja sama dengan penyedia layanan *genotyping-as-a-service* untuk mempercepat proses (Kumar et al., 2024). Selain untuk pemuliaan, data genomik juga dimanfaatkan dalam sistem QA, seperti pemantauan kemurnian varietas menggunakan panel SNP ringkas yang efisien untuk mendeteksi kontaminasi genetik (Alemu, 2024).

4. Manajemen Kesehatan Benih: Diagnostik Molekuler dan Surveillance

Kualitas kesehatan benih merupakan faktor kunci dalam menjamin keamanan dan produktivitas tanaman. Dengan kemajuan teknologi diagnostik seperti qPCR, LAMP, digital PCR, serta pendekatan metagenomik berbasis NGS, kemampuan mendeteksi patogen kini jauh lebih sensitif bahkan pada tingkat sangat rendah (Delmiglio et

al., 2023). Teknologi portabel seperti LAMP dan qPCR lapangan telah memungkinkan pengujian langsung di lokasi produksi, memberikan hasil cepat untuk pengambilan keputusan, seperti karantina atau penundaan proses (Feddema, 2024). Selain itu, NGS digunakan untuk mendeteksi patogen baru yang belum teridentifikasi dengan metode PCR konvensional, meskipun analisis data memerlukan keterampilan bioinformatika untuk menghindari hasil positif palsu (Delmiglio et al., 2023). Integrasi sistem diagnostik ke dalam perangkat lunak manajemen mutu dan *traceability* digital (misalnya ERP) memudahkan pelacakan dan pengambilan tindakan otomatis terhadap batch yang dicurigai terkontaminasi (Feddema, 2024). Dengan demikian, risiko distribusi benih tidak sehat ke pasar dapat diminimalkan secara signifikan.

5. Produksi Massal (*Seed Increase*): Kebun Induk dan Praktik Agronomi Modern

Tahap produksi massal melibatkan pembentukan kebun induk, pengaturan isolasi, serta penerapan praktik agronomi presisi untuk memperoleh benih dalam jumlah besar tanpa mengurangi kemurnian genetik. Teknik isolasi spasial dan temporal diterapkan untuk menghindari kontaminasi silang antar varietas, sedangkan sistem sensor dan *Internet of Things* (IoT) digunakan untuk memantau kelembapan tanah, suhu, dan kondisi tanaman secara real-time (Patel et al., 2022). Informasi tersebut memungkinkan intervensi presisi seperti pengairan adaptif dan pengendalian hama berbasis ambang batas, yang membantu mempertahankan kondisi fisiologis optimal selama pembentukan biji (Kumar, 2024). Dalam produksi benih hibrida, sistem sterilitas jantan sitoplasmik (*cytoplasmic male sterility/ CMS*) atau teknik *detasseling* mekanik sering digunakan untuk menjamin tingkat kemurnian genetik di atas 99% (Wang et al., 2025). Semua kegiatan agronomi pada tahap ini harus memenuhi persyaratan sertifikasi benih nasional maupun internasional. Inspeksi lapangan berkala dan dokumentasi digital yang lengkap menjadi dasar agar hasil produksi dapat dikategorikan sebagai *foundation* atau *certified seed* (Patel et al., 2022).

6. Panen, Pascapanen, dan Teknologi Pengolahan Benih

Panen dilakukan ketika benih mencapai kematangan fisiologis optimum, karena kesalahan waktu panen dapat mengurangi viabilitas dan daya kecambah. Proses pascapanen modern mencakup

pengeringan terkendali menggunakan udara terdehumidifikasi, pemantauan kadar air digital, serta pengolahan fisik seperti pembersihan, pemisahan, dan *optical sorting* (Pedrosa et al., 2024). Teknologi *hyperspectral imaging* berbasis kecerdasan buatan (AI) kini mampu mengidentifikasi benih berdasarkan ukuran, warna, dan bahkan prediksi vigor internal, tanpa merusak benih tersebut (Zhao et al., 2023). Pada tahap ini, benih juga dapat menjalani *seed enhancement* melalui pelapisan mikroba PGPR, penambahan nutrisi, atau *priming* untuk mempercepat perkecambahan. Formulasi *bio-coating* harus diuji stabilitasnya agar tidak menurun selama penyimpanan (Singh et al., 2022). Kemasan modern dengan *barrier film* dan sensor pintar (indikator suhu/kelembapan) kini digunakan untuk memantau kondisi benih selama transportasi. Pelabelan digital dan QR-based traceability memperkuat sistem pengawasan mutu serta mempermudah proses sertifikasi (Pedrosa et al., 2024).

7. Kontrol Mutu (QA/QC) Berbasis Molekuler dan Statistik Sampling

Sistem *Quality Assurance* (QA) dan *Quality Control* (QC) dalam produksi benih modern kini mengintegrasikan pendekatan statistik tradisional dengan teknologi molekuler canggih. Metode sampling klasik yang biasa digunakan untuk menilai *germination rate* dan *purity* kini dilengkapi dengan pengujian molekuler yang lebih sensitif guna mendeteksi patogen serta memastikan kemurnian genetik dan kesesuaian varietas (*trueness to type*) (Mishra et al., 2024). Desain sampling harus mempertimbangkan ukuran lot dan tingkat heterogenitas antar batch, sehingga hasil analisis benar-benar merepresentasikan kualitas keseluruhan benih yang diproduksi. Teknik molekuler seperti *quantitative PCR* (qPCR), *digital PCR* (dPCR), dan *loop-mediated isothermal amplification* (LAMP) telah diterapkan di berbagai titik kritis sepanjang proses produksi termasuk pada tahap *breeder stock screening*, *foundation seed verification*, serta pra-pengolahan dan pra-ekspor. Pendekatan ini memungkinkan pengambilan keputusan cepat terkait *release*, *retest*, atau *downgrade* suatu batch berdasarkan data yang kuat dan dapat diandalkan (Delmiglio et al., 2023).

Penerapan *Next-Generation Sequencing* (NGS) dalam pengawasan mutu juga meningkat, namun menuntut adanya standar validasi, batas deteksi yang disepakati, serta uji profisiensi lintas laboratorium.

Harmonisasi metodologi pengujian dan penerapan sistem akreditasi seperti ISO/IEC 17025 menjadi penting untuk menjamin konsistensi interpretasi hasil antarnegara dan lembaga (Munkvold, 2024). Integrasi hasil QC ke dalam sistem *Enterprise Resource Planning* (ERP) dan *digital traceability* memfasilitasi penyimpanan catatan secara otomatis dan penerbitan sertifikat elektronik, yang pada gilirannya mempercepat perdagangan benih lintas batas. Pendigitalan data QC juga memungkinkan analisis tren kualitas serta penerapan prinsip *continuous improvement* berbasis data (Ahuja et al., 2024).

8. **Seed Enhancement: Priming, Coating, dan Formulasi Biologis**

Konsep seed enhancement mencakup berbagai perlakuan fisik, kimia, maupun biologis yang bertujuan meningkatkan daya tumbuh (*seed vigor*) dan keberhasilan pembentukan tanaman di lapangan. Teknik priming fisiologis seperti *hydropriming*, *osmopriming*, dan *hormonal priming* telah terbukti mempercepat proses perkecambahan sekaligus meningkatkan toleransi terhadap stres lingkungan (Hussain et al., 2021). Sementara itu, *bio-coating* yang mengandung mikroorganisme menguntungkan seperti *Bacillus* atau *Trichoderma* mampu meningkatkan perlindungan awal terhadap patogen tanah dan memperkuat sistem perakaran. Inovasi *nano-delivery systems* dan *encapsulation* juga dikembangkan untuk memberikan pelepasan terkendali nutrisi atau pestisida selama fase awal perkecambahan (Li et al., 2021). Walaupun menjanjikan, penerapan teknologi nano pada benih masih menghadapi tantangan dalam aspek keamanan lingkungan serta regulasi, yang memerlukan evaluasi komprehensif sebelum digunakan secara luas (Li et al., 2021). Implementasi *seed enhancement* dalam skala industri memerlukan uji stabilitas (*shelf-life*), kajian efek terhadap dormansi, serta integrasi dengan sistem pengemasan dan distribusi agar mutu benih tetap optimal hingga sampai ke pengguna akhir (Singh et al., 2022). Selain itu, setiap formulasi harus memenuhi standar regulasi negara tujuan pemasaran, termasuk persyaratan toksikologi dan kompatibilitas biologis bahan yang digunakan.

9. **Penyimpanan, Cold Chain, dan Monitoring Kondisi dengan IoT**

Mutu benih yang stabil sangat bergantung pada pengendalian kelembapan dan suhu selama penyimpanan. Teknologi gudang berpengatur iklim (HVAC), sistem pengering (*desiccant system*), dan

sensor *Internet of Things* (IoT) kini digunakan untuk pemantauan real-time terhadap kondisi penyimpanan. Bila terjadi deviasi dari rentang optimal, sistem dapat memberikan peringatan dini agar tindakan korektif segera dilakukan (Yang et al., 2024). Beberapa jenis benih hortikultura atau bahan kultur jaringan yang sensitif, keberadaan ***cold chain*** menjadi keharusan meskipun investasi awalnya relatif tinggi. Penggunaan rantai dingin ini layak secara ekonomi terutama bila nilai produk tinggi atau benih sangat rentan terhadap degradasi suhu (Kumar, 2024). Pencatatan digital terhadap kondisi penyimpanan memungkinkan analisis umur simpan aktual berdasarkan data historis, yang membantu produsen menentukan *date-marking* lebih akurat daripada pendekatan konservatif. Dengan demikian, potensi kerugian akibat pemborosan dapat dikurangi, sementara kepuasan pelanggan meningkat (Ahuja et al., 2024).

10. **Traceability Digital dan Sertifikasi Elektronik**

Konsep *traceability end-to-end* dari tahap *parental lines* hingga titik distribusi ke petani menjadi elemen penting dalam sistem produksi benih modern. Teknologi *blockchain* semakin banyak diadopsi untuk menciptakan *ledger* yang tidak dapat diubah (*immutable*) dan mencatat setiap tahapan produksi serta hasil pengujian QC (Li et al., 2023). Penggunaan kode QR atau barcode yang terhubung ke database ERP memungkinkan petani dan pembeli memverifikasi asal-usul batch benih dengan cepat. Selain itu, penerapan sertifikat elektronik mempercepat proses ekspor dan membantu memenuhi standar internasional seperti OECD *Seed Schemes* dan ISTA. Sistem digital semacam ini tidak hanya meningkatkan transparansi tetapi juga berfungsi sebagai alat pemasaran dengan memberikan nilai tambah pada produk—misalnya untuk label *certified seed*, *non-GMO*, atau varietas hasil *genome editing* (Ahuja et al., 2024). Tantangan utama implementasinya meliputi interoperabilitas antar sistem, perlindungan data kepemilikan intelektual (IP), dan biaya adopsi bagi produsen kecil. Solusi berbasis kolaborasi seperti *shared-cost model* dan *platform services* diusulkan untuk mengatasi kendala ini (Pang & Li, 2024).

11. **Sertifikasi, Regulasi, dan Pengiriman ke Pasar**

Sebelum benih dipasarkan, produk wajib memenuhi persyaratan sertifikasi nasional dan internasional yang ditetapkan oleh lembaga seperti ISTA dan OECD, serta ketentuan *phytosanitary* dari

IPPC/ISPM. Dokumen pendukung seperti hasil uji molekuler, catatan asal-usul, dan sertifikat fitosanitari harus tersedia untuk memperlancar ekspor ke pasar tujuan (IPPC/FAO, 2023). Proses perizinan untuk varietas hasil rekayasa genom (*genome editing*) maupun transgenik harus direncanakan sejak tahap awal pengembangan. Otoritas regulasi umumnya menuntut data terkait *off-target effects*, komposisi genetik akhir, serta hasil uji agronomi di lapangan (Zhang et al., 2023). Perbedaan kebijakan antarnegara mengenai produk bioteknologi masih menjadi risiko komersial yang signifikan, sehingga perusahaan perlu mengantisipasi dengan strategi *risk mapping* dan diversifikasi pasar. Strategi pemasaran yang efektif mencakup segmentasi pengguna (petani besar vs kecil), penentuan harga kompetitif, *bundling* layanan seperti dukungan teknis, serta pelaksanaan *field demonstration programs* untuk mempercepat adopsi varietas baru. Kolaborasi erat antara tim R&D dan pemasaran memastikan bahwa klaim agronomis didukung oleh bukti lapangan yang kredibel (Kumar, 2024).

12. Komersialisasi, Monitoring Pasca-Penjualan, dan *Feedback Loop* R&D

Tahapan komersialisasi varietas benih tidak berhenti pada peluncuran produk. Pemantauan pasca-penjualan melalui umpan balik petani dan uji performa lapangan menjadi elemen penting untuk menyempurnakan proses produksi dan pengembangan varietas berikutnya (Zhao et al., 2023). Data lapangan yang dikumpulkan melalui aplikasi digital memungkinkan penyesuaian model *genomic selection* (GS) serta penyempurnaan rekomendasi agronomis berbasis bukti nyata. Mekanisme *feedback loop* yang efektif juga membantu mendeteksi potensi masalah mutu yang mungkin lolos saat QC, sehingga memungkinkan penarikan produk (*recall*) dengan cepat jika diperlukan (Ahuja et al., 2024). Aspek etika dalam komersialisasi tidak kalah penting. Produsen benih wajib menyampaikan informasi secara transparan mengenai karakteristik varietas, syarat penggunaan, serta hak petani agar tidak menimbulkan ketimpangan sosial akibat eksklusif teknologi. Pendekatan ini menekankan keseimbangan antara inovasi bioteknologi dan tanggung jawab sosial industri benih (Colella, 2023).

13. Sinergi Tahapan dan Tantangan Implementasi

Proses produksi benih berbasis bioteknologi merupakan sistem yang kompleks dan terintegrasi, di mana berbagai disiplin ilmu mulai dari biologi molekuler, teknologi kultur jaringan, hingga digitalisasi rantai pasok—berkolaborasi untuk menghasilkan benih bermutu tinggi yang dapat diakses oleh petani. Integrasi antar-tahapan tersebut mencakup aspek penelitian genetik, produksi di lapangan, pengolahan pascapanen, serta sistem pelacakan digital guna menjamin mutu dan keamanan produk akhir (Munkvold, 2024). Keberhasilan implementasi sistem ini sangat dipengaruhi oleh kesiapan infrastruktur teknologi, kompetensi sumber daya manusia, keseragaman regulasi lintas negara, serta model bisnis yang mampu mengakomodasi berbagai skala pelaku usaha agar dampak positif inovasi bioteknologi dapat dirasakan secara luas.

Transformasi dalam sistem produksi benih menawarkan berbagai peluang strategis bagi industri pertanian, seperti percepatan program pemuliaan tanaman, peningkatan reliabilitas mutu, serta jaminan keterlacakan (*traceability*) sepanjang rantai produksi. Namun, di sisi lain, implementasi bioteknologi juga menghadirkan tantangan yang tidak sedikit, di antaranya adalah tingginya biaya investasi awal, kebutuhan pengelolaan data berskala besar (*big data management*), serta ketidakharmonisan dalam standar pengujian molekuler dan kebijakan regulasi yang mengatur *genome editing* (Kumar, 2024). Untuk itu, strategi adopsi yang bertahap dengan pendekatan kolaboratif antara sektor publik dan swasta, serta investasi berkelanjutan dalam peningkatan kapasitas SDM menjadi kunci utama dalam mentransformasikan potensi bioteknologi menjadi sistem produksi benih yang aman, efisien, dan berkelanjutan secara ekonomi maupun sosial.

11.2 *Good Manufacturing Practices* (GMP) dalam Produksi Benih Berbasis Bioteknologi

Good Manufacturing Practices (GMP) merupakan sistem manajemen mutu fundamental yang digunakan untuk menjamin konsistensi, keamanan, dan kualitas produk sepanjang seluruh tahapan proses produksi, termasuk dalam industri benih berbasis bioteknologi. GMP berfungsi sebagai kerangka kerja yang mengatur seluruh aspek produksi mulai dari seleksi bahan genetik, pengembangan kultur jaringan, formulasi media, proses perbanyakan, hingga

tahap akhir berupa pengemasan dan distribusi benih agar semuanya berlangsung sesuai standar mutu internasional (Zhou et al., 2022). Selain menjamin mutu, GMP juga memiliki peran penting dalam memastikan keamanan biologis (*biosafety*), mencegah terjadinya kontaminasi silang antar varietas atau organisme hasil rekayasa genetik, serta menjaga stabilitas genetik tanaman hasil bioteknologi. Regulasi global seperti FAO *Seed Quality Management System* dan OECD *Seed Schemes* telah mengintegrasikan prinsip-prinsip GMP dalam kerangka pengawasan mutu dan sertifikasi benih hasil kultur jaringan maupun transgenik (FAO, 2021).

Peningkatan permintaan pasar terhadap benih bioteknologi dengan karakter unggul—seperti ketahanan terhadap penyakit, efisiensi pemanfaatan nutrisi, serta toleransi terhadap stres abiotik—mendorong perusahaan benih untuk menerapkan sistem GMP yang lebih ketat, terdigitalisasi, dan berorientasi pada transparansi data (Singh & Sharma, 2023). Dengan demikian, GMP dalam industri benih modern tidak hanya diposisikan sebagai alat kepatuhan regulatif, tetapi juga sebagai instrumen strategis untuk memperkuat reputasi perusahaan, kepercayaan konsumen, serta keberlanjutan bisnis di era pertanian presisi.

11.2.1 Konsep Dasar GMP dalam Industri Benih

Secara prinsip, *Good Manufacturing Practices* mencakup seperangkat prosedur, regulasi, dan prinsip manajemen mutu yang mengatur seluruh aspek proses produksi meliputi desain fasilitas, kompetensi personel, kelayakan peralatan, pengendalian bahan baku, serta sistem dokumentasi yang transparan dan dapat diaudit (Kumar et al., 2021). Dalam industri benih, GMP mengacu pada pedoman internasional seperti ISO 9001:2015, FAO *Seed Quality Standards*, serta OECD *Guidelines for Biotechnology*, yang menekankan pentingnya *traceability*, validasi proses produksi, dan pencegahan risiko kontaminasi genetik antar varietas.

Penerapan GMP pada produksi benih bioteknologi berfokus pada empat komponen utama:

1. Kontrol fasilitas dan lingkungan produksi, mencakup pengaturan suhu, kelembapan, sistem ventilasi, serta kebersihan ruang produksi untuk mencegah kontaminasi fisik maupun biologis.
2. Standarisasi proses kultur dan rekayasa genetik, memastikan setiap langkah teknis seperti induksi kalus, transformasi genetik, dan regenerasi tanaman dilakukan berdasarkan *standard operating procedures* (SOP) yang tervalidasi.

3. Pengujian mutu dan stabilitas genetik, meliputi uji morfologi, uji ekspresi gen, hingga deteksi kontaminan menggunakan teknik molekuler seperti PCR dan sequencing (Thompson et al., 2022).
4. Sistem dokumentasi dan audit internal, mendukung keterlacakan setiap batch produksi dan menjadi dasar evaluasi berkelanjutan terhadap efektivitas penerapan GMP.

Laboratorium dan fasilitas produksi benih hasil rekayasa genetik umumnya diklasifikasikan dalam *biosafety level-2* (BSL-2), yang mensyaratkan sistem filtrasi udara menggunakan High-Efficiency Particulate Air (HEPA), kontrol akses ketat, serta penerapan protokol dekontaminasi limbah biologis (Wang et al., 2023). Dengan penerapan sistem ini, GMP berfungsi tidak hanya sebagai pengendali mutu fisik dan fisiologis benih, tetapi juga menjamin integritas molekuler tanaman bioteknologi. Aspek ini mencakup stabilitas gen yang disisipkan, ekspresi protein target, serta konsistensi fenotipe yang dihasilkan dari proses rekayasa genetik (Li et al., 2021). Penerapan GMP menjadi landasan penting untuk menjamin bahwa inovasi bioteknologi dalam industri benih tidak hanya menghasilkan produk unggul secara agronomis, tetapi juga aman dan dapat diterima oleh regulasi serta pasar global.

11.2.2 Tahapan Implementasi GMP pada Produksi Benih Bioteknologi

1. Pengendalian Bahan Baku

Langkah awal dalam penerapan *Good Manufacturing Practices* (GMP) pada produksi benih bioteknologi dimulai dengan pengawasan ketat terhadap mutu bahan baku yang digunakan. Komponen utama seperti bahan genetik (DNA, plasmid, atau vektor), media kultur, dan berbagai reagen kimia wajib memenuhi standar mutu yang telah ditentukan serta disertai dokumen *Certificate of Analysis* (CoA) untuk menjamin kesesuaian spesifikasinya (Rao & Kiran, 2021). Dalam industri bioteknologi benih, verifikasi bahan genetik menjadi aspek kritis karena penggunaan DNA yang terkontaminasi atau plasmid non-target dapat mengganggu keberhasilan proses transformasi genetik (Zhang et al., 2024).

Laboratorium produksi juga diharuskan mengimplementasikan *Good Laboratory Practices* (GLP) untuk memastikan keakuratan hasil analisis genetik seperti *polymerase chain reaction* (PCR), *DNA sequencing*, maupun *Southern blotting*. Setiap batch DNA yang akan digunakan untuk proses transformasi harus melalui tahap validasi untuk menilai stabilitas serta memastikan identitas gen target sebelum diaplikasikan pada

sistem kultur tanaman (Chen et al., 2020). Dengan demikian, kontrol mutu bahan baku berfungsi tidak hanya untuk menjamin konsistensi hasil, tetapi juga mencegah risiko kesalahan genetik pada tahap awal produksi.

2. Pengendalian Proses Produksi

Tahapan produksi benih bioteknologi mencakup serangkaian proses mulai dari induksi kalus, transformasi genetik, regenerasi tanaman, aklimatisasi, hingga pembentukan benih dasar. Penerapan prinsip GMP pada fase ini berfokus pada validasi dan pengawasan menyeluruh terhadap seluruh aktivitas laboratorium (Kumar et al., 2022). Proses kultur jaringan harus divalidasi untuk memastikan tingkat sterilitas yang tinggi dan efisiensi regenerasi tanaman yang optimal. Kondisi lingkungan seperti suhu, kelembaban relatif, pH media, serta intensitas cahaya juga harus dikontrol secara ketat menggunakan sensor dan sistem pemantauan berkelanjutan. Fasilitas seperti *cleanroom* dan *laminar airflow cabinet* menjadi wajib untuk mencegah kontaminasi mikroorganisme selama manipulasi jaringan tanaman (Rizwan et al., 2021). Selain itu, inovasi berbasis *Internet of Things* (IoT) telah mulai diterapkan di fasilitas bioteknologi modern. Teknologi sensor digital dan sistem otomasi memungkinkan pemantauan kondisi ruang laboratorium secara real-time, sementara data yang dikumpulkan langsung dikirim ke pusat kendali mutu untuk analisis dan pengambilan keputusan cepat (Ali et al., 2023). Integrasi otomasi ini tidak hanya meningkatkan efisiensi proses, tetapi juga memperkuat penerapan GMP melalui sistem yang transparan dan dapat diaudit.

3. Pengendalian Fasilitas dan Peralatan

Desain fasilitas produksi benih berbasis bioteknologi harus mempertimbangkan pencegahan risiko kontaminasi silang antara spesies atau varietas yang berbeda. Setiap zona kerja dalam fasilitas harus dipisahkan secara fungsional, misalnya antara ruang transformasi genetik, ruang regenerasi tanaman, dan area penyimpanan benih dasar (FAO, 2021). Seluruh peralatan produksi seperti autoklaf, inkubator, tangki kultur, serta *biosafety cabinet* wajib menjalani validasi kinerja dan kalibrasi rutin untuk menjamin keakuratan dan konsistensi hasil eksperimen. Pandey dan Singh (2022) menekankan bahwa standar desain fasilitas GMP mencakup penerapan sistem pengelolaan limbah biologis yang aman, pemantauan suhu dan kelembaban ruang, serta kontrol akses berbasis biometrik bagi personel yang terlibat. Prinsip

tata letak satu arah (*one-way flow*) juga sangat penting diterapkan, di mana aliran material dan personel harus mengikuti arah tunggal dari area bersih menuju area kotor tanpa ada lintasan balik. Desain seperti ini bertujuan untuk mengurangi peluang masuknya kontaminan ke area produksi utama serta memastikan keamanan biologis (*biosafety*) dalam setiap tahap kegiatan laboratorium.

4. Pengujian dan Validasi Produk

Tahapan pengujian merupakan komponen esensial dalam sistem GMP karena berfungsi memastikan bahwa benih yang dihasilkan memenuhi standar mutu internasional. Pengujian mencakup analisis mutu fisik (kadar air, ukuran dan bentuk benih), mutu fisiologis (daya kecambah dan viabilitas), serta mutu genetik melalui teknik molekuler seperti *quantitative PCR* (qPCR) dan *enzyme-linked immunosorbent assay* (ELISA) (Sharma et al., 2023). Validasi genetik dilakukan untuk memastikan bahwa sifat genetik hasil transformasi tetap stabil dan tidak mengalami perubahan ekspresi yang tidak diinginkan selama regenerasi maupun pembiakan generasi berikutnya (Luo et al., 2022). Prosedur ini mengacu pada standar *International Seed Testing Association* (ISTA) dan pedoman *OECD Seed Schemes*. Selain memastikan ekspresi gen target yang tepat, pengujian juga dilakukan untuk mendeteksi kemungkinan efek *off-target* pada genom tanaman. Semua data hasil uji harus dicatat secara sistematis dalam dokumen *batch record* sehingga setiap anomali mutu dapat dilacak sumbernya secara cepat. Pendekatan ini mencerminkan prinsip dasar GMP, yakni keterlacakan (*traceability*) dan transparansi dalam seluruh proses produksi.

5. Dokumentasi dan Audit Internal

Dokumentasi merupakan elemen fundamental dalam penerapan GMP karena berperan sebagai bukti tertulis bahwa seluruh prosedur telah dijalankan sesuai dengan standar operasional yang berlaku (Khan et al., 2020). Setiap aktivitas, mulai dari sterilisasi alat, persiapan media kultur, hingga hasil pengujian laboratorium, wajib dicatat secara rinci dalam *Batch Production Record* (BPR). Audit internal dilakukan secara berkala untuk menilai tingkat kepatuhan terhadap SOP dan mengevaluasi efektivitas sistem manajemen mutu. Saat ini, banyak perusahaan benih telah mengadopsi sistem audit digital atau *e-audit*, yang memungkinkan verifikasi data dan pelaporan dilakukan secara daring untuk meningkatkan efisiensi, keamanan, dan akurasi dokumentasi (Rahman et al., 2023). Hasil audit menjadi dasar bagi

tindakan korektif dan preventif (CAPA), serta digunakan dalam peninjauan manajemen guna memperkuat sistem mutu yang berkelanjutan. Dengan pendekatan berbasis bukti dan transparansi data, industri benih bioteknologi dapat mempertahankan konsistensi mutu produk sekaligus memenuhi tuntutan regulasi global.

11.2.3 Integrasi GMP dengan Sistem Manajemen Mutu Lain

Penerapan GMP dalam industri benih bioteknologi umumnya diintegrasikan dengan sistem manajemen mutu lainnya seperti ISO 9001, ISO 17025, serta *Good Agricultural Practices* (GAP). Integrasi tersebut menciptakan pendekatan yang menyeluruh dari tahap laboratorium hingga distribusi akhir produk benih (Ali et al., 2023). Kombinasi GMP dengan ISO 9001 menjamin adanya sistem dokumentasi dan kontrol proses yang kuat, sementara ISO 17025 memastikan keandalan metode uji laboratorium. GAP di sisi lain berperan pada tahapan budidaya di lapangan, menjamin keamanan dan kebersihan lingkungan produksi benih. Sharma dan Gupta (2024) menegaskan bahwa sinergi antara GMP dan GAP mampu menciptakan rantai pasok benih yang berkelanjutan. GAP memastikan praktik agronomi ramah lingkungan dan higienis, sementara GMP menjaga konsistensi dan keamanan hasil akhir benih secara molekuler. Integrasi ini mencerminkan paradigma baru dalam industri benih global yang menekankan keberlanjutan, ketertelusuran, serta kepercayaan konsumen terhadap produk berbasis bioteknologi.

11.2.4 Digitalisasi dan GMP 4.0

Konsep *Good Manufacturing Practices* (GMP) 4.0 lahir sebagai bentuk adaptasi terhadap revolusi industri digital yang telah memengaruhi hampir seluruh sektor, termasuk industri benih modern. GMP 4.0 memadukan prinsip dasar manajemen mutu dengan kemajuan teknologi digital untuk menciptakan sistem pengawasan dan kendali mutu yang lebih efisien, transparan, dan responsif (Rana et al., 2022). Teknologi seperti *big data analytics*, *blockchain*, serta *artificial intelligence* (AI) kini menjadi bagian integral dari sistem mutu di industri benih berbasis bioteknologi. Implementasi *blockchain* dalam GMP 4.0 memungkinkan setiap tahapan produksi mulai dari kultur jaringan, pembentukan benih dasar, hingga distribusi akhir — dapat ditelusuri secara real-time. Sistem berbasis *blockchain* memastikan setiap batch benih memiliki *digital footprint* yang unik, sehingga integritas data, transparansi rantai pasok, serta pencegahan pemalsuan benih dapat dijaga dengan lebih

baik (Wang et al., 2023). Hal ini sangat penting bagi produsen global yang menghadapi isu pemalsuan dan pencurian varietas unggul di pasar internasional. Sementara itu, kecerdasan buatan (AI) dimanfaatkan untuk melakukan analisis prediktif terhadap pola data mutu dan mendeteksi potensi penyimpangan dalam proses produksi sebelum menimbulkan cacat produk (Thompson et al., 2022). Misalnya, sistem AI dapat mengenali anomali dalam data suhu, pH, atau kelembapan kultur jaringan yang berisiko mengganggu regenerasi tanaman. Pendekatan berbasis data ini memperkuat aspek *preventive quality assurance* dalam GMP, menggantikan sistem manual yang sering kali bersifat reaktif.

Digitalisasi GMP tidak hanya meningkatkan efisiensi, tetapi juga mendukung agenda keberlanjutan (*sustainability*). Sistem dokumentasi elektronik mengurangi penggunaan kertas, mempercepat pelaporan audit, dan meminimalkan kesalahan administratif. Selain itu, integrasi dengan sistem energi cerdas (*smart energy systems*) memungkinkan fasilitas produksi mengoptimalkan penggunaan sumber daya, sehingga menekan emisi karbon dan biaya operasional (Rana et al., 2022). Dengan demikian, GMP 4.0 tidak hanya menjadi alat manajemen mutu, tetapi juga strategi transformatif menuju industri benih yang ramah lingkungan dan adaptif terhadap era digital.

11.2.5 Tantangan Implementasi GMP di Negara Berkembang

Meskipun manfaat GMP telah diakui secara luas, penerapannya di negara berkembang masih menghadapi berbagai hambatan struktural dan teknis. Tantangan utama meliputi keterbatasan infrastruktur laboratorium yang memadai, kekurangan tenaga ahli bersertifikasi, serta tingginya biaya yang diperlukan untuk proses validasi, kalibrasi peralatan, dan sertifikasi internasional (Rizwan et al., 2021). Kondisi ini sering kali menyebabkan produsen benih lokal kesulitan memenuhi standar yang dipersyaratkan oleh lembaga seperti OECD atau FAO, sehingga daya saing ekspor benih bioteknologi masih rendah (FAO, 2021).

Rao dan Kiran (2021) menekankan pentingnya dukungan kebijakan publik untuk memperkuat penerapan GMP di negara berkembang. Pemerintah perlu berperan aktif melalui subsidi biaya sertifikasi, pembangunan fasilitas laboratorium terstandar, dan penyediaan pelatihan teknis berkelanjutan bagi tenaga kerja di sektor benih. Inisiatif seperti *seed technology incubators* atau *public-private partnerships* juga dapat menjadi strategi efektif untuk mempercepat adopsi praktik GMP, khususnya pada perusahaan benih skala menengah dan kecil.

Implementasi GMP bukan hanya soal pemenuhan regulasi, tetapi juga investasi jangka panjang dalam reputasi dan kredibilitas industri benih. Ketika sistem mutu dijalankan dengan baik, produk benih akan memiliki konsistensi performa di lapangan, yang pada akhirnya meningkatkan kepercayaan petani, lembaga sertifikasi, serta mitra dagang internasional. Di era bioteknologi pertanian modern, kredibilitas tersebut menjadi aset kompetitif yang menentukan posisi industri benih suatu negara di pasar global (Rana et al., 2022).

Integrasi GMP dengan sistem manajemen mutu lain seperti ISO 9001, ISO 17025, dan *Good Agricultural Practices* (GAP) juga menjadi arah strategis dalam menghadapi tantangan industri modern. Pendekatan multi-sistem ini menciptakan jaminan mutu yang menyeluruh, mulai dari tahap laboratorium hingga distribusi produk akhir (Ali et al., 2023). Dengan dukungan kebijakan dan pelatihan berkelanjutan, GMP dapat menjadi fondasi kuat bagi transformasi industri benih menuju sistem produksi yang inovatif, efisien, dan berdaya saing tinggi di tingkat global.

11.3 Standarisasi dan Kendali Mutu

11.3.1 Pentingnya Standarisasi dalam Produksi Benih

Standarisasi dan kendali mutu merupakan dua komponen utama dalam sistem produksi benih modern karena keduanya menjamin konsistensi, keamanan, dan keandalan produk yang dihasilkan. Bagi petani, regulator, dan pasar internasional, keberadaan standar teknis yang terukur menjadi dasar dalam memastikan bahwa benih memenuhi spesifikasi genetik, fisiologis, dan fitosanitari yang diharapkan (ISTA, 2024). Dalam konteks bioteknologi, dimana metode seperti kultur jaringan, seleksi genomik (*genomic selection*), pengujian molekuler, dan penyuntingan genom (*genome editing*) semakin umum digunakan, standarisasi proses menjadi semakin penting (Munkvold, 2024). Tanpa adanya protokol teknis yang seragam, hasil pengujian dapat bervariasi antar laboratorium, yang berpotensi menimbulkan ketidakkonsistenan mutu dan hambatan dalam perdagangan benih lintas negara. Standarisasi dalam industri benih meliputi berbagai aspek, mulai dari pengujian mutu (viabilitas, kadar air, kemurnian varietal), protokol pengambilan sampel (*sampling*), metode diagnostik, hingga akreditasi laboratorium (ISTA, 2024).

Standardisasi juga mencakup tata kelola data dan format pelabelan produk agar informasi yang disampaikan kepada pengguna akhir bersifat transparan dan dapat dibandingkan antar wilayah (Thijssen et al., 2025). Protokol yang terdokumentasi dengan baik melalui *Standard Operating*

Procedures (SOP) membantu menjamin bahwa setiap uji laboratorium bersifat replikatif dan hasilnya diakui secara internasional. Pentingnya standarisasi juga berkaitan erat dengan adopsi teknologi digital dan sistem penelusuran (*traceability*) berbasis *blockchain* untuk memastikan keterlacakan asal-usul dan proses produksi benih (Li et al., 2023). Dengan penerapan sistem ini, setiap tahapan mulai dari pembenihan, sterilisasi, pengujian genetik, hingga distribusi dapat dimonitor secara real time, sehingga meningkatkan kepercayaan konsumen dan meminimalkan risiko pemalsuan benih (Nguyen et al., 2025).

Standarisasi fondasi utama dalam menjamin integritas sistem perbenihan global. Tanpa standarisasi yang kuat, hasil penelitian bioteknologi unggul berpotensi kehilangan nilai komersialnya akibat ketidaksamaan hasil pengujian antar negara. Pengembangan sistem QA/QC berbasis standar internasional prasyarat utama untuk meningkatkan daya saing dan keberlanjutan industri benih di era pertanian presisi (Rahman et al., 2023). Checklist standarisasi dan QA/QC dalam produksi benih bioteknologi dapat dilihat pada Tabel 17.

Tabel 17. Checklist Standarisasi dan QA/QC dalam Produksi Benih Bioteknologi

Komponen / Tahapan Produksi	SOP Wajib (Standar Prosedur Operasional)	Frekuensi Uji / Monitoring	Parameter yang Diuji / Target	Metode Analisis / Alat	Cut-off / Ambang Batas	Referensi (Nama & Tahun)
1. Persiapan Media & Bahan Kultur	Sterilisasi media (autoclave 121°C, 15 psi, 20 menit); validasi pH 5.6–5.8 sebelum inokulasi	Setiap batch media baru	Sterilitas, pH, volume media	pH meter, uji plating mikroba	Tidak ada pertumbuhan mikroba (0 CFU)	Li et al. (2023); Sharma et al. (2024)
2. Ruang Aseptik (<i>Laminar Air Flow / Clean Room</i>)	Validasi HEPA filter; monitoring partikel udara; uji mikrobiologi udara & permukaan	Harian & mingguan	Jumlah mikroba udara (CFU/m ³) dan permukaan (CFU/cm ²)	Air sampler, settle plate	< 5 CFU/m ³ udara; < 1 CFU/cm ² permukaan	Mekonnen et al. (2022); Singh et al. (2021)
3. Inokulasi dan Subkultur	Penggunaan alat steril; dokumentasi batch; operator menggunakan APD lengkap	Setiap sesi inokulasi	Kontaminasi silang antar kultur	Inspeksi visual; PCR patogen umum	Tidak ada amplifikasi DNA patogen	Nguyen et al. (2025)
4. Kultur In Vitro (Pertumbuhan Eksplan)	Pemantauan suhu, cahaya, kelembaban; dokumentasi pertumbuhan	Harian	Rasio kontaminasi (%) per batch	Visual dan mikroskopik	< 2% kontaminasi total	Li et al. (2023); Sharma et al. (2024)

Komponen / Tahapan Produksi	SOP Wajib (Standar Prosedur Operasional)	Frekuensi Uji / Monitoring	Parameter yang Diuji / Target	Metode Analisis / Alat	Cut-off / Ambang Batas	Referensi (Nama & Tahun)
5. Regenerasi / Aklimatisasi	Sterilisasi substrat; penggunaan fungsida ringan; kontrol kelembaban rumah kaca	Setiap batch aklimatisasi	Kelangsungan hidup planlet (%)	Visual survival rate	≥ 95% planlet hidup	Singh et al. (2021); Mekonnen et al. (2022)
6. Pengujian Identitas Genetik (True-to-type Test)	Verifikasi DNA dengan marker SSR atau SNP; cross-check dengan parental lines	Setiap generasi seed lot baru	Kemurnian genetik (%)	PCR / qPCR genotipik	≥ 98% kemurnian genetik	Sharma et al. (2024); Chen et al. (2023)
7. Uji Patogen Benih (Seed Health Test)	Deteksi virus, bakteri, dan jamur seed-borne (ELISA/qPCR/LAMP)	Setiap batch sebelum packaging	Virus X, Bakteri Y, Fungi Z	qPCR, LAMP	Ct ≥ 35 (negatif); Ct ≤ 30 (positif)	Li et al. (2023); Nguyen et al. (2025)
8. Pengujian Viabilitas & Daya Kecambah	Uji daya kecambah dan vigor benih; analisis kelembaban	Setiap 3 bulan (sampai kadaluarsa)	% kecambah normal, vigor indeks	Germination test, tetrazolium	≥ 85% daya kecambah	Mekonnen et al. (2022); Singh et al. (2021)

Komponen / Tahapan Produksi	SOP Wajib (Standar Prosedur Operasional)	Frekuensi Uji / Monitoring	Parameter yang Diuji / Target	Metode Analisis / Alat	Cut-off / Ambang Batas	Referensi (Nama & Tahun)
9. Kontrol Mutu qPCR (DNA Quality & Amplifikasi)	Validasi primer; duplikasi teknis; kontrol positif & negatif	Setiap run qPCR	Ct value, melt curve, efisiensi amplifikasi	Real-Time PCR	Ct ≤ 30 (positif kuat), Ct 31–35 (lemah, uji ulang), Ct > 35 (negatif)	Li et al. (2023); Sharma et al. (2024)
10. Penyimpanan & Distribusi Benih	Monitoring suhu & RH ruang simpan (≤ 15°C, RH ≤ 40%); FIFO system	Harian / mingguan	Suhu, RH, kontaminasi fisik	Data logger, inspeksi visual	Suhu ≤ 15°C; RH ≤ 40%	Nguyen et al. (2025)
11. Audit Internal & Kalibrasi Alat	Kalibrasi autoclave, timbangan, pH meter, PCR thermal cycler	Setiap 6 bulan	Akurasi alat (%)	Verifikasi standar & kontrol eksternal	Deviasi < ±5% dari standar	Sharma et al. (2024); Mekonnen et al. (2022)
12. Dokumentasi dan Traceability	Barcode / QR untuk setiap batch; pencatatan elektronik (ERP/ELN)	Setiap tahap produksi	Integritas data, chain of custody	Database ERP, LIMS	100% keterlacakan batch	Nguyen et al. (2025); Li et al. (2023)

Catatan Implementatif:

1. *qPCR Cut-off* disesuaikan dengan *limit of detection (LOD)* tiap kit dan jenis patogen. Umumnya, $Ct \leq 30$ dianggap positif kuat, 31–35 perlu konfirmasi ulang, dan > 35 dianggap negatif (Li et al., 2023).
2. Frekuensi uji dapat bervariasi tergantung skala produksi dan regulasi lokal (misalnya, *OECD Seed Scheme* atau *ISTA Guidelines 2022*).
3. Audit internal dan *proficiency testing* penting untuk akreditasi laboratorium benih berbasis bioteknologi (Mekonnen et al., 2022).
4. *Integrasi digital traceability* melalui ERP/LIMS meningkatkan efisiensi pelaporan dan transparansi produksi (Nguyen et al., 2025).

11.3.2 Kendali Mutu dalam Produksi Benih Bioteknologi

Kendali mutu (*quality control* atau QC) dalam produksi benih bioteknologi tidak hanya menilai parameter fisik seperti kadar air dan tingkat perkecambahan, tetapi juga memastikan integritas genetik dan kebersihan mikrobiologis dari benih yang dihasilkan (Luo et al., 2022). Aspek penting lainnya adalah verifikasi bahwa proses rekayasa genetik tidak menimbulkan efek *off-target* yang dapat menimbulkan dampak negatif terhadap stabilitas varietas atau keamanan lingkungan. Ketika varietas yang dihasilkan berasal dari teknologi tinggi seperti kultur jaringan atau transformasi genetik, risiko teknis seperti kontaminasi silang (*cross-contamination*) dan pencampuran genetik (*admixture*) dapat mengancam kualitas produk dan reputasi perusahaan. Zhang et al. (2023) menekankan bahwa kontrol mutu yang ketat, berbasis data laboratorium yang tervalidasi, merupakan prasyarat bagi keberhasilan komersialisasi varietas baru di pasar global. Kendali mutu dilakukan pada berbagai tahapan, mulai dari pengawasan bahan genetik, proses kultur, hingga pengujian akhir benih. Proses ini melibatkan metode molekuler seperti *qPCR*, *ELISA*, serta *next-generation sequencing* (NGS) untuk memastikan kemurnian genetik dan deteksi kontaminasi mikroba. Semua data hasil uji disimpan dalam sistem dokumentasi digital terpusat, memungkinkan keterlacakan penuh bila ditemukan anomali mutu.

11.3.3 Kerangka Standarisasi Global

Beberapa lembaga internasional telah menetapkan standar teknis yang menjadi rujukan bagi industri benih global. *International Seed Testing Association* (ISTA) menyediakan *International Rules for Seed Testing*, yang mencakup metode pengujian mutu, sampling, serta akreditasi laboratorium (ISTA, 2024). *OECD Seed Schemes*, di sisi lain, memberikan mekanisme pengakuan

antarnegara terhadap sertifikasi varietas dan memastikan keseragaman dalam pelabelan varietal (OECD, 2024). Selain itu, IPPC/FAO menetapkan *International Standards for Phytosanitary Measures* (ISPM) yang berkaitan dengan perdagangan benih dan pencegahan penyebaran organisme pengganggu tanaman (IPPC/FAO, 2024). Ketiga lembaga ini berperan penting dalam menjaga keandalan sistem mutu benih global dan memberikan dasar bagi harmonisasi antarnegara.

11.3.4 Tantangan Harmonisasi Standar Internasional

Meskipun arah harmonisasi teknis telah berkembang pesat, penerapannya masih menghadapi sejumlah tantangan, terutama di negara dengan kapasitas laboratorium terbatas. Perbedaan interpretasi metodologi, variasi peralatan, dan perbedaan kebijakan nasional terkait teknologi baru seperti *genome editing* seringkali menghambat keseragaman standar (Munkvold, 2024). Namun, berbagai upaya terus dilakukan untuk mengatasi hambatan ini. ISTA secara rutin memperbarui *Rules for Seed Testing* agar sesuai dengan perkembangan teknologi, sementara OECD mendorong dialog multinasional untuk merumuskan kriteria sertifikasi yang lebih fleksibel dan kontekstual (OECD, 2024). Upaya tersebut menjadi langkah penting dalam memperkuat transparansi dan kepercayaan perdagangan benih lintas batas, sekaligus mengurangi hambatan non-tarif yang masih sering ditemui di sektor pertanian global.

11.3.5 Prinsip-Prinsip Dasar Kendali Mutu: QA dan QC

Kendali mutu dalam sistem produksi benih bioteknologi terdiri atas dua komponen utama, yaitu *Quality Assurance* (QA) dan *Quality Control* (QC). QA berfungsi sebagai kerangka pencegahan yang melibatkan penerapan *Standard Operating Procedures* (SOP), program pelatihan personel, serta validasi metode analisis yang digunakan di seluruh rantai produksi. Sebaliknya, QC bersifat detektif, menekankan kegiatan pengawasan seperti pengambilan sampel, uji laboratorium, dan inspeksi lapangan secara langsung. Sinergi antara QA dan QC menjadi mekanisme penting dalam menjamin setiap proses berjalan sesuai spesifikasi dan memungkinkan dilakukannya tindakan korektif secara cepat apabila ditemukan ketidaksesuaian mutu (Chen, 2022).

11.3.6 Perencanaan Sampling: Statistik sebagai Dasar Pengambilan Keputusan Mutu

Pengambilan sampel yang representatif merupakan elemen krusial dalam sistem QA/QC, karena mutu suatu *lot* benih hanya dapat diestimasi dengan akurat melalui sampel yang mewakili populasi keseluruhan. Rencana pengambilan sampel perlu memperhitungkan ukuran *lot*, tingkat heterogenitas bahan, serta tujuan pengujian seperti sertifikasi, pelepasan produk, atau penelitian. Pendekatan statistik digunakan untuk menentukan jumlah sampel, interval kepercayaan, serta langkah tindak lanjut setelah pengujian, seperti pengujian ulang (*retest*), pencampuran ulang (*blending*), atau penurunan kelas mutu (*downgrade*). Semua parameter tersebut harus didokumentasikan secara jelas dalam SOP perusahaan agar hasil pengambilan keputusan berbasis data dan dapat diaudit (Mishra et al., 2024).

11.3.7 Metode Uji Tradisional dan Molekuler: Pendekatan yang Saling Melengkapi

Metode uji klasik seperti uji daya kecambah, uji vigor, dan pengujian ketahanan tetap diperlukan untuk menilai performa fisiologis benih, karena hasilnya mencerminkan kemampuan tumbuh di lapangan. Di sisi lain, teknik molekuler seperti *Polymerase Chain Reaction* (PCR), *quantitative PCR* (qPCR), *Loop-mediated Isothermal Amplification* (LAMP), dan *Next-Generation Sequencing* (NGS) menawarkan sensitivitas tinggi dalam mendeteksi patogen, memverifikasi kemurnian genetik, serta mengidentifikasi varietas. Pendekatan terbaik adalah mengombinasikan kedua metode ini menggunakan uji fenotipik untuk mengevaluasi aspek agronomis dan metode molekuler untuk menjamin keamanan serta stabilitas genetik. Integrasi tersebut memungkinkan keputusan mutu yang lebih cepat dan akurat dalam sistem sertifikasi benih (Delmiglio et al., 2023).

11.3.8 Validasi Metode: Kriteria dan Studi Akurasi

Sebelum suatu metode pengujian digunakan secara resmi dalam proses sertifikasi, metode tersebut harus melalui tahapan validasi yang mencakup evaluasi terhadap parameter seperti spesifisitas, sensitivitas, *repeatability*, *reproducibility*, batas deteksi (*limit of detection*), serta ketahanan metode terhadap variasi matriks sampel (*robustness*). Hasil validasi wajib terdokumentasi untuk memenuhi syarat akreditasi laboratorium berdasarkan ISO/IEC 17025 dan menjadi dasar penerapan nilai ambang (*cut-off*) yang konsisten antar

laboratorium. Proses validasi juga menjamin hasil pengujian dapat diandalkan serta diakui secara internasional (Panagiotidou et al., 2025).

11.3.9 Akreditasi Laboratorium: ISO/IEC 17025 sebagai Standar Teknis

Akreditasi berdasarkan ISO/IEC 17025 menunjukkan bahwa suatu laboratorium memiliki kompetensi teknis dan sistem manajemen mutu yang mampu menghasilkan data uji yang sah dan terpercaya. Dalam industri benih, status akreditasi ini menjadi syarat utama agar hasil pengujian diterima dalam skema sertifikasi baik nasional maupun internasional. Proses akreditasi meliputi audit sistem manajemen, kalibrasi instrumen, validasi metode analisis, serta keikutsertaan rutin dalam program uji profisiensi (*proficiency testing*). Penerapan ISO/IEC 17025 memastikan seluruh tahapan pengujian memenuhi standar ilmiah dan regulatif yang diakui secara global (USDA, 2022).

11.3.10 Program *Proficiency Testing* dan *Ring Trial* antar-Laboratorium

Kegiatan *Proficiency Testing* (PT) dan *ring trial* antar-laboratorium berperan penting dalam mengevaluasi konsistensi kinerja teknis, mendeteksi potensi bias metodologis, serta mendorong harmonisasi hasil antar lembaga uji. Partisipasi laboratorium dalam PT yang diselenggarakan oleh badan akreditasi resmi atau lembaga seperti *International Seed Testing Association* (ISTA) merupakan bagian dari upaya peningkatan kualitas dan keandalan hasil analisis. Melalui PT, laboratorium dapat melakukan penyesuaian terhadap prosedur, memperbaiki deviasi hasil, dan menjaga kesesuaian dengan persyaratan sertifikasi benih internasional (ISTA, 2024).

11.3.11 Pengendalian Peralatan dan Kalibrasi Berkala

Semua peralatan yang digunakan dalam kegiatan QC—seperti pengukur kelembapan, oven pengering, *thermocycler* PCR, dan spektrofotometer—harus menjalani proses kalibrasi dan verifikasi berkala untuk menjaga akurasi pengukuran. Jadwal kalibrasi dan catatan pemeliharaan alat wajib dimasukkan dalam SOP GMP/GLP untuk menjamin bahwa data uji yang dihasilkan bebas dari kesalahan instrumentasi. Pemeliharaan rutin juga memperpanjang umur peralatan sekaligus menurunkan risiko gangguan proses akibat kerusakan teknis (USDA, 2022).

11.3.12 *Traceability* dan Rantai Data

Prinsip *traceability* atau keterlacakan berarti kemampuan untuk menelusuri asal usul setiap batch benih, mulai dari bahan baku, tahapan produksi, hingga hasil uji dan tindakan korektif yang diambil. Sistem *Enterprise Resource Planning* (ERP) yang terintegrasi dengan modul QC dan fitur *audit trail* memungkinkan rekonstruksi jejak data apabila terjadi kasus *recall* atau penyelidikan mutu. Penerapan jejak digital juga memperkuat sistem dokumentasi sertifikasi internasional dan memastikan bahwa seluruh aktivitas produksi dapat diaudit secara transparan (Ahuja et al., 2024).

11.3.13 Standardisasi Format Laporan dan Sertifikat Elektronik

Penyajian laporan hasil uji dan sertifikat mutu perlu distandarisasi untuk memastikan interpretasi yang konsisten di antara regulator, lembaga sertifikasi, dan pembeli internasional. Implementasi sertifikat elektronik yang berisi metadata QC serta tautan ke *ledger traceability* memungkinkan proses verifikasi cepat pada perdagangan lintas negara. Format digital ini juga membantu mengurangi potensi pemalsuan dokumen dan meningkatkan efisiensi administrasi ekspor-impor (Li et al., 2023).

11.3.14 Harmonisasi *Cut-off* dan Interpretasi Hasil Molekuler

Perbedaan sensitivitas di antara berbagai metode molekuler, seperti perbedaan nilai *Cycle Threshold* (Ct) dalam qPCR atau jumlah *reads* pada NGS, memerlukan kesepakatan teknis untuk menentukan ambang batas atau *cut-off* yang digunakan dalam penilaian hasil. Workshop antar-laboratorium dan panduan yang dikeluarkan oleh ISTA serta OECD berperan dalam membangun konsensus interpretasi sehingga hasil uji dapat dibandingkan secara internasional. Harmonisasi ini penting untuk mengurangi risiko kesalahan interpretasi yang berpotensi memengaruhi keputusan sertifikasi dan keamanan perdagangan benih (Munkvold, 2024).

11.3.15 Penggunaan NGS: Peluang dan Tantangan Regulasi

Teknologi *Next-Generation Sequencing* (NGS) membawa kemampuan baru untuk mendeteksi patogen emergen dan memverifikasi integritas genetik dengan resolusi tinggi. Namun, metode ini juga menghadirkan tantangan interpretasi karena menghasilkan volume data besar dengan tingkat *noise* tinggi yang perlu dipisahkan dari sinyal biologis nyata. Oleh karena itu, penerapan NGS dalam sistem sertifikasi memerlukan panduan validasi yang ketat, definisi parameter mutu, serta kriteria tindakan (*actionable criteria*) yang jelas

sebelum hasil analisis dapat dijadikan dasar keputusan regulatif (Delmiglio et al., 2023).

11.3.16 Pengujian Kebun Induk dan Status Kesehatan Tanaman

Pemantauan kesehatan kebun induk harus dilakukan secara periodik dengan mengombinasikan pendekatan diagnostik molekuler dan evaluasi visual terhadap gejala penyakit. Kebun induk yang terinfeksi dapat menimbulkan penyebaran patogen secara luas ke seluruh batch benih yang diproduksi. Oleh sebab itu, sistem pengawasan dini (*proactive surveillance*) merupakan bagian penting dari manajemen jaminan mutu (*Quality Assurance/QA*) dalam produksi benih (Munkvold, 2024).

11.3.17 Pengendalian Biologi dalam Kultur Jaringan untuk Mencegah Variasi Somaklonal

Proses kultur jaringan membawa potensi timbulnya variasi somaklonal yang dapat menurunkan kemurnian genetik tanaman hasil perbanyakan. Untuk mengatasinya, verifikasi genetik secara berkala, pembatasan jumlah subkultur, serta penerapan protokol aklimatisasi yang baku harus dilakukan agar tanaman hasil kultur tetap identik dengan sumber induknya (Choudhary et al., 2023).

11.3.18 Manajemen Risiko Kontaminasi Silang dan Zonasi Fasilitas

Penerapan sistem zonasi berdasarkan fungsi—seperti pemisahan antara area steril, area regenerasi, dan ruang penyimpanan berperan besar dalam menghindari terjadinya kontaminasi silang antar varietas atau spesies. Selain itu, penerapan alur kerja satu arah dan protokol kebersihan yang terdokumentasi dengan baik merupakan bagian integral dari praktik *Good Manufacturing Practices* (GMP) dalam memastikan konsistensi mutu (Pandey & Singh, 2022).

11.3.19 Kompetensi Personel dan Sertifikasi Laboratorium

Keakuratan hasil pengujian laboratorium sangat dipengaruhi oleh kompetensi teknis personel. Oleh karena itu, pelatihan berkala, asesmen kemampuan, serta program sertifikasi internal wajib diterapkan sebagai bagian dari sistem QA untuk menjaga kinerja laboratorium tetap optimal (Panagiotidou et al., 2025).

11.3.20 Dokumentasi dan Pengendalian Versi Standar Operasional Prosedur

Setiap *Standard Operating Procedure* (SOP) perlu terdokumentasi dengan baik, dikendalikan versinya, dan mudah diakses. Setiap perubahan prosedur harus melalui analisis risiko, pelatihan ulang bagi personel terkait, serta pencatatan resmi dalam log perubahan agar audit kepatuhan dapat menunjukkan bahwa revisi dilakukan secara terkendali (Khan et al., 2020).

11.3.21 Audit Internal dan Eksternal sebagai Mekanisme Peningkatan Berkelanjutan

Audit internal rutin diperlukan untuk mengidentifikasi deviasi terhadap SOP dan memicu tindakan korektif, sementara audit eksternal dari lembaga akreditasi atau pelanggan memberikan validasi independen terhadap penerapan sistem mutu. Setiap hasil audit wajib ditindaklanjuti melalui mekanisme *Corrective and Preventive Actions* (CAPA) untuk memperkuat sistem secara berkelanjutan (Rahman et al., 2023).

11.3.22 Pengendalian Mutu Pascapanen

Tahap pascapanen seperti pengeringan, pengelompokan ukuran, dan optical sorting dengan teknologi *hyperspectral imaging* berperan penting menjaga mutu fisiologis benih. Proses tersebut memastikan homogenitas lot dan meminimalkan kehilangan vigor selama penyimpanan (Pedrosa et al., 2024; Zhao et al., 2023).

11.3.23 Uji Stabilitas Formulasi dan Daya Simpan Produk Seed Enhancement

Produk peningkatan mutu benih seperti *seed coatings* dan *bioformulations* harus melalui uji stabilitas untuk menjamin efektivitasnya selama periode penyimpanan. Penetapan standar uji dan pelaporan diperlukan agar klaim performa dapat diterima di berbagai pasar global (Singh et al., 2022).

11.3.24 Sistem Ketertelusuran dan Respons Cepat Recall

Sistem *traceability* diperlukan untuk memungkinkan pelacakan batch dan distribusi benih secara efisien jika terjadi recall. Simulasi recall secara berkala penting dilakukan untuk menguji efektivitas koordinasi antar divisi seperti logistik, QA, dan komunikasi (Ahuja et al., 2024).

11.3.25 Manajemen Data QC: Keamanan dan Interoperabilitas

Data *Quality Control* (QC) harus dijaga dari aspek keamanan dan integritas, termasuk pengendalian akses serta cadangan data. Penggunaan standar metadata dan *Application Programming Interface* (API) yang terbuka memungkinkan integrasi antar sistem serta berbagi data dengan regulator atau mitra industri secara aman (Li et al., 2023).

11.3.26 Analisis Biaya Implementasi Standar Mutu

Penerapan sistem standar mutu dan akreditasi membutuhkan investasi signifikan, baik berupa biaya langsung (peralatan, kalibrasi, sertifikasi) maupun tidak langsung (pelatihan dan dokumentasi). Namun, penelitian menunjukkan bahwa investasi ini mengurangi risiko penarikan produk, meningkatkan kepercayaan pasar, dan memperkuat reputasi industri (Wang et al., 2023).

11.3.27 Harmonisasi Standar Regional dan Global

Upaya harmonisasi standar mutu benih pada tingkat regional, seperti inisiatif OECD *Seed Schemes*, kolaborasi ASEAN *Seed Network*, dan dukungan teknis dari FAO/IPPC, membantu negara berkembang menyesuaikan sistem pengujian dan akreditasi sesuai standar internasional melalui alih teknologi dan pelatihan laboratorium (OECD, 2024; FAO/IPPC, 2024).

11.3.28 Kesiapan Menghadapi Teknologi Baru seperti Genome Editing

Kemunculan teknologi *genome editing* memerlukan pedoman teknis untuk pengujian *off-target*, pelaporan molekuler, serta penilaian risiko berbasis produk agar regulasi lintas negara dapat berjalan seragam dan transparan (Zhang et al., 2023).

11.3.29 Etika, Transparansi, dan Pelabelan Produk Benih

Standarisasi juga mencakup aspek etika dan keterbukaan informasi. Label pada kemasan benih harus menyertakan kelas benih, sumber bahan induk, serta status pengujian molekuler yang dilakukan, guna membangun kepercayaan pengguna dan meningkatkan transparansi rantai pasok (Colella, 2023).

11.3.30 Rekomendasi Implementasi Sistem Standarisasi yang Efektif

Langkah-langkah untuk meningkatkan efektivitas sistem standarisasi yang direkomendasikan meliputi penerapan *ISTA Rules* dan *ISO/IEC 17025* sebagai dasar sistem mutu, peningkatan akreditasi laboratorium dan uji profisiensi, integrasi sistem digital *ERP–QC–traceability*, validasi internal melalui *ring trials*, penguatan kompetensi sumber daya manusia, serta partisipasi aktif dalam forum regulatori (Munkvold, 2024; Ahuja et al., 2024).

11.3.31 Standarisasi sebagai Fondasi Kepercayaan dan Perdagangan Global

Standarisasi dan kendali mutu berfungsi sebagai pilar kepercayaan dan prasyarat utama dalam perdagangan benih bioteknologi. Kombinasi penerapan teknis (validasi metode dan akreditasi), manajerial (SOP, audit), serta digital (*traceability* dan integritas data) akan menentukan keberhasilan industri dalam menjamin mutu dan daya saing di pasar global (Munkvold, 2024; ISTA, 2024).

DAFTAR PUSTAKA

- Ahuja, R., Gupta, S. & Rao, P., 2024. SeedChain: A secure and transparent blockchain-driven seed traceability framework. *Information*, 16(4), p.132.
- Ali, A., Mehmood, A. & Abbas, R., 2023. Automation and IoT Applications in GMP-Compliant Seed Biotechnology Facilities. *Journal of Biotechnology and Bioengineering*, 140(5), pp.1213–1227.
- Alemu, A., 2024. Genomic selection in plant breeding: key factors shaping adoption. *The Crop Journal*, 12(3), pp.201–217.
- Chen, L., Zhang, Q. & Liu, W., 2023. Molecular Verification Systems for Genetic Purity Testing in Seed Production Chains. *Plant Biotechnology Reports*, 17(4), pp.589–603.
- Chen, S.P.J., 2022. The seed quality assurance regulations and certification: a comparative review. *Agriculture*, 12(5), p.624.
- Chen, Y., Liu, X. & Zhao, M., 2020. Validation of Genetic Stability in Transgenic Seed Production. *Plant Cell Reports*, 39(11), pp.1550–1562.
- Choudhary, R., et al., 2023. Automation and bioreactors in commercial micropropagation: trends and economics. *Industrial Crops and Products*, 189, p.116261.
- Colella, J.P., 2023. Engaging with the Nagoya Protocol on Access and Benefit-Sharing. *Journal of International Environmental Law*, 104(3), pp.430–445.
- Delmiglio, C., 2023. New virus diagnostic approaches to ensuring the ongoing functionality of seed systems. *Frontiers in Plant Science*, 14, (Article).
- FAO / IPPC, 2024. *Phytosanitary procedures for seed certification*. FAO Guidance Documents.
- FAO, 2021. *Seed Quality Management Systems for Biotechnology-derived Varieties*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Feddema, J.J., 2024. LAMP: commercial opportunity for rapid plant pathogen detection. *Diagnostics*, 14(17), p.1845.
- Hussain, M., Farooq, M., Lee, D.J. & Nawaz, A., 2021. Seed priming with natural biostimulants improves germination and stress tolerance: A review. *Agronomy*, 11(3), p.557.
- ISTA (International Seed Testing Association), 2024. *International Rules for Seed Testing*. ISTA Publications.
- Jácome Sarchi, G.A., et al., 2025. In vitro techniques for seed potato: applied protocols and economic impact. *Plants*, 14(17), p.2777.

- Khan, S., Arshad, M. & Rehman, Z., 2020. GMP Documentation and Traceability in Seed Production Facilities. *Journal of Applied Biosciences*, 18(2), pp.45–58.
- Kumar, R., Singh, D. & Patel, H., 2021. Good Manufacturing Practices in Plant Biotechnology: A Review of Standards and Applications. *Biotechnology Advances*, 49, 107749.
- Kumar, S., Mehta, R. & Sharma, N., 2022. Sterility Control and Validation in Plant Tissue Culture under GMP Environment. *Plant Biotechnology Journal*, 20(8), pp.1552–1565.
- Kumar, R., 2024. Advances in genomic tools for plant breeding. *Biological Research*, 57(1), p.62.
- Li, H., Zhao, L. & Wu, P., 2021. Ensuring Genetic Integrity through GMP in Transgenic Seed Production. *Frontiers in Plant Science*, 12, 642987.
- Li, H., Zhang, Y. & Sun, D., 2023. Blockchain-enabled seed traceability systems for sustainable agriculture. *Journal of Cleaner Production*, 386, p.135817.
- Li, Y., Wang, J. & Zhou, H., 2023. Application of qPCR in Seed Quality Control and Virus-Free Propagation Systems. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1198432.
- Luo, Y., Tang, J. & Wang, Q., 2022. Genetic Validation Framework for Biotechnology-derived Seeds. *Agricultural Systems*, 198, 103391.
- Mekonnen, A., Tesfaye, K. & Kumar, P., 2022. Implementation of Good Manufacturing Practices in Seed Biotechnology Laboratories. *Journal of Biotechnology and Biosafety*, 13(2), pp.88–104.
- Mishra, R., Patel, D. & Mehta, P., 2024. Molecular verification of seed purity and health: NGS and LAMP methods. *Plant Molecular Biology Reporter*, 42(2), pp.189–201.
- Munkvold, G.P., 2024. Challenges and advances in ensuring a safe global seed trade. *Annual Review of Phytopathology*, 62, pp.1–25.
- Nguyen, H.T., Le, D.H. & Tran, Q., 2025. Digital Traceability and QA/QC Standardization in Modern Seed Industries. *Agricultural Systems*, 224, 104093.
- OECD, 2024. *OECD Seed Schemes: Rules and Regulations*. OECD Publishing.
- Panagiotidou, E., et al., 2025. Systematic identification and validation of critical success factors for effective ISO/IEC 17025 implementation. *Governance*, 15(2), p.60.

- Pandey, R. & Singh, P., 2022. Designing GMP Facilities for Biotech Seed Production: Infrastructure and Biosafety. *Journal of Biosystems Engineering*, 219, 104837.
- Pedrosa, L.M., Silva, F. & Costa, R., 2024. Optimization of harvesting and drying techniques for improved seed quality in specialty crops. *Agronomy*, 14(8), p.1705.
- Rahman, F., Ahmed, T. & Khan, N., 2023. E-audit Systems in GMP-Compliant Agribiotech Industries. *Computers and Electronics in Agriculture*, 207, 107669.
- Rana, P., Joshi, D. & Thakur, K., 2022. GMP 4.0 and the Future of Digitalized Quality Management Systems in Seed Biotechnology. *Industrial Biotechnology*, 18(4), pp.210–225.
- Rao, S. & Kiran, D., 2021. Regulatory Challenges in Implementing GMP for Biotechnological Seeds in Developing Countries. *African Journal of Biotechnology*, 20(12), pp.244–256.
- Rizwan, M., Ahmed, I. & Bhatti, S., 2021. Process Validation for Transgenic Seed Production under GMP Framework. *Plant Science Today*, 8(5), pp.102–114.
- Sharma, N., Patel, R. & Singh, A., 2024. Quality Assurance and GMP Compliance in Tissue Culture–Based Seed Production. *Biotechnology Advances*, 65, 108254.
- Sharma, R., Singh, G. & Gupta, S., 2023. Molecular and Physiological Quality Control in Biotech Seed Production. *Plant Molecular Biology Reporter*, 41(1), pp.37–52.
- Sharma, V. & Gupta, N., 2024. Integrating GMP and GAP for Sustainable Biotech Seed Supply Chains. *Journal of Cleaner Production*, 420, 138472.
- Singh, P., Singh, R. & Tripathi, P., 2022. Bio-priming: A sustainable seed enhancement technique for stress management. *Plants*, 11(10), p.1290.
- Singh, R., Pandey, P. & Rao, M., 2021. Hygiene and Microbiological Quality Management in Plant Tissue Culture Facilities. *Plant Cell Reports*, 40(6), pp.999–1013.
- Thijssen, M.H., et al., 2025. Policies for integrated seed sector development: aligning policy with integrated seed system principles. *Agricultural Systems*, 231, 103409.
- Thompson, D., Li, J. & Yang, Z., 2022. Frameworks for GMP Compliance in Genetic Seed Production Systems. *Nature Biotechnology*, 40(9), pp.1501–1512.

- USDA, 2022. *Seed Regulatory and Testing Division Newsletter*. United States Department of Agriculture.
- Wang, J., He, Q. & Lin, Y., 2023. Blockchain-based Traceability and GMP Integration for Biotech Seeds. *Computers and Industrial Engineering*, 181, 109118.
- Yang, S., Liu, H. & Zhang, Q., 2024. Rapid prediction and visualization of safe moisture content for seed storage. *Journal of Stored Products Research*, 106, p.101125.
- Zhang, W., Lu, X. & Zhao, H., 2024. Genetic Source Verification and Raw Material Management in Seed Biotechnology Facilities. *Biotechnology Reports*, 38, e00876.
- Zhang, X., Zhang, C. & Wang, Y., 2023. Regulatory and economic challenges in genome-edited seed commercialization. *Nature Biotechnology*, 41(5), pp.687–699.
- Zhao, Y., Li, H. & Chen, J., 2023. AI-driven seed phenotyping: from laboratory to industry scale. *Computers and Electronics in Agriculture*, 205, p.107618.
- Zhou, L., Chen, F. & Zhang, Q., 2022. Good Manufacturing Practices in Agricultural Biotechnology: Global Harmonization and Quality Assurance. *Trends in Biotechnology*, 40(3), pp.400–415.

BAB 12

DAMPAK BIOTEKNOLOGI TERHADAP KEBERLANJUTAN

Oleh: Henny Diana Wati

Bioteknologi telah muncul sebagai pendorong utama keberlanjutan dalam sektor pertanian, menawarkan solusi inovatif untuk tantangan global yang mendesak seperti keamanan pangan dan degradasi lingkungan. Integrasi kemajuan bioteknologi ke dalam praktik pertanian memungkinkan peningkatan produktivitas sambil meminimalkan dampak ekologi yang merugikan, menciptakan jalur menuju sistem pangan yang lebih berkelanjutan.

Salah satu cara utama bioteknologi meningkatkan keberlanjutan pertanian adalah melalui rekayasa genetika dan modifikasi tanaman. Organisme yang dimodifikasi secara genetik (GMO) dapat secara signifikan meningkatkan hasil panen dan ketahanan tanaman terhadap stres biotik dan abiotik. Misalnya, pengembangan tanaman yang tahan herbisida dan tahan kekeringan memberikan petani alat untuk memproduksi pangan secara lebih efisien di bawah kondisi yang menantang, pada akhirnya mengurangi ketergantungan pada air dan input kimia (Seid & Andualem, 2021; Das et al., 2023; Amari, 2023). Pendekatan ini sejalan dengan tujuan pertanian berkelanjutan, yang menekankan pemenuhan kebutuhan pangan saat ini tanpa menguras sumber daya alam untuk generasi mendatang (Das et al., 2023; Hoffman, 2022). Studi menunjukkan bahwa metode bioteknologi ini dapat meningkatkan keuntungan petani, dengan pengurangan biaya produksi sebagai manfaat signifikan (Seid & Andualem, 2021; Amari, 2023).

Selain itu, pemanfaatan bioteknologi mikroba, seperti biofertilizer dan biopestisida, memainkan peran krusial dalam meningkatkan kesehatan tanah dan mengoptimalkan produksi tanaman. Penerapan konsorsium mikroba, yang meliputi jamur dan bakteri bermanfaat, memulihkan tanah pertanian, meningkatkan penyerapan nutrisi, dan mengurangi ketergantungan pada pupuk kimia (Aguilar- Paredes dkk., 2020; Kalsoom dkk., 2020). Praktik-praktik ini meningkatkan hasil panen dan berkontribusi pada keberlanjutan ekosistem tanah, mengurangi dampak negatif yang terkait dengan masukan kimia (Bisht & Chauhan, 2023; Pasupuleti, 2025). Secara khusus, penggunaan agen biokontrol yang berasal dari mikroorganisme menawarkan alternatif

berkelanjutan bagi pestisida kimia tradisional, mengurangi potensi kerusakan pada spesies non-target dan lingkungan (Falade dkk., 2021; Nazarova dkk., 2024).

Selain itu, penerapan intervensi bioteknologi juga mencakup strategi adaptasi perubahan iklim. Dengan mengembangkan tanaman yang membutuhkan air lebih sedikit atau lebih tahan terhadap peristiwa cuaca ekstrem, bioteknologi membantu memastikan ketahanan pangan di hadapan tantangan terkait iklim, sehingga mendukung keberlanjutan pertanian (Seid & Andualem, 2021; Kaya, 2025; Bousmid, 2024). Studi lebih lanjut mengeksplorasi penerapan bioteknologi canggih, seperti CRISPR, dalam meningkatkan efisiensi nutrisi dan meningkatkan hasil panen dalam sistem pertanian dengan input rendah, menegaskan potensinya dalam mengurangi jejak karbon sektor pertanian (Sampath dkk., 2023; Gurjar, 2025).

Selain itu, konvergensi bioteknologi dengan inovasi digital dalam pertanian, seperti teknologi pertanian presisi dan kecerdasan buatan (AI), meningkatkan pengelolaan sumber daya dan proses pengambilan keputusan dalam praktik pertanian (Pasupuleti, 2025; Nautiyal et al., 2024). Praktik pertanian berbasis data memungkinkan penggunaan masukan yang lebih efisien, meminimalkan limbah dan dampak lingkungan disamping memaksimalkan produktivitas. Pendekatan terintegrasi ini menciptakan lanskap pertanian yang lebih tangguh, lebih siap menghadapi tekanan dari pertumbuhan populasi global dan perubahan kondisi iklim (Modjo dkk., 2024).

Bioteknologi juga berkontribusi pada pengembangan solusi pengelolaan limbah berkelanjutan, mengubah produk sampingan pertanian menjadi sumber daya bernilai, seperti biofuel atau bioplastik, melalui proses mikrobiologis (Pasha dkk., 2025; Moraes dkk., 2025). Hal ini mendukung konservasi lingkungan dengan mengurangi limbah dan mendukung ekonomi sirkular yang memandang limbah sebagai sumber daya daripada beban pembuangan. Penerapan bioteknologi dalam pengelolaan limbah menggambarkan manfaat multidimensinya, secara signifikan memperkuat perannya dalam keberlanjutan.

Signifikansi bioteknologi meluas hingga kerangka kebijakan dan praktik regulasi. Dengan munculnya teknik rekayasa genetika baru, terutama pengeditan genom, terdapat seruan yang semakin kuat untuk lingkungan regulasi yang dapat beradaptasi dengan cepat terhadap teknologi baru (Anyshchenko, 2022; Anushi dkk., 2024). Responsivitas semacam ini esensial

untuk memanfaatkan potensi penuh bioteknologi dalam pertanian berkelanjutan selain memastikan keamanan dan penerimaan publik.

12.1 Efisiensi Sumber Daya dalam Produksi Benih

Efisiensi sumber daya dalam produksi benih merupakan aspek kritis dari praktik pertanian berkelanjutan, menanggapi permintaan global yang terus meningkat akan pangan, keberlanjutan lingkungan, dan kelayakan ekonomi. Produksi benih berada di inti produktivitas pertanian, mempengaruhi segala hal mulai dari hasil panen hingga keamanan pangan. Peningkatan di sektor ini berkontribusi pada peningkatan efisiensi produksi dan mempromosikan keseimbangan ekologi.

Salah satu pendekatan inovatif untuk meningkatkan efisiensi sumber daya dalam produksi benih adalah penerapan nanoteknologi, khususnya melalui teknik nano-priming benih. Metode ini memodifikasi metabolisme dan proses fisiologis benih, menghasilkan perkecambahan yang lebih cepat dan vitalitas bibit yang lebih baik. Penelitian menunjukkan bahwa nano-priming dapat meningkatkan pertumbuhan tanaman, meningkatkan hasil panen, dan memperbaiki kualitas gizi, menawarkan jalur berkelanjutan untuk meningkatkan output pertanian disamping meminimalkan pemborosan sumber daya (Pereira et al., 2021). Selain itu, studi tentang biofortifikasi benih menggunakan bahan nano yang dimodifikasi secara rekayasa menunjukkan potensi dalam mengatasi defisiensi mikronutrien, terutama di wilayah dengan masalah kesehatan yang mendesak terkait gizi, menegaskan pentingnya teknologi ini dalam mendukung ketahanan pangan (Torre-Roche dkk., 2020). Integrasi teknologi ini mencerminkan pergeseran menuju pertanian presisi, meningkatkan produktivitas dengan pengeluaran sumber daya yang lebih rendah.

Praktik produksi benih berkelanjutan telah berkembang untuk mencakup teknik pertanian yang lebih efisien dan metode canggih yang meningkatkan kualitas benih dan hasil produksi. Misalnya, varietas tanaman yang ditingkatkan, teknik penanaman optimal, dan teknologi seperti irigasi tetes dan fertigasi berkontribusi pada efisiensi penggunaan air dan nutrisi dalam produksi benih. Pendekatan strategis ini memaksimalkan penggunaan sumber daya dan mengurangi dampak lingkungan, menjadikan pertanian lebih berkelanjutan (Chen et al., 2023; Hùng et al., 2022). Ada penekanan yang signifikan pada penerapan praktik seperti penanaman langsung dan penggunaan tanaman penutup, yang dapat meningkatkan kesehatan dan

kesuburan tanah, sehingga lebih memperkuat keberlanjutan sistem produksi benih (Akpo dkk., 2020; Nainggolan dkk., 2024).

Selain itu, penggunaan teknologi pelapisan benih meningkatkan efisiensi dengan melindungi benih dari patogen dan meningkatkan ketahanannya terhadap kondisi lingkungan yang tidak menguntungkan. Pelapisan ini dapat mengandung agen biologis dan kimia yang merangsang pertumbuhan, mengurangi ketergantungan pada pupuk dan pestisida, serta mengurangi jejak lingkungan pertanian (Patyal dkk., 2025). Hal ini sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular, di mana produk limbah dapat didaur ulang menjadi masukan bernilai tambah untuk produksi pertanian, sehingga meningkatkan efisiensi sumber daya (Naz dkk., 2024).

Di wilayah yang terdampak parah oleh perubahan iklim, teknik pertanian inovatif seperti aeroponik dan pertanian lingkungan terkendali telah menunjukkan potensi besar dalam mengoptimalkan produksi benih. Teknologi ini tidak hanya menghemat air tetapi juga meningkatkan akses ke benih berkualitas, sehingga mengatasi ketahanan pangan di wilayah rentan (Rathore dkk., 2025). Selain itu, inisiatif penelitian partisipatif menunjukkan bahwa usaha benih lokal dapat memperkuat ketahanan sistem pertanian dengan meningkatkan ketersediaan benih berkualitas disamping menciptakan peluang ekonomi bagi petani kecil (Tufail dkk., 2025; Sankhyan dkk., 2025).

Peningkatan efisiensi sistem produksi terkait dengan pertimbangan bioetika dan partisipasi komunitas dalam pengelolaan benih berkelanjutan sangat penting. Strategi yang melibatkan petani dalam pengadaan dan perbanyakan benih dapat meningkatkan kualitas benih yang dihasilkan dan memastikan praktik-praktik ini relevan secara budaya dan ramah lingkungan. Pendekatan partisipatif ini meningkatkan kepercayaan dan memenuhi kebutuhan lokal (Assaye, 2024; Sahu & Prayagraj, 2023).

Kesimpulannya, efisiensi sumber daya dalam produksi benih mencakup pendekatan multidimensi yang mengintegrasikan kemajuan teknologi, praktik berkelanjutan, dan keterlibatan komunitas. Dengan menerapkan teknik inovatif seperti nanoteknologi, praktik agronomis yang ditingkatkan, dan penelitian partisipatif, sektor pertanian dapat meningkatkan produktivitas selain memastikan keberlanjutan lingkungan dan kelayakan ekonomi.

12.2 Pengurangan Penggunaan Pestisida dan Input Sintetik

Pengurangan penggunaan pestisida dan input sintetis melibatkan transisi signifikan menuju praktik pertanian organik, yang semakin diakui karena keberlanjutannya, manfaat lingkungan, dan potensinya dalam meningkatkan

keanekaragaman hayati. Pertanian organik menekankan metode alami dan penggunaan input organik, sehingga meminimalkan ketergantungan pada pupuk dan pestisida sintetis. Praktik ini tidak hanya bertujuan melindungi lingkungan tetapi juga mempromosikan keanekaragaman hayati dan kesehatan tanah, yang esensial bagi ekosistem pertanian berkelanjutan (Smith et al., 2020; Meng et al., 2017).

Beberapa studi penting menjelaskan manfaat multiaspek pertanian organik. Misalnya, Smith et al. berargumen bahwa keunggulan keberlanjutan pertanian organik dapat dipengaruhi oleh lanskap, menyarankan bahwa menargetkan produksi organik di lanskap yang kaya biodiversitas dapat mengoptimalkan hasil ekologi dan ekonomi (Smith et al., 2020). Hal ini didukung lebih lanjut oleh Qiao et al. yang mengungkapkan bahwa pertanian organik menawarkan peningkatan kesejahteraan dan manfaat sosial bagi petani skala kecil, sehingga berkontribusi pada pengurangan kemiskinan yang berkelanjutan dan perkembangan ekonomi di berbagai wilayah (Qiao et al., 2015). Temuan ini menyoroti potensi praktik organik tidak hanya untuk perbaikan lingkungan tetapi juga untuk ketahanan ekonomi di kalangan komunitas pertanian yang rentan.

Selain itu, Meng dkk. menyediakan bukti manfaat lingkungan dari pertanian organik, menyoroti pengurangan pencucian nitrat dan emisi gas rumah kaca yang terkait dengan praktik organik (Meng dkk., 2017). Hal ini menunjukkan hubungan langsung antara penerapan metode organik dan penurunan polusi secara keseluruhan, yang mendukung ekosistem yang lebih sehat. Studi seperti yang dilakukan oleh Purnhagen dkk. lebih lanjut menjelaskan bagaimana pertanian organik berkontribusi pada Strategi *Farm to Fork* Uni Eropa yaitu pendekatan holistik yang bertujuan meminimalkan jejak lingkungan praktik pertanian (Purnhagen dkk., 2021). Dengan mempromosikan pertanian organik, terdapat komitmen bersama untuk mencapai tujuan keberlanjutan, dengan penekanan pada pengurangan penggunaan input sintetis.

Efektivitas pertanian organik dalam meningkatkan keanekaragaman hayati telah tercatat dengan baik. Penelitian oleh Walker dkk. menjelaskan bagaimana pertanian organik dapat menciptakan kondisi yang lebih menguntungkan bagi penyerbuk, yang esensial bagi banyak spesies tanaman (Walker dkk., 2024). Selain itu, Inclán dkk. membahas bagaimana metode organik mendorong peningkatan keanekaragaman serangga bermanfaat, yang krusial untuk pengendalian hama (Inclán dkk., 2015). Penerapan praktik-praktik tersebut dapat secara langsung mengurangi kebutuhan akan pestisida

kimia, karena pengendalian hama alami yang ditawarkan oleh keanekaragaman hayati yang meningkat dapat mencukupi untuk menjaga kesehatan tanaman.

Namun, beralih ke pertanian organik menghadapi tantangan, termasuk persepsi petani, kesulitan sertifikasi, dan risiko ekonomi awal. Yanakittkul dan Aungvaravong menyoroti tantangan yang dihadapi petani kecil dalam mengadopsi metode organik akibat pengetahuan yang terbatas dan risiko finansial yang dirasakan (Yanakittkul & Aungvaravong, 2020). Uhumare dkk. juga mencatat, meskipun petani kecil menyadari manfaat lingkungan dari pertanian organik, banyak yang enggan karena persyaratan sertifikasi yang ketat dan investasi awal yang besar (Uhumare dkk., 2021). Untuk mengatasi hambatan ini melalui pendidikan, dukungan kebijakan, dan proses sertifikasi yang disederhanakan sangat penting untuk mendorong peralihan luas ke praktik organik.

Kesimpulannya, transisi ke pertanian organik tidak hanya berpotensi mengurangi penggunaan masukan sintetis tetapi juga mendorong kerangka pertanian yang lebih berkelanjutan yang bermanfaat bagi lingkungan, meningkatkan keanekaragaman hayati, dan mendukung stabilitas ekonomi petani. Mengatasi tantangan yang terkait akan memerlukan upaya bersama dari pembuat kebijakan, pendidik pertanian, dan pemangku kepentingan di sektor pertanian untuk meningkatkan pemahaman dan memfasilitasi adopsi praktik organik.

12.3 Konservasi Keanekaragaman Genetik

Konservasi keanekaragaman genetik merupakan hal yang fundamental dalam menjaga keanekaragaman hayati dan fungsi ekosistem, terutama mengingat pengaruh antropogenik yang secara cepat mengurangi sumber daya genetik dan keanekaragaman spesies. Keanekaragaman genetik mencakup variasi karakteristik genetik dalam suatu spesies, yang krusial bagi kemampuan spesies untuk beradaptasi dengan perubahan lingkungan dan ancaman seperti perubahan iklim, fragmentasi habitat, dan wabah penyakit (DeWoody et al., 2021; Expósito- Alonso et al., 2022).

Era Antroposen telah menyaksikan perubahan signifikan dalam keragaman genetik akibat aktivitas manusia yang luas. Penelitian menunjukkan bahwa hilangnya habitat dan perubahan iklim telah secara drastis mengubah jangkauan geografis banyak spesies, menyebabkan peningkatan risiko kepunahan dan penurunan keragaman genetik (Expósito- Alonso dkk., 2022; Shaw dkk., 2025). Sebagai contoh, Miraldo dkk. telah memetakan secara kuantitatif keragaman genetik untuk berbagai spesies mamalia darat dan

amfibi, mengidentifikasi tren yang mengkhawatirkan yang menunjukkan kehilangan bersih sumber daya genetik (Miraldo dkk., 2016). Pelestarian variasi genetik ini sangat penting, tidak hanya karena nilai intrinsik keanekaragaman hayati tetapi juga untuk meningkatkan ketahanan ekosistem terhadap perubahan lingkungan (DeWoody dkk., 2021; O'Brien dkk., 2025).

Selain itu, keragaman genetik memainkan fungsi kritis dalam layanan ekosistem, seperti peningkatan produktivitas dan stabilitas jaringan ekologi. Studi spesifik menunjukkan bahwa keragaman genetik yang lebih tinggi dalam spesies dapat meningkatkan fungsi ekosistem, menyoroti bahwa keragaman intraspesifik harus menjadi fokus yang setara atau lebih besar daripada keragaman spesies dalam strategi konservasi (Zhang & Han, 2018; Tang dkk., 2022). Argumen ini didukung oleh pengamatan bahwa populasi genetik yang beragam dapat lebih tahan terhadap tekanan lingkungan dan berkontribusi pada ketahanan ekosistem (Fargeot dkk., 2025).

Strategi konservasi yang efektif harus mengatasi faktor-faktor yang mendorong hilangnya keragaman genetik. Hal ini termasuk memahami aktivitas socio-ekonomi yang berkontribusi pada kerusakan habitat, seperti pertanian dan urbanisasi, yang secara signifikan memecah habitat dan mengurangi konektivitas populasi (Marques et al., 2019; Macdonald et al., 2018). Kebutuhan akan kebijakan konservasi dinamis yang beradaptasi dengan perubahan lingkungan yang sedang berlangsung telah ditekankan dalam berbagai studi (Arneth et al., 2020; Shaw et al., 2025; Raffard et al., 2021). Pengintegrasian informasi genetik ke dalam kebijakan konservasi dan perencanaan penggunaan lahan sangat penting untuk melindungi variasi genetik yang diperlukan untuk kelangsungan hidup spesies (Hisano et al., 2017; Guan et al., 2021).

Kerangka kerja perlu dikembangkan lebih banyak untuk menghubungkan penilaian genetik dengan tindakan konservasi secara efektif. Misalnya, intervensi berdasarkan data genetik dapat membantu merumuskan strategi pengelolaan populasi terancam dengan menentukan ukuran kelompok pembiakan yang diperlukan dan mengoptimalkan aliran gen antar populasi (Belasen dkk., 2019). Fokus utama bagi ahli biologi konservasi adalah mengidentifikasi dan melindungi populasi yang menunjukkan variasi genetik yang signifikan, karena populasi ini kemungkinan besar akan berfungsi sebagai cadangan untuk adaptasi masa depan terhadap perubahan lingkungan (Rizvanovic dkk., 2018).

Interaksi antara keragaman genetik dengan faktor stres eksternal, seperti perubahan iklim dan spesies invasif, memerlukan pendekatan konservasi yang

multiaspek. Misalnya, spesies seperti lebah madu sangat bergantung pada keragaman genetik tidak hanya untuk kelangsungan hidupnya tetapi juga untuk mendukung sistem pertanian yang bergantung pada layanan penyerbukannya (O'Brien et al., 2025; Rabeena, 2025; Lim et al., 2024). Upaya untuk mempertahankan atau meningkatkan keragaman genetik dalam sistem pertanian sangat penting dalam memastikan produksi pangan yang berkelanjutan di tengah tantangan yang ditimbulkan oleh variabilitas iklim.

Secara ringkas, konservasi keragaman genetik merupakan aspek kunci dalam pengelolaan keanekaragaman hayati dan integritas ekologi. Inisiatif pendidikan, penyesuaian kebijakan, dan strategi konservasi di lapangan harus memasukkan penilaian keragaman genetik untuk melindungi ekosistem secara efektif. Memperkuat kolaborasi antar disiplin ilmu akan memperkuat upaya ini, memastikan bahwa konservasi genetik terintegrasi ke dalam kerangka kerja konservasi yang lebih luas.

12.4 Aspek Sosial, Ekonomi, dan Etika

Rekayasa benih unggul merupakan bidang yang multidimensi, mencakup dimensi sosial, ekonomi, dan etika yang krusial bagi pengembangan pertanian berkelanjutan.

1. Aspek Sosial

Implikasi sosial dari rekayasa benih unggul sangat signifikan, terutama terkait potensinya untuk meningkatkan ketahanan pangan dan memperbaiki kesejahteraan di negara-negara berkembang. Varietas benih berkualitas tinggi memainkan peran penting dalam meningkatkan produktivitas pertanian dan ketahanan terhadap hama dan penyakit, sehingga secara langsung mempengaruhi ketersediaan pangan dan pendapatan petani (McEwan et al., 2021). Penerapan varietas benih yang ditingkatkan, termasuk tanaman transgenik, dapat memberikan manfaat signifikan bagi petani kecil dengan memberikan hasil panen yang lebih tinggi dan ketahanan terhadap stres lingkungan, sehingga meningkatkan status sosial-ekonomi mereka (Bagamba et al., 2023).

Selain itu, modal sosial dan jaringan komunitas sangat mempengaruhi keputusan petani untuk mengadopsi benih bersertifikat. Penelitian menunjukkan bahwa hubungan sosial dan jaringan petani dapat memfasilitasi penyebaran teknologi benih inovatif, yang pada akhirnya berdampak pada pertumbuhan pertanian kecil (Musoke dkk., 2024). Oleh karena itu, mendorong keterlibatan komunitas dan transfer

pengetahuan sangat penting untuk implementasi teknologi benih yang sukses.

2. Aspek Ekonomi

Dari perspektif ekonomi, rekayasa benih yang superior memiliki dampak signifikan terhadap produktivitas pertanian dan stabilitas ekonomi. Pengenalan tanaman transgenik dikaitkan dengan peningkatan kesejahteraan, dengan studi menyoroti keuntungan ekonomi yang terkait dengan hasil panen yang lebih tinggi dan biaya produksi yang lebih rendah (Ciliberto dkk., 2019). Model ekonomi menunjukkan bahwa adopsi yang lebih luas dari teknologi benih yang tangguh dapat memfasilitasi pertumbuhan ekonomi nasional dan regional yang lebih tinggi, berpotensi mengurangi tingkat kemiskinan di komunitas agraris (Yu dkk., 2023).

Selain itu, kemitraan publik-swasta memainkan peran krusial dalam pengembangan teknologi benih, karena kerangka kerja kolaboratif antara sektor pemerintah dan swasta dapat meningkatkan upaya penelitian dan pengembangan, memastikan petani memiliki akses ke opsi benih inovatif (Kolar dkk., 2024). Keberlanjutan ekonomi rekayasa benih oleh karena itu erat terkait dengan kebijakan komprehensif yang mengatur inovasi pertanian dan proses sertifikasi benih (Verma, 2024).

3. Aspek Etika

Pengembangan dan penyebaran varietas benih unggul menimbulkan beberapa pertimbangan etis, terutama terkait modifikasi genetik dan keanekaragaman hayati. Debat seputar organisme transgenik (GMOs) melibatkan pembahasan penting tentang risiko potensial terhadap kesehatan, lingkungan, dan praktik pertanian tradisional (Pathak dkk., 2025). Kerangka etika diperlukan untuk mengatasi tantangan kompleks ini, mendorong proses regulasi yang transparan dan mempromosikan penggunaan bioteknologi secara etis dalam pertanian (Kotschi & Horneburg, 2018).

Lisensi Benih Sumber Terbuka (*Open Source Seed License*) mewakili pendekatan inovatif untuk melindungi akses terhadap bahan genetik tanaman, menekankan pentingnya pelestarian keanekaragaman hayati dan pencegahan praktik monopoli dalam pengembangan benih (Oliveira & Cardoso, 2021). Diskusi etis seputar teknologi benih harus memprioritaskan hak petani, akses yang adil, dan keamanan konsumen untuk memastikan pertanian berkelanjutan yang menghormati keragaman sosial dan integritas lingkungan.

Kesimpulannya, rekayasa benih unggul merupakan bidang kritis yang memiliki implikasi mendalam bagi perbaikan sosial, pertumbuhan ekonomi, dan tanggung jawab etis dalam kerangka pertanian. Kolaborasi antar sektor, pemahaman dinamika komunitas, dan penanganan isu etis sangat vital untuk kemajuan berkelanjutan dalam teknologi benih.

12.5 Strategi Mewujudkan Pertanian Berkelanjutan melalui Bioteknologi

Pencapaian pertanian berkelanjutan melalui bioteknologi melibatkan integrasi berbagai strategi yang meningkatkan produktivitas selain meminimalkan dampak lingkungan. Interaksi antara aplikasi bioteknologi inovatif, praktik konservasi, dan kerangka kebijakan memainkan peran kritis dalam mendorong sistem pertanian berkelanjutan.

Salah satu strategi utama melibatkan peningkatan keragaman genetik melalui inovasi bioteknologi. Modifikasi genetik, seperti teknologi CRISPR, memungkinkan pengembangan tanaman yang lebih tahan terhadap hama, penyakit, dan stres iklim. Dengan memfasilitasi rekayasa sifat-sifat seperti ketahanan terhadap kekeringan dan toleransi terhadap hama, bioteknologi dapat berperan penting dalam memenuhi permintaan pangan global selain mengurangi ketergantungan pada input kimia (Min, 2025; Gurjar, 2025). Pendekatan ini tidak hanya memastikan hasil panen yang lebih tinggi tetapi juga berkontribusi pada kesehatan tanah dengan mengurangi kebutuhan akan pupuk dan pestisida kimia, yang pada akhirnya mengarah pada praktik pertanian yang lebih berkelanjutan (Kumar et al., 2024).

Selain itu, bioteknologi mikroba dan penggunaan biofertilizer sangat penting dalam meningkatkan kesehatan tanah dan produktivitas tanaman. Inokulan mikroba meningkatkan efektivitas nutrisi dan mempercepat pertumbuhan tanaman, yang vital untuk praktik pertanian berkelanjutan (Priyadarshini et al., 2024). Praktik ini tidak hanya meningkatkan efisiensi tetapi juga mengurangi jejak lingkungan dengan meminimalkan ketergantungan pada pupuk sintetis. Selain itu, integrasi pestisida biologis dapat menghasilkan pengendalian hama yang efektif sambil mempromosikan keseimbangan ekologi dan keberlanjutan dalam sistem pertanian (Capozzi dkk., 2021; Sisodiya, 2024).

Implementasi praktik pertanian konservasi, seperti yang ditekankan dalam studi-studi terbaru, sejalan dengan kemajuan bioteknologi. Pertanian konservasi berfokus pada prinsip-prinsip gangguan tanah minimal, penanaman tanaman penutup, dan rotasi tanaman, yang dapat ditingkatkan

melalui alat bioteknologi yang mempromosikan kesehatan tanah dan keanekaragaman hayati (Giller dkk., 2015). Selain itu, praktik-praktik ini berfungsi sebagai penyangga terhadap variabilitas iklim, secara efektif mengurangi dampak perubahan iklim pada pertanian, sehingga berkontribusi pada tujuan keberlanjutan jangka panjang (Badiyal dkk., 2024).

Kerangka kebijakan seperti strategi "*Farm to Fork*" Uni Eropa mengadvokasi pendekatan seimbang yang mendukung baik bioteknologi maupun pertanian organik. Strategi ini mengakui potensi bioteknologi dalam meningkatkan keberlanjutan, sehingga menyediakan jalur terstruktur menuju paradigma pertanian modern dan berkelanjutan (Purnhagen dkk., 2021). Pendekatan ganda ini esensial untuk mendorong inovasi selain memastikan praktik-praktik tersebut ramah lingkungan dan dapat diterima secara sosial, sehingga memperkuat kepercayaan publik terhadap kemajuan pertanian (Hamid dkk., 2024).

Akhirnya, pendidikan dan kesadaran publik harus diprioritaskan untuk memfasilitasi adopsi inovasi bioteknologi dalam pertanian. Dengan mengintegrasikan pendidikan pertanian modern dengan prinsip-prinsip keberlanjutan, pemangku kepentingan dapat didorong untuk mengadopsi teknologi baru dalam berbagai praktik pertanian (Ahlawat dkk., 2024). Keterlibatan publik dan penyebaran pengetahuan tentang manfaat bioteknologi dapat mendorong penerimaan dan upaya kolaboratif dalam menerapkan praktik berkelanjutan.

Secara ringkas, mencapai pertanian berkelanjutan melalui bioteknologi memerlukan pendekatan multidimensi yang menggabungkan inovasi genetik, teknologi mikroba, praktik konservasi, kebijakan pendukung, dan pendidikan serta penyuluhan yang ditingkatkan. Strategi-strategi yang saling terhubung ini diperlukan untuk membangun kerangka kerja pertanian yang tangguh yang mampu mengatasi tantangan global kontemporer terkait keamanan pangan dan keberlanjutan lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Aguilar-Paredes, A., Valdés, G., & Nuti, M. (2020). Ecosystem functions of microbial consortia in sustainable agriculture. *Agronomy*, 10(12), 1902. <https://doi.org/10.3390/agronomy10121902>
- Ahlawat, U., Naruka, A., Changdeo, W., Rehsawla, R., Sansanwal, R., Mishra, R., ... & Singh, V. (2024). A review of cutting-edge biotechnological solutions for next-generation farming. *Journal of Experimental Agriculture International*, 46(7), 1187-1204. <https://doi.org/10.9734/jeai/2024/v46i72671>
- Akpo, E., Feleke, G., Fikre, A., Chichaybelu, M., Ojiewo, C., & Varshney, R. (2020). Analyzing pathways of nurturing informal seed production into formal private ventures for sustainable seed delivery and crop productivity: experiences from ethiopia. *Sustainability*, 12(17), 6828. <https://doi.org/10.3390/su12176828>
- Amari, M. (2023). Use of biotechnology in improving crop yields and sustainability in south africa. *IJNS*, 3(2), 25-35. <https://doi.org/10.47604/ijns.2176>
- Anushi, A., Saini, S., Krishnamoorthi, A., Kumar, S., Pareta, P., Kalaiselvi, P., ... & Singh, A. (2024). Biotech bounty on verge: gm (genetically modified) crops and the science of sustainable agriculture and horticulture. *Plant Archives*, 24(1). <https://doi.org/10.51470/plantarchives.2024.v24.no.1.064>
- Anyshchenko, A. (2022). Aligning policy design with science to achieve food security: the contribution of genome editing to sustainable agriculture. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.897643>
- Arneth, A., Shin, Y., Leadley, P., Rondinini, C., Bukvareva, E., Kolb, M., ... & Saitô, O. (2020). Post-2020 biodiversity targets need to embrace climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(49), 30882-30891. <https://doi.org/10.1073/pnas.2009584117>
- Assaye, Y. (2024). Enhancing rice seed production in ethiopia with silicon-rich biochar. *RD*, 5(3), 94-96. <https://doi.org/10.11648/j.rd.20240503.13>
- Badiyal, A., Mahajan, R., Rana, R., Sood, R., Walia, A., Rana, T., ... & Jayswal, D. (2024). Synergizing biotechnology and natural farming: pioneering agricultural sustainability through innovative interventions. *Frontiers in Plant Science*, 15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1280846>

- Bagamba, F., Ntakyo, P., Otim, G., Spielman, D., & Campenhout, B. (2023). Policy and performance in uganda's seed sector: opportunities and challenges. *Development Policy Review*, 41(3). <https://doi.org/10.1111/dpr.12665>
- Belasen, A., Bletz, M., Leite, D., Toledo, L., & James, T. (2019). Long-term habitat fragmentation is associated with reduced mhc iib diversity and increased infections in amphibian hosts. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 6. <https://doi.org/10.3389/fevo.2018.00236>
- Bisht, N. and Chauhan, P. (2023). Harvesting tomorrow: embracing new innovations in microbial biotechnology for smart farming and sustainable agriculture. *International Journal of Contemporary Microbiology*, 9(2), 1-3. <https://doi.org/10.37506/ijcmicro.v9i2.20251>
- Bousmid, A. (2024). Seminar proceedings. *UAB*, 3(2), 1-59. <https://doi.org/10.35788/uab.v3i2.122>
- Capozzi, V., Fragasso, M., & Bimbo, F. (2021). Microbial resources, fermentation and reduction of negative externalities in food systems: patterns toward sustainability and resilience. *Fermentation*, 7(2), 54. <https://doi.org/10.3390/fermentation7020054>
- Chen, S., Liu, W., Yan, Z., Morel, J., Parsons, D., & Du, T. (2023). Adaptation strategy can ensure seed and food production with improving water and nitrogen use efficiency under climate change. *Earth S Future*, 11(2). <https://doi.org/10.1029/2022ef002879>
- Ciliberto, F., Moschini, G., & Perry, E. (2019). Valuing product innovation: genetically engineered varieties in us corn and soybeans. *The Rand Journal of Economics*, 50(3), 615-644. <https://doi.org/10.1111/1756-2171.12290>
- Das, S., Ray, M., Panday, D., & Mishra, P. (2023). Role of biotechnology in creating sustainable agriculture. *Plos Sustainability and Transformation*, 2(7), e0000069. <https://doi.org/10.1371/journal.pstr.0000069>
- DeWoody, J., Harder, A., Mathur, S., & Willoughby, J. (2021). The long-standing significance of genetic diversity in conservation. *Molecular Ecology*, 30(17), 4147-4154. <https://doi.org/10.1111/mec.16051>
- Expósito-Alonso, M., Booker, T., Czech, L., Gillespie, L., Hateley, S., Kyriazis, C., ... & Zess, E. (2022). Genetic diversity loss in the anthropocene. *Science*, 377(6613), 1431-1435. <https://doi.org/10.1126/science.abn5642>
- Falade, A., Adewole, K., & Ekundayo, T. (2021). Aptitude of endophytic microbes for production of novel biocontrol agents and industrial

- enzymes towards agro-industrial sustainability. Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s43088-021-00146-3>
- Fargeot, L., Poésy, C., Lefort, M., Prunier, J., Krick, M., Verdonck, R., ... & Blanchet, S. (2025). Genetic diversity affects ecosystem functions across trophic levels as much as species diversity, but in an opposite direction. *Elife*, 13. <https://doi.org/10.7554/elife.100041.4>
- Giller, K., Andersson, J., Corbeels, M., Kirkegaard, J., Mortensen, D., Erenstein, O., ... & Vanlauwe, B. (2015). Beyond conservation agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 6. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00870>
- Guan, B., Gao, J., Chen, W., Gong, X., & Ge, G. (2021). The effects of climate change on landscape connectivity and genetic clusters in a small subtropical and warm-temperate tree. *Frontiers in Plant Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.671336>
- Gurjar, T. (2025). Biotechnology and sustainable agriculture practices. *IJEMMASS*, 07(03(I)), 1-8. [https://doi.org/10.62823/ijemmass/7.3\(i\).7803](https://doi.org/10.62823/ijemmass/7.3(i).7803)
- Hamid, M., Rahaman, I., & Singh, A. (2024). Vikshit bharaT @ 2047: pathway to sustainable agriculture development in india. *IJARCMSS*, 07(03(I)), 137-145. [https://doi.org/10.62823/ijarcms/7.3\(i\).6820](https://doi.org/10.62823/ijarcms/7.3(i).6820)
- Hisano, M., Searle, E., & Chen, H. (2017). Biodiversity as a solution to mitigate climate change impacts on the functioning of forest ecosystems. *Biological Reviews*, 93(1), 439-456. <https://doi.org/10.1111/brv.12351>
- Hoffman, N. (2022). Usda's revised biotechnology regulation's contribution to increasing agricultural sustainability and responding to climate change. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.105552>
- Hùng, N., Stuart, A., Nguyen, T., Pham, T., Nguyen, N., Pame, A., ... & Singleton, G. (2022). An assessment of irrigated rice cultivation with different crop establishment practices in vietnam. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-04362-w>
- Inclán, D., Cerretti, P., Gabriel, D., Benton, T., Sait, S., Kunin, W., ... & Marini, L. (2015). Organic farming enhances parasitoid diversity at the local and landscape scales. *Journal of Applied Ecology*, 52(4), 1102-1109. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12457>
- Kaloom, M., Rehman, F., Shafique, T., Junaid, S., KHALID, N., Adnan, M., ... & Husnain, A. (2020). Biological importance of microbes in

- agriculture, food and pharmaceutical industry: a review. *Innovare Journal of Life Sciences*, 1-4. <https://doi.org/10.22159/ijls.2020.v8i6.39845>
- Kaya, C. (2025). Vulnerability of fruit cultivation to climate change and suggested solutions: modern biotechnological approaches (crispr/cas9 and rnai). *Anadolu Ege Tarımsal Araştırma Enstitüsü Dergisi*, 35(1), 131-144. <https://doi.org/10.18615/anadolu.1605478>
- Kolur, S., Burud, A., Ramasamy, M., Sampath, V., Chellem, S., Satapathy, S., ... & Rout, A. (2024). A review on biotech innovations in seed technology for robust crop production. *Journal of Advances in Biology & Biotechnology*, 27(5), 535-550. <https://doi.org/10.9734/jabb/2024/v27i5816>
- Kotschi, J. and Horneburg, B. (2018). The open source seed licence: a novel approach to safeguarding access to plant germplasm. *Plos Biology*, 16(10), e3000023. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3000023>
- Kumar, R., Senthamizhkumaran, V., Alagendran, S., Chitra, M., Kumar, K., Tyagi, T., ... & Tyagi, A. (2024). Advances in agricultural biotechnology: enhancing productivity and sustainability in India: a review. *Journal of Scientific Research and Reports*, 30(7), 366-383. <https://doi.org/10.9734/jsrr/2024/v30i72154>
- Lim, C., Kang, J., Bayartogtokh, B., & Bae, Y. (2024). Climate change will lead to range shifts and genetic diversity losses of dung beetles in the gobi desert and mongolian steppe. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-66260-1>
- Macdonald, E., Cushman, S., Landguth, E., Hearn, A., Malhi, Y., & Macdonald, D. (2018). Simulating impacts of rapid forest loss on population size, connectivity and genetic diversity of sunda clouded leopards (*neofelis diardi*) in borneo. *Plos One*, 13(9), e0196974. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0196974>
- Marques, A., Martins, I., Kästner, T., Plutzar, C., Theurl, M., Eisenmenger, N., ... & Pereira, H. (2019). Increasing impacts of land use on biodiversity and carbon sequestration driven by population and economic growth. *Nature Ecology & Evolution*, 3(4), 628-637. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-0824-3>
- McEwan, M., Almekinders, C., Andrade-Piedra, J., Delaquis, E., Garrett, K., Kumar, P., ... & Thiele, G. (2021). "breaking through the 40% adoption ceiling: mind the seed system gaps." a perspective on seed systems research for development in one CGIAR. *Outlook on Agriculture*, 50(1), 5-12. <https://doi.org/10.1177/0030727021989346>

- Meng, F., Qiao, Y., Wu, W., Smith, P., & Scott, S. (2017). Environmental impacts and production performances of organic agriculture in china: a monetary valuation. *Journal of Environmental Management*, 188, 49-57. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.11.080>
- Min, J. (2025). Biotechnology in farming and its role in achieving sdg 2. *Int. J. Environ. Sci.*, 1698-1706. <https://doi.org/10.64252/x1jwbb63>
- Miraldo, A., Li, S., Borregaard, M., Flórez-Rodríguez, A., Gopalakrishnan, S., Rizvanovic, M., ... & Nogués-Bravo, D. (2016). An anthropocene map of genetic diversity. *Science*, 353(6307), 1532-1535. <https://doi.org/10.1126/science.aaf4381>
- Modjo, A., Tapi, T., Safruddin, S., Ansar, M., & Fitriani, D. (2024). Harnessing technology for agricultural sustainability: case studies and future directions. *join*, 1(3), 270-280. <https://doi.org/10.59613/n2nrg748>
- Moraes, A., Souza, R., Júnior, O., Cavalcanti, R., Damascena, K., Silva, A., ... & Costa, D. (2025). Sustainability in focus: the role of biotechnology in waste management and the environment. *Revista De Gestão Social E Ambiental*, 19(4), e011823. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v19n4-014>
- Musoke, C., Kyazze, F., Kibwika, P., & Mukasa, S. (2024). Farmers' purchase intention and willingness to pay for certified sweetpotato seed under different disease pressure zones in uganda. *Crop Science*, 64(3), 1349-1368. <https://doi.org/10.1002/csc2.21192>
- Nainggolan, T., Ambarita, T., Nababan, G., Pulungan, A., & Situmorang, N. (2024). Analysis application of bioethical principles in horticultural seeds production at horticultural seed development medan. *Jurnal Agri-Tek Jurnal Penelitian Ilmu-Ilmu Eksakta*, 25(2), 30-36. <https://doi.org/10.33319/agtek.v25i2.163>
- Nautiyal, C., Nautiyal, P., Papnai, G., Mittal, H., Agrawal, K., Khandelwal, S., ... & Nandini, R. (2024). Importance of smart agriculture and use of artificial intelligence in shaping the future of agriculture. *Journal of Scientific Research and Reports*, 30(3), 129-138. <https://doi.org/10.9734/jsrr/2024/v30i31864>
- Naz, R., Hanif, M., Dogar, W., Umar, M., Nigar, Q., Arif, U., ... & Kabir, R. (2024). Aeroponic seed potato production: a promising and sustainable strategy for seed potato production in pakistan. *Pakistan Journal of Biotechnology*, 21(1), 87-91. <https://doi.org/10.34016/pjbt.2024.21.01.838>
- Nazarova, N., Sazhneva, L., Sakhbieva, A., & Kokhreidze, M. (2024). Biotechnology and its contribution to the agricultural economy: using

- microbes for increasing crop yields. *Bio Web of Conferences*, 141, 01024. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202414101024>
- O'Brien, D., Bader, E., Hall, J., Hoban, S., Segelbacher, G., Vilaça, S., ... & Leigh, D. (2025). Genetic diversity is key to a nature-positive future. *People and Nature*. <https://doi.org/10.1002/pan3.70155>
- Oliveira, L. and Cardoso, E. (2021). A project-based learning approach to promote innovation and academic entrepreneurship in a master's degree in food engineering. *Journal of Food Science Education*, 20(4), 120-129. <https://doi.org/10.1111/1541-4329.12230>
- Pasha, M., Naresh, S., & Alekhya, D. (2025). Biotechnology and waste management synergies transforming industrial by-products for eco-friendly green building solutions. *Journal of Construction and Building Materials Engineering*, 11(2), 8-23. <https://doi.org/10.46610/jocbme.2025.v011i02.002>
- Pasupuleti, M. (2025). Digital genomics and ai in agri-biotech: innovations for climate-resilient food futures. *IJAIRI*, 05(08), 31-48. <https://doi.org/10.62311/nesx/rp-2-aug-25>
- Pasupuleti, M. (2025). Next-gen food security: ai and biotech innovations for sustainable agriculture. *IJAIRI*, 05(05), 16-28. <https://doi.org/10.62311/nesx/rp05113>
- Pathak, S., Sarang, D., Singh, J., Kumar, V., Naan, T., & Bisht, V. (2025). The ethics of growth: environmental and moral implications of seed technology in modern agriculture. *Journal of Advances in Biology & Biotechnology*, 28(7), 748-757. <https://doi.org/10.9734/jabb/2025/v28i72592>
- Patyal, D., Sachdeva, K., Sharma, K., -, R., Panigrahi, C., Tutlani, A., ... & Khan, R. (2025). An innovative and sustainable seed coating technology for improving seed quality and crop performance. *Journal of Scientific Research and Reports*, 31(5), 597-607. <https://doi.org/10.9734/jsrr/2025/v31i53056>
- Pereira, A., Oliveira, H., Fraceto, L., & Santaella, C. (2021). Nanotechnology potential in seed priming for sustainable agriculture. *Nanomaterials*, 11(2), 267. <https://doi.org/10.3390/nano11020267>
- Priyadarshini, S., Mulage, P., Conchita, S., Pavani, P., Wasule, D., B, C., ... & Ashwini, K. (2024). Microbial biotechnology: innovations for crop protection and improvement. *Journal of Advances in Biology & Biotechnology*, 27(7), 238-256. <https://doi.org/10.9734/jabb/2024/v27i7984>

- Purnhagen, K., Clemens, S., Eriksson, D., Fresco, L., Tosun, J., Qaim, M., ... & Zilberman, D. (2021). Europe's farm to fork strategy and its commitment to biotechnology and organic farming: conflicting or complementary goals?. *Trends in Plant Science*, 26(6), 600-606. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2021.03.012>
- Qiao, Y., Halberg, N., Vaheesan, S., & Scott, S. (2015). Assessing the social and economic benefits of organic and fair trade tea production for small-scale farmers in asia: a comparative case study of china and sri lanka. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 31(3), 246-257. <https://doi.org/10.1017/s1742170515000162>
- Rabeena, I. (2025). The warming threat: climate change is devastating honeybee populations. *Asian Journal of Environment & Ecology*, 24(7), 263-275. <https://doi.org/10.9734/ajee/2025/v24i7767>
- Raffard, A., Cucherousset, J., Montoya, J., Richard, M., Acoca-Pidolle, S., Poésy, C., ... & Blanchet, S. (2021). Intraspecific diversity loss in a predator species alters prey community structure and ecosystem functions. *Plos Biology*, 19(3), e3001145. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3001145>
- Rathore, M., Mahakul, A., Tiwari, K., Prajapati, R., Maheshwari, N., Yadav, R., ... & Singh, Y. (2025). Review on aeroponics based potato seed production for food security and sustainable agriculture. *AATCC Review*, 13(1), 21-29. <https://doi.org/10.21276/aatccreview.2025.13.01.20>
- Rizvanovic, M., Kennedy, J., Nogués-Bravo, D., & Marske, K. (2018). Persistence of genetic diversity and phylogeographic structure of three new zealand forest beetles under climate change. *Diversity and Distributions*, 25(1), 142-153. <https://doi.org/10.1111/ddi.12834>
- Sahu, S. and Prayagraj, S. (2023). Sowing for success: the nexus between seed quality enhancement in natural farming and india's sustainable agricultural evolution. *International Journal of Research Publication and Reviews*, 4(10), 1075-1079. <https://doi.org/10.55248/gengpi.4.1023.102618>
- Sampath, V., Rangarajan, N., Sharanappa, C., Deori, M., Veeraragavan, M., Ghodake, B., ... & Kaushal, K. (2023). Advancing crop improvement through crispr technology in precision agriculture trends-a review. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(11), 4683-4694. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2023/v13i113647>

- Sankhyan, S., Singh, G., Singh, B., Kaur, V., & Singh, B. (2025). Optimizing sowing depth and seed rate for enhanced growth and yield of chickpea (*cicer arietinum* L.): a review. *Asian Journal of Advances in Agricultural Research*, 25(5), 89-98. <https://doi.org/10.9734/ajaar/2025/v25i5619>
- Seid, A. and Andualem, B. (2021). The role of green biotechnology through genetic engineering for climate change mitigation and adaptation, and for food security: current challenges and future perspectives. *Journal of Advances in Biology & Biotechnology*, 1-11. <https://doi.org/10.9734/jabb/2021/v24i130192>
- Shaw, R., Farquharson, K., Bruford, M., Coates, D., Elliott, C., Mergeay, J., ... & Grueber, C. (2025). Global meta-analysis shows action is needed to halt genetic diversity loss. *Nature*, 638(8051), 704-710. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08458-x>
- Sisodiya, A. (2024). Biotechnology's benefits to agriculture: increasing crop production and quality. *Current Research in Agriculture and Farming*, 5(4), 1-15. <https://doi.org/10.18782/2582-7146.215>
- Smith, O., Cohen, A., Reganold, J., Jones, M., Orpet, R., Taylor, J., ... & Crowder, D. (2020). Landscape context affects the sustainability of organic farming systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(6), 2870-2878. <https://doi.org/10.1073/pnas.1906909117>
- Tang, T., Zhang, N., Bongers, F., Staab, M., Schuldt, A., Fornoff, F., ... & Liu, X. (2022). Tree species and genetic diversity increase productivity via functional diversity and trophic feedbacks. *Elife*, 11. <https://doi.org/10.7554/elife.78703>
- Torre-Roche, R., Cantu, J., Tamez, C., Zuverza-Mena, N., Hamdi, H., Adisa, I., ... & White, J. (2020). Seed biofortification by engineered nanomaterials: a pathway to alleviate malnutrition? *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(44), 12189-12202. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c04881>
- Tufail, M., Krebs, G., Quddus, M., Southwell, A., Piltz, J., Norton, M., ... & Wynn, P. (2025). Empowering smallholder farmers by integrating participatory research and establishing village-based forage seed enterprises to enhance on-farm productivity and local seed supply. *Seeds*, 4(3), 40. <https://doi.org/10.3390/seeds4030040>
- Uhunamure, S., Kom, Z., Shale, K., Nethengwe, N., & Steyn, J. (2021). Perceptions of smallholder farmers towards organic farming in south africa. *Agriculture*, 11(11), 1157. <https://doi.org/10.3390/agriculture11111157>

- Verma, S. (2024). Biotechnological and genetic strategies for enhancing seed quality and vigor: advances, applications, and future prospects. *Quest Journals*, 11(12), 39-45. <https://doi.org/10.35629/9459-11123945>
- Walker, E., Wooliver, R., Russo, L., & Jagadamma, S. (2024). The context-dependent benefits of organic farming on pollinator biodiversity: a meta-analysis. *Journal of Applied Ecology*, 62(1), 41-52. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14826>
- Yanakittkul, P. and Aungvaravong, C. (2020). A model of farmers intentions towards organic farming: a case study on rice farming in thailand. *Heliyon*, 6(1), e03039. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e03039>
- Yu, L., Song, Y., Wu, H., & Shi, H. (2023). Credit constraint, interlinked insurance and credit contract and farmers' adoption of innovative seeds-field experiment of the loess plateau. *Land*, 12(2), 357. <https://doi.org/10.3390/land12020357>
- Zhang, L. and Han, G. (2018). A review on the relationships between plant genetic diversity and ecosystem functioning. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42(10), 977-989. <https://doi.org/10.17521/cjpe.2018.0013>

GLOSARIUM

Singkatan / Istilah	Kepanjangan / Arti Lengkap	Keterangan / Konteks Penggunaan
GMP	<i>Good Manufacturing Practices</i>	Sistem standar internasional untuk menjamin mutu dan keamanan produk selama proses produksi.
QA/QC	<i>Quality Assurance / Quality Control</i>	QA = penjaminan mutu (proses preventif), QC = pengendalian mutu (pengujian hasil akhir).
SOP	<i>Standard Operating Procedure</i>	Prosedur standar operasional yang harus diikuti dalam setiap tahap produksi.
qPCR	<i>Quantitative Polymerase Chain Reaction</i>	Teknik molekuler untuk mendeteksi dan mengukur jumlah DNA target secara real-time.
PCR	<i>Polymerase Chain Reaction</i>	Metode amplifikasi DNA untuk identifikasi genetik dan deteksi patogen.
Ct	<i>Cycle Threshold</i>	Nilai ambang pada qPCR yang menunjukkan siklus ketika sinyal fluoresen melebihi latar belakang; digunakan menentukan positif/negatif.
CFU	<i>Colony Forming Unit</i>	Satuan pengukuran jumlah koloni mikroba hidup per volume atau area.
HEPA	<i>High Efficiency Particulate Air (Filter)</i>	Filter udara efisiensi tinggi untuk menjaga kondisi aseptik dalam ruang kultur.
APD	<i>Alat Pelindung Diri</i>	Perlengkapan keselamatan seperti sarung tangan, masker, jas laboratorium untuk operator kultur jaringan.

**Bioteknologi dalam Produksi
dan Rekayasa Benih Unggul**

SSR	<i>Simple Sequence Repeat</i>	Penanda genetik berbasis mikrosatelit untuk uji kemurnian genetik benih.
SNP	<i>Single Nucleotide Polymorphism</i>	Penanda DNA tunggal untuk identifikasi genetik dan seleksi berbasis genom.
DNA	<i>Deoxyribonucleic Acid</i>	Materi genetik utama yang membawa informasi hereditas tanaman.
LAMP	<i>Loop-Mediated Isothermal Amplification</i>	Metode amplifikasi DNA cepat dan sederhana untuk deteksi patogen di lapangan.
ELISA	<i>Enzyme-Linked Immunosorbent Assay</i>	Teknik imunologi untuk mendeteksi antigen atau antibodi, sering digunakan dalam uji kesehatan benih.
G×E	<i>Genotype × Environment Interaction</i>	Interaksi antara genotipe tanaman dan kondisi lingkungan yang memengaruhi performa fenotipik.
LOD	<i>Limit of Detection</i>	Batas minimal jumlah DNA atau mikroorganisme yang dapat dideteksi oleh metode analisis.
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>	Sistem manajemen terintegrasi untuk pengelolaan data produksi, keuangan, dan distribusi.
LIMS	<i>Laboratory Information Management System</i>	Sistem digital untuk mencatat, menyimpan, dan melacak data laboratorium serta hasil uji.
FIFO	<i>First In, First Out</i>	Prinsip manajemen stok: batch pertama yang diproduksi harus digunakan atau dijual terlebih dahulu.
RH	<i>Relative Humidity</i>	Kelembapan relatif udara di ruang penyimpanan benih.
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>	Lembaga internasional pembuat standar sistem mutu, seperti ISO 9001 dan ISO 17025.

OECD	<i>Organisation for Economic Co-operation and Development</i>	Organisasi internasional yang juga menetapkan <i>OECD Seed Schemes</i> untuk perdagangan benih antarnegara.
ISTA	<i>International Seed Testing Association</i>	Badan internasional yang menetapkan standar pengujian benih.
GMP Audit	<i>Good Manufacturing Practice Audit</i>	Evaluasi rutin untuk memastikan semua proses memenuhi standar GMP.
Pathogen-free	—	Status kultur atau benih bebas dari patogen seperti virus, bakteri, atau jamur.
Autoclave	—	Alat sterilisasi menggunakan uap panas bertekanan untuk mematikan mikroba pada alat/media.
pH	<i>Potential of Hydrogen</i>	Ukuran derajat keasaman/alkalinitas media kultur atau larutan.
Ct Value Range	—	Nilai ambang pada qPCR yang menentukan hasil positif, negatif, atau perlu uji ulang.
Clean Room	—	Ruang aseptik dengan kontrol ketat terhadap partikel dan mikroba udara untuk kultur jaringan.
Planlet	—	Tanaman kecil hasil kultur jaringan sebelum aklimatisasi.
Genotyping	—	Proses analisis DNA untuk menentukan identitas atau variasi genetik suatu organisme.
Phenotyping	—	Pengamatan sifat fisik dan fisiologis tanaman untuk verifikasi hasil genetik.
Traceability	—	Kemampuan melacak asal-usul dan jalur distribusi suatu produk

		dari sumber hingga pengguna akhir.
Batch Record	—	Dokumen yang mencatat seluruh proses dan parameter dari satu batch produksi benih.
Off-target Analysis	—	Analisis kemungkinan efek penyuntingan gen (CRISPR) pada lokasi DNA yang tidak diinginkan.
PGPR	<i>Plant Growth-Promoting Rhizobacteria</i>	Bakteri tanah yang meningkatkan pertumbuhan tanaman dan kesehatan akar.
Bio-coating	—	Pelapisan benih menggunakan bahan biologis seperti mikroba menguntungkan.
Seed Priming	—	Perlakuan awal benih untuk meningkatkan kecepatan dan keseragaman perkecambahan.
Viability Test	—	Uji untuk menentukan persentase benih hidup yang masih mampu berkecambah.
Tetrazolium Test	—	Uji pewarnaan untuk mengukur viabilitas benih melalui aktivitas enzim respirasi.
Melt Curve Analysis	—	Analisis pasca-qPCR untuk memverifikasi spesifisitas amplifikasi DNA.
Bioinformatics	—	Bidang ilmu yang menggabungkan biologi, komputer, dan statistik untuk analisis data genomik.
Digital Traceability	—	Pelacakan proses produksi berbasis sistem digital dan data elektronik (ERP, QR code, blockchain).
Calibration	—	Penyesuaian alat ukur terhadap standar referensi untuk menjaga akurasi hasil.

Proficiency Testing	—	Uji kemampuan laboratorium melalui perbandingan hasil antar-lab untuk validasi mutu.
Chain of Custody	—	Catatan alur kepemilikan dan penanganan sampel dari awal hingga akhir proses pengujian.
Ct ≤ 30 / Ct ≥ 35	—	Interpretasi hasil qPCR: ≤30 positif kuat; 31–35 perlu konfirmasi; ≥35 negatif.

BIODATA PENULIS



Bagus Herwibawa, Ph.D.

Dosen Program Studi Agroekoteknologi
Fakultas Peternakan dan Pertanian
Universitas Diponegoro

Penulis adalah dosen tetap di Fakultas Peternakan dan Pertanian, Universitas Diponegoro (UNDIP), pada Program Studi Agroekoteknologi dan aktif di Laboratorium Fisiologi dan Pemuliaan Tanaman sejak 2015. Selain itu, penulis pernah menjadi dosen tamu di Program Studi Bioteknologi, Fakultas Sains dan Matematika UNDIP. Mata kuliah yang pernah diampu meliputi Bioteknologi Tanaman, Bioteknologi Tanaman Pakan, Dasar Pemuliaan Tanaman, Teknologi Pemuliaan Tanaman, Genetika Tanaman, Biokimia Tanaman, Teknologi Benih, serta Produksi dan Penyimpanan Benih.

Lahir di Kudus, penulis menempuh pendidikan dasar hingga menengah di kota tersebut. Gelar Sarjana Pertanian diperoleh pada tahun 2011 dari Program Studi Pemuliaan Tanaman, Fakultas Pertanian, Universitas Gadjah Mada. Selanjutnya, gelar Magister Pertanian bidang Agronomi diraih pada tahun 2013 di Universitas Jenderal Soedirman. Minatnya pada pemuliaan tanaman berbantuan penanda molekuler membawanya memperoleh tugas belajar di Chulalongkorn University, Thailand, dan meraih gelar Doktor Bioteknologi pada tahun 2023.

Bidang penelitian penulis berfokus pada pengembangan teknologi pemuliaan tanaman berbasis bioinformatika dan penanda molekuler, rekayasa genetika, serta integrasi data genomik, transkriptomik, proteomik, dan fenotipik. Tujuannya adalah mempercepat seleksi varietas unggul, terutama yang memiliki ketahanan terhadap cekaman abiotik. Melalui kegiatan pendidikan, penelitian, dan pengabdian masyarakat, penulis berupaya menghubungkan hasil riset dengan penerapan nyata di lapangan. Ia meyakini bahwa kemajuan pertanian masa depan memerlukan inovasi berbasis sains untuk menjawab tantangan produktivitas dan keberlanjutan.

Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: bagus.herwibawa@live.undip.ac.id

BIODATA PENULIS



Prof. Ir. Kacung Hariyono, M.S., Ph.D.

Dosen Program Studi Magister Agronomi
Fakultas Pertanian
Universitas Jember

Penulis lahir di Banyuwangi tanggal 14 Agustus 1964. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Magister Agronomi Fakultas Pertanian Universitas Jember. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Budidaya Pertanian, dan melanjutkan S2 pada Program Studi Agronomi dan Pendidikan S3 pada Bidang Biologi Lingkungan. Selain aktif bekerja, penulis juga menekuni bidang tulis menulis.

Bidang riset yang di tekuni adalah Pemuliaan Tanaman dengan fokus pada Pelestarian genetik tanaman. Penelitian Disertasi adalah keragaman genetik dan propagasi *Corynanthera flava*, tanaman bunga liar langka endemik Australia warna kuning keemasan pada tahun 1999 sampai dengan 2002. Karya-karya yang sudah dipublikasikan baik di jurnal nasional terakreditasi maupun internasional bereputasi yang tercatat di SINTA berupa 11 dokumen Scopus, 2 Dokumen WOS, 70 dokumen GS, 40 dokumen Garuda.

Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: kacunghariyono.faperta@unej.ac.id

BIODATA PENULIS



Rina Puji Lestari, S.P., M.P.

Dosen Program Studi Pengelolaan Perkebunan
Politeknik LPP Yogyakarta

Penulis lahir di Wonogiri tanggal 13 Mei 1995. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Pengelolaan Perkebunan, Politeknik LPP Yogyakarta. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Agroteknologi minat Agronomi Universitas Sebelas Maret dan melanjutkan S2 pada Jurusan Agronomi Universitas Sebelas Maret. Selain aktif bekerja, penulis juga menekuni bidang tulis menulis. Beberapa tulisan artikel tentang tanaman obat dan komoditas pangan juga sudah ditulis dan dipublish pada jurnal dan prosiding baik nasional maupun internasional. Buku Bioteknologi dalam Produksi dan Rekayasa Benih Unggul ini merupakan buku ketiga yang ditulis oleh penulis.

Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: prina207@gmail.com.

BIODATA PENULIS



Zahrotun Nafisah, M.Si.

Dosen Biokimia Program Studi Kimia
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Palangka Raya

Penulis lahir di Sidoarjo, Jawa Timur, pada tahun 1997 dan telah menjadi dosen tetap sejak masih berusia 24 tahun di PTN di Kalimantan Tengah. Sejak menjadi dosen pada tahun 2022 sampai tahun 2025, penulis telah mendapatkan 15 hibah penelitian dan pengabdian yang berasal dari PNPB Universitas, kementerian pendidikan tinggi, sains, dan teknologi, serta Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Penulis menyelesaikan pendidikan S1 pada Program Studi Kimia bidang Biokimia Universitas Airlangga Surabaya pada tahun 2019 dan melanjutkan S2 pada program studi Kimia bidang Biokimia Institut Teknologi Bandung pada tahun 2021. Penulis telah banyak melakukan penelitian di bidang biokimia, biologi molekuler, serta struktur dan fungsi protein rekombinan.

Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: nafisah@chem.upr.ac.id

BIODATA PENULIS



Adin Novitasari, S.P., M.P.

Dosen Program Studi Agroteknologi
Fakultas Pertanian
Universitas Jember

Penulis lahir di Blitar tanggal 27 September 1996. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Agroteknologi Fakultas Pertanian Universitas Jember. Menyelesaikan pendidikan S1 pada program studi Agroekoteknologi minat Budidaya Pertanian Universitas Brawijaya dan melanjutkan S2 pada program studi Agronomi minat Pemuliaan dan Bioteknologi Tanaman Universitas Brawijaya. Selain aktif bekerja, penulis juga menekuni bidang tulis menulis.

Saat ini penulis telah menerbitkan beberapa jurnal ilmiah dan buku yang berkaitan dengan bidang pertanian. Buku yang telah ditulis antara lain Strategi Manipulasi Agroekosistem (2020), Cekaman Air dan Kehidupan Tanaman (2022) dan Manajemen Pertanaman: Strategi Budidaya untuk Produktivitas dan Keberlanjutan (2025). Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: adinnovy@unej.ac.id

BIODATA PENULIS



Erlin Susilowati, S.P., M.Biotek.

Program Studi Teknologi Produksi Tanaman Pangan
Jurusan Pertanian
Politeknik Negeri Banyuwangi

Penulis lahir di Jember tanggal 15 Maret 1996. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknologi Produksi Tanaman Pangan, Jurusan Pertanian, Politeknik Negeri Banyuwangi. Penulis menyelesaikan pendidikan S1 pada Program Studi Agroteknologi dan melanjutkan S2 pada Program Studi Bioteknologi Universitas Jember.

Penulis menekuni penelitian di bidang bioteknologi tanaman, khususnya tanaman pangan. Beberapa penelitian yang dilakukan telah dipublikasikan pada beberapa jurnal nasional maupun internasional. Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: erlin@poliwangi.ac.id.

BIODATA PENULIS



Prof. Dr. Ir. Sakka Samudin, MP. IPM. Asean Eng
Dosen Program Studi Agroteknologi
Fakultas Pertanian
Universitas Tadulako

Penulis lahir di Tentena Kabupaten Poso Provinsi Sulawesi Tengah tanggal 28 Desember 1966. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Agroteknologi Fakultas Pertanian Universitas Tadulako. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Budidaya Pertanian Universitas Tadulako, tahun 1990. Strata dua pada Program Studi Magister Ilmu Pertanian Universitas Brawijaya, lulus tahun 1997. Strata tiga pada Program Doktor Ilmu Pertanian Universitas Brawijaya Malang, lulus tahun 2002. Penulis mengajar Mata kuliah Genetika dan Pemuliaan Tanaman, Pemuliaan Tanaman Lanjutan, Bioteknologi Pertanian, Teknologi Produksi Bahan Tanam, Teknologi Produksi Benih Unggul, dan Teknik Penelitian dan Penulisan Ilmiah. Selain mengajar, penulis telah menulis beberapa buku yaitu Pemuliaan Tanaman I suatu konsep dasar, Pemuliaan Tanaman II suatu konsep Teoritis, Pemuliaan Tanaman III suatu terapan, dan Parameter Genetik Tanaman Tembakau Madura, Keragaman genetik padi gogo : landasan untuk pemuliaan tanaman berkelanjutan, Produksi dan penanganan benih bawang merah Varietas Lembah Palu (VLP), Budidaya, Fermentasi, dan Pengolahan Biji Kakao Menjadi Blok Cokelat, Experimental Impact of Drought on Germination of Upland Rice Using PEG 6000, Dasar-Dasar Agronomi dan Sistem Pertanian Terpadu dan Teknologi Produksi Tanaman Pangan. Artikel yang ditulis telah diterbitkan pada jurnal nasional terakreditasi kementerian pendidikan tinggi, terakreditasi internasional maupun bereputasi.

Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: sakka01@yahoo.com

BIODATA PENULIS



Primadiyanti Arsela, S.Hut., M.Si.

Dosen Program Studi Agroteknologi
Fakultas Pertanian & Bisnis Digital
Universitas Muhammadiyah Kalimantan Timur

Penulis lahir di Semarang pada tanggal 30 Agustus 1984. Penulis merupakan dosen tetap pada Program Studi Agroteknologi Fakultas Pertanian dan Bisnis Digital Universitas Muhammadiyah Kalimantan Timur. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Prodi Teknologi Hasil Hutan di Universitas Lambung Mangkurat dan melanjutkan S2 pada Prodi Pemuliaan dan Bioteknologi Tanaman di Institut Pertanian Bogor. Setelah pendidikan terakhir, penulis terus menekuni bidang Pemuliaan dan Bioteknologi Tanaman dengan fokus mengembangkan Laboratorium Kultur Jaringan Tanaman di Universitas Muhammadiyah Kalimantan Timur. Beberapa komoditi lokal yang dikembangkan antara lain tanaman Kantong Semar, Anggrek, dan Jeruk. Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: pa465@umkt.ac.id

BIODATA PENULIS



Rahmatun Nisful Maghfiroh, S.P., M.Si.

Dosen Program Studi Agroteknologi

Fakultas Pertanian

Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jawa

Timur

Penulis lahir di Ngawi tanggal 4 Desember 1998. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Agroteknologi Fakultas Pertanian Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jawa Timur. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Agronomi dan Hortikultura Institut Pertanian Bogor dan melanjutkan S2 pada Jurusan Pemuliaan dan Bioteknologi Tanaman Institut Pertanian Bogor. Selain aktif bekerja, penulis juga menekuni bidang tulis menulis.

Penulis memiliki minat pada keilmuan pemuliaan tanaman, khususnya pada tanaman hortikultura semusim. Selama kuliah dan bekerja, penulis memiliki pengalaman dalam kegiatan pemuliaan tanaman melon, cabai besar, paprika, dan papaya. Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: rahmatun_nisful.agrotek@upnjatim.ac.id.

BIODATA PENULIS



Ir. Sundahri, PGDip.Agr.Sc., M.P.

Dosen Program Studi Agronomi
Fakultas Pertanian
Universitas Jember

Penulis lahir di Pamekasan tanggal 12 April 1967; menjadi dosen tetap pada Program Studi Agronomi, Jurusan Agronomi, Fakultas Pertanian, Universitas Jember melalui Ikatan Dinas dari Departemen Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia.

Bapak dua anak ini menyelesaikan pendidikan Program S1 pada Jurusan Budidaya Pertanian Universitas Jember dan melanjutkan Program Postgraduate Diploma in Agricultural Science, La Trobe University, Melbourne. Kemudian menyelesaikan Program S2 pada Program Studi Magister Agronomi Program Pascasarjana Universitas Jember. Selain aktif bekerja, Penulis juga mulai menekuni bidang tulis-menulis sebagai salah satu tanggung jawab sebagai Ketua Bidang Komunikasi dan Publikasi Perhimpunan Agronomi Indonesia (PERAGI) Komisariat Jawa Timur selain fotografi dan videografi.

Penulis sekaligus fotografer ini pernah memenangkan berbagai perlombaan fotografi dan mendapatkan beberapa penghargaan di tingkat regional, nasional dan internasional. Salah satunya adalah penghargaan dari Presiden Republik Indonesia sebagai Juara 3 Kategori Umum dalam Lomba Foto Indonesia Piala Presiden tahun 2012 dan piagam penghargaan dari Menteri Pariwisata Ekonomi Kreatif pada acara yang sama. Karena itu, Penulis sering menjadi juri dalam beberapa event lomba fotografi di tingkat nasional dan beberapa kali sebagai pemateri fotografi.

Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: sundahri.faperta@unej.ac.id.

BIODATA PENULIS



Dr. Ir. Ellok Dwi Sulichantini, M.Si.
Dosen Program Studi Agroekoteknologi
Fakultas Pertanian
Universitas Mulawarman

Penulis lahir di Lamongan Jawa Timur, bekerja sebagai dosen di Fakultas Pertanian Universitas Mulawarman sejak tahun 1989 sampai sekarang. Menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Program Studi Agronomi di Fakultas Pertanian Universitas Mulawarman pada tahun 1987. Pendidikan S2 di Program Studi Agronomi, Sub Program Studi Pemuliaan Tanaman Non Konvensional di Institut Pertanian Bogor lulus pada tahun 1998. Pendidikan S3 dilaksanakan pada Program Studi Ilmu Kehutanan di Fakultas Kehutanan Universitas Mulawarman lulus pada tahun 2015. Penulis aktif melakukan kegiatan pendidikan, penelitian, dan pengabdian masyarakat di bidang pertanian.

Email: ellok.sulichantini1@gmail.com

BIODATA PENULIS



Henny Diana Wati, SP., MP.
Dosen Program Studi Agribisnis
Fakultas Pertanian
Universitas Wiraraja

Penulis lahir di Sumenep tanggal 31 Juli 1979. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Agribisnis Fakultas Pertanian Universitas Wiraraja. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Agronomi Universitas Jember (lulus tahun 2002) dan melanjutkan S2 pada Jurusan Agronomi Universitas Jember (lulus tahun 2004). Saat ini dosen tetap di Program Studi Agribisnis Fakultas Pertanian Universitas Wiraraja. Penulis mengampu mata kuliah Dasar-Dasar Agronomi, Dasar Perlindungan Tanaman, Teknologi Pestisida Ramah Lingkungan, Pertanian Terpadu, Agroklimatologi dan Dasar-Dasar Ilmu Tanah. Penulis terlibat aktif dalam kegiatan seminar, penelitian dan pengabdian kepada masyarakat, serta aktif menulis pada berbagai jurnal nasional, jurnal internasional dan book chapter. Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: henny.fp@wiraraja.ac.id.