



TEKNOLOGI DAN PRODUKSI BENIH UNGGUL: KONSEP, PEMULIAAN, DAN IMPLEMENTASI MODERN

PENULIS :

Syaifullah Rahim, Darius Dare, Nouke Lenda Mawikere,
Yuke Mareta Ariesta Sandra, Zarima Wibawati, Trisia Wulantika,
Ummi Sholikhah, Puji Rahayu, Gabriela Welma Litaay, Ratna Ningsi,
Reza Prakoso Dwi Julianto.



ISBN 978-634-255-626-9



9

786342

556269

TEKNOLOGI DAN PRODUKSI BENIH UNGGUL: KONSEP, PEMULIAAN, DAN IMPLEMENTASI MODERN

Syaifullah Rahim

Darius Dare

Nouke Lenda Mawikere

Yuke Mareta Ariesta Sandra

Zarima Wibawati

Trisia Wulantika

Ummi Sholikhah

Puji Rahayu

Gabriela Welma Litaay

Ratna Ningsi

Reza Prakoso Dwi Julianto



GET PRESS INDONESIA

TEKNOLOGI DAN PRODUKSI BENIH UNGGUL: KONSEP, PEMULIAAN, DAN IMPLEMENTASI MODERN

Penulis :

Syaifullah Rahim
Darius Dare
Nouke Lenda Mawikere
Yuke Mareta Ariesta Sandra
Zarima Wibawati
Trisia Wulantika
Ummi Sholikhah
Puji Rahayu
Gabriela Welma Litaay
Ratna Ningsi
Reza Prakoso Dwi Julianto

ISBN : 978-634-255-626-9

Editor : Diana Purnama Sari., M.E

Penyunting : Tri Putri Wahyuni., S.Pd

Desain Sampul dan Tata Letak : Atyka Trianisa, S.Pd

Penerbit : GET PRESS INDONESIA

Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022

Redaksi :

Jln. Palarik Air Pacah No 26 Kel. Air Pacah
Kec. Koto Tangah Kota Padang Sumatera Barat
Website : www.getpress.co.id
Email : adm.getpress@gmail.com

Cetakan pertama, Juli 2026

Hak cipta dilindungi undang-undang
Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan
dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

KATA PENGANTAR

Segala Puji dan syukur atas kehadiran Allah SWT dalam segala kesempatan. Sholawat beriring salam dan doa kita sampaikan kepada Nabi Muhammad SAW. Alhamdulillah atas Rahmat dan Karunia-Nya penulis telah menyelesaikan Buku Teknologi Dan Produksi Benih Unggul: Konsep, Pemuliaan, Dan Implementasi Modern ini.

Buku Ini Membahas : . Konsep Dasar Teknologi dan Produksi Benih, Ruang Lingkup dan Peran Pemuliaan Tanaman, Keragaman Genetik dalam Pengembangan Varietas Unggul, Teknik Pemuliaan Tanaman Menyerbuk Silang, Teknik Pemuliaan Tanaman Secara Vegetatif, Seleksi dan Pengujian Varietas, Tatacara Pelepasan Varietas Unggul, Teknologi Produksi Benih Melalui Hibridisasi, Teknologi Produksi Benih Melalui Rekayasa Genetika, Produksi dan Sertifikasi Benih Unggul, Produksi Benih Hibrida dan Non Hibrida.

Proses penulisan buku ini berhasil diselesaikan atas kerjasama tim penulis. Demi kualitas yang lebih baik dan kepuasan para pembaca, saran dan masukan yang membangun dari pembaca sangat kami harapkan.

Penulis ucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah mendukung dalam penyelesaian buku ini. Terutama pihak yang telah membantu terbitnya buku ini dan telah mempercayakan mendorong, dan menginisiasi terbitnya buku ini. Semoga buku ini dapat bermanfaat bagi masyarakat Indonesia.

Padang, Juli 2026

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GAMBAR	viii
BAB 1 KONSEP DASAR TEKNOLOGI DAN	
PRODUKSI BENIH.....	1
1.1 Pengantar dan Karakteristik Biologis Benih.....	1
1.1.1 Definisi dan Peran Strategis.....	1
1.1.2 Anatomi dan Dinamika Pembentukan Benih.....	2
1.1.3 Fisiologi Perkecambahan dan Mekanisme	
Molekuler Dormansi	3
1.2 Parameter Mutu Benih Unggul	4
1.2.1 Mutu Genetik dan Fisik.....	5
1.2.2 Mutu Fisiologis dan Patologis.....	7
1.3 Prinsip Dasar dan Sistem Produksi Benih.....	8
1.3.1 Hierarki Kelas Benih	10
1.3.2 Manajemen Agronomi dan Isolasi	11
1.3.3 Pemeliharaan Kemurnian (<i>Roguing</i>)	13
1.4 Transisi Menuju Produksi Benih Modern	14
1.4.1 Tantangan Produksi Kontemporer	16
1.4.2 Pengantar Inovasi Teknologi Presisi	18
DAFTAR PUSTAKA	20
BAB 2 RUANG LINGKUP DAN PERAN PEMULIAAN	
TANAMAN.....	23
2.1 Tahapan Kegiatan Pemuliaan Tanaman	23
2.1.1 Eksplorasi dan Koleksi Plasma Nutfah.....	23
2.1.2 Karakterisasi dan Evaluasi	27
2.1.3 Seleksi.....	29
2.1.4 Persilangan (Hibridisasi)	32
2.1.5 Pengujian Varietas	36
2.1.6 Pelepasan Varietas.....	38
2.1.7 Pendekatan dalam Pemuliaan Tanaman	40
DAFTAR PUSTAKA	45

BAB 3 KERAGAMAN GENETIK DALAM	
PENGEMBANGAN VARIETAS UNGGUL.....	55
3.1 Pengertian dan Sumber Keragaman Genetik.....	55
3.2 Pentingnya Keragaman Genetik.....	58
3.3 Pengembangan Varietas Unggul dan Kaitannya dengan Keragaman Genetik	61
3.4 Keragaman Genetik Berkaitan dengan Pertanian Berkelanjutan.....	63
DAFTAR PUSTAKA.....	65
BAB 4 TEKNIK PEMULIAAN TANAMAN	
MENYERBUK SILANG.....	67
4.1 Pendahuluan.....	67
4.1.1 Dasar Biologi dan Mekanisme Penyerbukan.....	68
4.1.2 Genetika Populasi: Hukum Hardy-Weinberg.....	71
4.2 Konsep Keseimbangan Dinamis	72
4.3 Parameter Matematika dan Frekuensi Alel.....	72
4.4 Kekuatan Pengubah Keseimbangan (Seleksi dan Drift)	73
4.5 Aplikasi dalam Marka Molekuler dan GWAS.....	73
4.5.1 Heterosis dan Depresi Inbreeding.....	74
4.5.2 Metode Seleksi.....	78
4.6 Pengembangan Varietas Bersari Bebas (<i>Open-Pollinated</i>) dan Sintetik	82
4.7 Pemuliaan Varietas Hibrida.....	85
4.8 Bioteknologi dalam Pemuliaan Penyerbuk Silang.....	88
DAFTAR PUSTAKA.....	91
BAB 5 TEKNIK PEMULIAAN TANAMAN SECARA	
VEGETATIF	93
5.1 Pengertian Pemuliaan Tanaman	93
5.2 Pengertian Pemuliaan Tanaman Secara Vegetatif.....	94
5.3 Dasar Genetik Pemuliaan Tanaman secara Vegetatif..	96
5.4 Metode Pemuliaan Tanaman	97
5.5 Jenis-Jenis Teknik Pemuliaan Secara Vegetatif.....	98
5.6 Peranan Pemuliaan Vegetatif dalam Pertanian Modern.....	105
DAFTAR PUSTAKA.....	107

BAB 6 SELEKSI DAN PENGUJIAN VARIETAS	109
6.1 Pendahuluan.....	109
6.2 Prinsip Dasar Seleksi Varietas.....	110
6.3 Metode Pengujian Varietas: Uji Keunggulan dan Kebenaran.....	112
6.3.1 Uji Keunggulan Varietas.....	113
6.3.2 Uji Kebenaran Varietas (BUSS: Baru, Unik, Seragam, Stabil)	114
6.3.3 Uji Multilokasi dan Analisis Interaksi Genotipe × Lingkungan (G×E)	115
6.4 Prosedur Pelepasan Varietas di Indonesia (Terkini 2025–2026).....	116
6.5 Contoh Kasus Seleksi dan Pengujian di Komoditas Utama	119
6.5.1 Padi	119
6.5.2 Jagung.....	119
6.5.3 Cabai dan Hortikultura	119
6.6 Tantangan dan Inovasi Terkini.....	119
6.7 Kesimpulan	122
DAFTAR PUSTAKA	123
BAB 7 TATACARA PELEPASAN VARIETAS UNGGUL.....	125
7.1 Pendahuluan.....	125
7.2 Dasar Hukum dan Regulasi Pelepasan Varietas	126
7.2.1 Kebijakan Pemerintahan dalam Pelepasan Varietas	126
7.2.2 Kerangka Hukum Nasional dan Internasional.....	127
7.2.3 Peran Kementerian Pertanian dalam Proses Pelepasan Varietas	128
7.3 Tahapan Awal Pengembangan Varietas Unggul.....	129
7.3.1 Eksplorasi Plasma Nutfah	130
7.3.2 Program Pemuliaan Tanaman	132
7.3.3 Seleksi Galur Unggul	132
7.3.4 Uji Adaptasi Awal.....	133
7.4 Uji Daya Hasil dan Adaptasi Varietas	134
7.4.1 Uji Multilokasi	134
7.4.2 Uji Daya Hasil Pendahuluan dan Lanjutan.....	134
7.4.3 Parameter Agronomi.....	135

7.4.4 Stabilitas dan Adaptabilitas Varietas.....	135
7.5 Prosedur Pengajuan Pelepasan Varietas	136
7.5.1 Persyaratan Pengajuan Pelepasan Varietas	137
7.5.2 Tantangan dalam Pelepasan Varietas.....	138
DAFTAR PUSTAKA.....	140
BAB 8 TEKNOLOGI PRODUKSI BENIH MELALUI	
HIBRIDISASI.....	143
8.1 Pendahuluan.....	143
8.2 Konsep Hibridisasi	144
8.2.1 Aplikasi Hibridisasi dalam Pemuliaan Tanaman... 145	
8.2.2 Teknik Hibridisasi Buatan pada Tanaman.....	147
8.3 Biologi Bunga dan Pembungaan	148
8.4 Teknik Hibridisasi (Emaskulasi dan Polinasi)	149
8.5 Teknologi Pendukung Produksi Benih Hibrida	150
8.5.1 <i>Cytoplasmic Male Sterile (CMS)</i>	150
8.5.2 <i>Environment-Sensitive Genetic Male Sterility</i> (EGMS)	153
8.6 Interaksi Genetik dalam Hibridisasi	155
8.6.1 Efek Langsung dalam Hibridisasi	155
8.6.2 Efek Lanjutan dalam Hibridisasi	156
8.6.3 Persilangan Divergen	157
8.6.4 Persilangan Konvergen	158
8.7 Produksi Benih Hibrida Di Lapangan.....	159
DAFTAR PUSTAKA.....	161
BAB 9 TEKNOLOGI PRODUKSI BENIH MELALUI	
REKAYASA GENETIKA.....	165
9.1 Konsep Dasar Rekayasa Genetika dalam Produksi Benih	165
9.2 Teknik-Teknik Rekayasa Genetika pada Tanaman.....	167
9.2.1 Transformasi Genetik.....	167
9.2.2 RNA Interference (RNAi).....	171
9.2.3 CRISPR-Cas9 (<i>Genome Editing</i>)	172
9.2.4 <i>Marker-Assisted Selection (MAS)</i>	174
9.3 Tahapan Produksi Benih Transgenik.....	176
9.4 Aplikasi Rekayasa Genetika dalam Produksi Benih Unggul	178

9.5 Kelebihan dan Kekurangan Teknologi Rekayasa Genetika	180
9.6 Implementasi di Indonesia dan Potensi Pengembangan.....	182
DAFTAR PUSTAKA	184
BAB 10 PRODUKSI DAN SERTIFIKASI BENIH UNGGUL..	187
10.1 Pendahuluan.....	187
10.2 Pengertian dan Karakteristik Benih Unggul	188
10.3 Produksi Benih Varietas Lokal.....	194
DAFTAR PUSTAKA	210
BAB 11 PRODUKSI BENIH HIBRIDA DAN NON HIBRIDA	211
11.1 Pengertian Benih Hibrida dan Non Hibrida	211
11.2 Perbedaan Utama Antara Benih Hibrida dan Non Hibrida	213
11.3 Pentingnya Benih dalam Pemuliaan Tanaman dan Produksi Pertanian	214
11.4 Sistem Produksi Benih Non Hibrida (<i>Open Pollinated Varieties</i>)	216
11.5 Sistem Produksi Benih Hibrida.....	219
11.6 Teknik Produksi Benih Hibrida	222
11.7 Manajemen Produksi Benih	224
11.8 Faktor Faktor yang Mempengaruhi Kualitas Benih...	227
11.9 Regulasi dan Standarisasi dalam Produksi Benih.....	229
11.10 Tantangan dalam Produksi Benih Hibrida dan Non Hibrida	231
DAFTAR PUSTAKA	234
BIODATA PENULIS	

DAFTAR TABEL

Tabel 8.1. Contoh CMS, ORF, dan gen Rf pada tanaman sayuran	152
Tabel 8.2. Contoh Gen EGMS pada Tanaman.....	153
Tabel 10.1. Perbandingan regulasi produksi dan sertifikasi benih berbagai negara.....	195

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Perbandingan Struktur Anatomi Internal Benih Dikotil dan Monokotil	2
Gambar 4.1. Penyerbukan sendiri dan penyerbukan silang	67
Gambar 4.2. Penyerbuka Silang	68
Gambar 4.3. Heterostili	71
Gambar 4.4. Heterosis pada jagung.....	75
Gambar 4.5. Depresi <i>Inbreeding</i>	77
Gambar 5.1. Ilmu-ilmu yang mendukung pemuliaan tanaman	94
Gambar 5.2. Prinsip penerapan seleksi klonal	98
Gambar 5.3. Tumbuhan yang berkembang biak dengan tunas adalah pisang, bamboo	99
Gambar 5.4. Contoh dari umbi lapis, umbi batang, dan umbi akar yaitu bawang merah, ubi jalar, singkong, dan wortel	100
Gambar 5.5. Contoh tumbuhan yang berkembangbiak dengan stolon adalah strawberry dan rumput teki	101
Gambar 5.6. Contoh tumbuhan yang berkembangbiak dengan rhizome/akar tinggal adalah jahe, lengkuas, dan kunyit.....	102
Gambar 5.7. Perbanyakkan vegetatif buatan dengan cara mencangkok	103
Gambar 5.8. Perbanyakkan vegetatif buatan dengan cara stek pada bunga mawar.....	104
Gambar 5.9. Perbanyakkan vegetatif buatan dengan cara okulasi	104
Gambar 5.10. Perbanyakkan vegetatif buatan dengan cara kultur jaringan.....	105
Gambar 7.1. Pemanfaatan plasma nutfah liar untuk memperluas keragaman genetik dan memasukkan gen spesifik ke varietas unggul.	131

Gambar 8.1. Contoh Representasi skematis struktur perbungaan dan spikelet serta tahapan pembungaan pada tanaman padi	148
Gambar 8.2. Pembentukan ORF yang berkaitan dengan CMS serta pergeseran substoikiometri pada galur CMS, pemelihara, dan revertan (a) ORF terkait CMS terbentuk akibat penataan ulang pada genom mitokondria (b) Rekombinasi homolog antarmolekul mengakibatkan pergeseran substoikiometri ORF terkait CMS, yang berdampak pada perubahan kondisi steril dan fertil	151
Gambar 8.3. Mekanisme pengaturan perkembangan tapetum pada <i>arabidopsis</i> , padi, dan jagung serta konservasi faktor transkripsi	154
Gambar 8.4. Gambaran umum meiosis dimana segregasi alel dan rekombinasi genetik melalui <i>crossing over</i> pada tahap pachytene	157
Gambar 8.5. Alur teknik perakitan varietas padi	159
Gambar 9.1. (A) Transformasi genetik yang dimediasi oleh <i>Agrobacterium tumifaciens</i> (DNA sirkular). Vektor biner yang telah membawa T-DNA yang akan ditransfer ke sel tanaman. (B) Perpindahan T-DNA kedalam sel tanaman.	169
Gambar 9.2. CRISPR Cas9	179
Gambar 10.1. Proses Perizinan Produsen Benih	192
Gambar 10.2. Simulasi Prosedur Sertifikasi Benih Tanaman Pangan	198
Gambar 10.3. Simulasi Sertifikasi Benih Melalui Pemurnian Varietas	202
Gambar 10.4. Simulasi Sertifikasi Benih Varietas Lokal	204

BAB 1

KONSEP DASAR TEKNOLOGI DAN PRODUKSI BENIH

1.1 Pengantar dan Karakteristik Biologis Benih

Perkembangan setiap individu tanaman tingkat tinggi senantiasa berawal dari sebuah struktur biologis yang kompleks dan sangat presisi, yakni benih. Dalam ruang lingkup ilmu pertanian, agronomi, dan pemuliaan tanaman, benih memegang peranan sentral tidak sekadar sebagai materi perbanyakan generatif, melainkan sebagai kapsul biologis yang mengemban potensi genetik (Farmy et al. 2023), rekam jejak evolusioner, dan penentu utama keberhasilan produksi biomassa (Wulantika et al. 2025). Secara filosofis maupun teknis, benih adalah mekanisme pengiriman (*delivery mechanism*) paling efisien untuk mentransfer inovasi teknologi pertanian langsung ke ekosistem lahan (Anggi Mukhairokh Abdu et al. 2025).

1.1.1 Definisi dan Peran Strategis

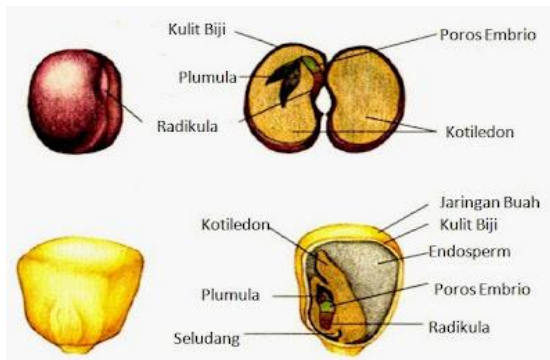
Dalam terminologi agronomi dan regulasi perbenihan, terdapat demarkasi konseptual yang sangat tegas antara "biji" (*grain*) dan "benih" (*seed*). Biji merupakan produk akhir budidaya yang secara spesifik ditujukan untuk konsumsi atau bahan baku industri, di mana viabilitas (daya hidup) tidak lagi menjadi parameter mutu (Dai et al. 2025). Sebaliknya, benih adalah entitas biologis hidup yang diproduksi, dipanen, diproses, dan disimpan dengan perlakuan khusus untuk tujuan penanaman kembali. Benih berfungsi sebagai wahana pembawa cetak biru genetik maksimum (*yield potential*) dari suatu varietas unggul (Copeland and McDonald 2001).

Studi agronomis berskala luas menegaskan esensi benih bermutu. Penggunaan benih bersertifikat dan adaptif terbukti tidak sekadar meningkatkan produktivitas dasar, tetapi bertindak sebagai komponen strategis yang menjamin stabilitas

hasil panen (*yield stability*) di bawah tekanan variabilitas iklim yang ekstrem dan cekaman abiotik seperti kekeringan. Kegagalan menyediakan benih bermutu tinggi pada fase hulu akan menyebabkan inefisiensi absolut pada input turunan lainnya (pupuk, irigasi, pestisida) (Ojdowska et al. 2025).

1.1.2 Anatomi dan Dinamika Pembentukan Benih

Secara struktural, benih merupakan organ perkembangbiakan hasil fertilisasi yang pada dasarnya adalah "miniatur tanaman" dalam fase istirahat adaptif (*quiescent*). Struktur fundamental ini tersusun atas tiga komponen utama: embrio (calon individu baru), jaringan penyimpan cadangan makronutrien, dan jaringan pelindung eksternal (kulit benih atau *testa*).



Gambar 1.1. Perbandingan Struktur Anatomi Internal Benih Dikotil dan Monokotil

(Sumber: Ilustrasi adaptasi dari standar literatur anatomi botani)

Siklus ontogeni benih diawali oleh peristiwa fertilisasi ganda (*double fertilization*) yang memicu fase embriogenesis dan periode pengisian biji (*seed filling*). Puncak dari akumulasi biomassa ini ditandai dengan tercapainya masak fisiologis (*physiological maturity*), yakni titik di mana benih mencapai berat kering absolut dan tingkat viabilitas genetik tertingginya.

Pascamasak fisiologis, benih ortodoks (tahan kering) akan mengalami pematangan kering (*maturation drying*), menurunkan kadar airnya secara drastis. Fase ini disertai dengan

akuisisi toleransi desikasi (*desiccation tolerance*), mekanisme adaptasi yang memungkinkan sel tumbuhan bertahan dari kekeringan ekstrem tanpa kematian sel. Riset biologi molekuler terkini membuktikan bahwa transisi toleransi desikasi ini diregulasi secara presisi oleh jaringan genetik yang kompleks, di mana elemen spesifik seperti *micropeptide* memainkan peran sentral dalam menjaga kelangsungan hidup embrio selama pematangan (Zhang et al., 2025). Selain itu, manipulasi osmotik dan perlakuan senyawa eksternal (seperti asam salisilat) pada benih rekalsitrasi (rentan kering) kini terus diteliti untuk menurunkan sensitivitas desikasi agar benih dapat disimpan lebih lama (Da Silva et al., 2024).

1.1.3 Fisiologi Perkecambahan dan Mekanisme Molekuler Dormansi

Transisi benih dari fase istirahat menuju pertumbuhan aktif disebut perkecambahan. Secara biofisik, proses ini diinisiasi oleh imbibisi (penyerapan air secara pasif), yang menghidrasi matriks benih, mereaktivasi sistem metabolik, serta memicu sekresi enzim hidrolitik untuk merombak cadangan makanan menjadi energi pemanjangan sel (Pompelli et al. 2023).

Kendati demikian, benih yang hidup sering kali tetap menolak berkecambah meski lingkungan (air, oksigen, suhu) sangat ideal. Penolakan biologis ini disebut dormansi. Dormansi adalah rekayasa evolusioner agar bibit tidak tumbuh di musim yang mematikan. Selain dormansi, ada pula fase *after-ripening* pascapanen, yaitu periode pematangan lanjutan di mana terjadi perubahan biokimiawi dalam benih kering yang secara perlahan menghilangkan dormansi dan meningkatkan potensi perkecambahan.

Secara molekuler, pemeliharaan dan pelepasan dormansi dikendalikan oleh keseimbangan (rasio) dua fitohormon antagonis: Asam Absisat (ABA) yang mempertahankan dormansi, serta Asam Giberelat (GA) yang merangsang perkecambahan. Interaksi hormon ini sangat dinamis dan dipengaruhi oleh bagian fisik benih; kajian terbaru menunjukkan bahwa pada spesies tertentu, jaringan kulit benih secara aktif memproduksi ABA

tambahan untuk menghambat embrio dan menjaga rasio ABA/GA tetap tinggi demi mempertahankan dormansi. Pemahaman molekuler inilah yang menjadi basis bagi industri modern untuk mengembangkan teknologi perlakuan benih (*seed treatment*) guna mematahkan dormansi secara terukur di lapangan.

1.2 Parameter Mutu Benih Unggul

Benih merupakan salah satu komponen utama dalam sistem produksi pertanian karena kualitas benih sangat menentukan keberhasilan pertumbuhan tanaman serta hasil produksi yang diperoleh. Benih yang berkualitas tinggi mampu menghasilkan tanaman yang tumbuh seragam, memiliki vigor yang kuat, serta mampu beradaptasi dengan kondisi lingkungan yang beragam (Tiah et al. 2026). Oleh karena itu, dalam sistem produksi pertanian modern, penggunaan benih unggul menjadi salah satu faktor penting untuk meningkatkan produktivitas dan keberlanjutan sistem pertanian.

Secara umum, mutu benih dapat diartikan sebagai tingkat keunggulan benih yang mencerminkan kemampuan benih untuk berkecambah, tumbuh, dan berkembang menjadi tanaman yang normal sesuai dengan karakter varietasnya. Mutu benih tidak hanya ditentukan oleh satu aspek saja, tetapi merupakan hasil dari kombinasi beberapa parameter yang saling berkaitan. Parameter tersebut meliputi mutu genetik, mutu fisik, mutu fisiologis, dan mutu patologis. Keempat aspek tersebut digunakan sebagai indikator untuk menilai kualitas benih secara menyeluruh.

Mutu genetik berkaitan dengan kemurnian varietas dan kesesuaian karakter genetik benih dengan varietas yang telah dilepas. Benih yang memiliki mutu genetik tinggi akan menunjukkan sifat-sifat yang stabil dan seragam sesuai dengan deskripsi varietasnya. Hal ini sangat penting dalam sistem produksi pertanian karena kemurnian genetik menentukan performa tanaman di lapangan, termasuk produktivitas, ketahanan terhadap hama dan penyakit, serta kemampuan adaptasi terhadap lingkungan.

Selain mutu genetik, mutu fisik juga menjadi salah satu parameter penting dalam penilaian kualitas benih. Mutu fisik mencerminkan kondisi fisik benih yang meliputi ukuran, bentuk, kebersihan, serta tingkat kerusakan benih. Benih yang memiliki mutu fisik baik umumnya bebas dari kotoran, biji gulma, serta bahan asing lainnya yang dapat menurunkan kualitas benih. Mutu fisik yang baik juga memudahkan proses penyimpanan, transportasi, dan penanaman benih di lapangan.

Parameter berikutnya adalah mutu fisiologis, yang berkaitan dengan kemampuan benih untuk berkecambah dan menghasilkan bibit yang normal. Mutu fisiologis biasanya diukur melalui beberapa indikator seperti daya kecambah, vigor benih, serta kecepatan perkecambahan. Benih dengan mutu fisiologis tinggi memiliki kemampuan tumbuh yang baik bahkan pada kondisi lingkungan yang kurang optimal, sehingga mampu menghasilkan tanaman yang lebih kuat dan produktif.

Selain itu, mutu patologis juga menjadi aspek yang sangat penting dalam penilaian mutu benih. Mutu patologis berkaitan dengan tingkat kesehatan benih, terutama terkait dengan keberadaan organisme penyebab penyakit seperti jamur, bakteri, virus, maupun nematoda. Benih yang terinfeksi patogen dapat menjadi sumber penyebaran penyakit pada tanaman di lapangan sehingga berpotensi menurunkan hasil produksi. Oleh karena itu, dalam sistem produksi benih modern, pengujian kesehatan benih menjadi salah satu prosedur penting untuk memastikan bahwa benih yang diproduksi bebas dari patogen yang berbahaya.

1.2.1 Mutu Genetik dan Fisik

Mutu genetik dan mutu fisik merupakan dua komponen penting dalam menentukan kualitas benih unggul. Kedua aspek ini saling melengkapi dalam menjamin bahwa benih yang digunakan dalam kegiatan budidaya tanaman memiliki karakter varietas yang murni serta kondisi fisik yang layak untuk ditanam. Penilaian terhadap mutu genetik dan fisik biasanya dilakukan pada tahap produksi benih maupun sebelum benih dipasarkan atau digunakan oleh petani.

Mutu genetik berkaitan dengan tingkat kemurnian varietas yang dimiliki oleh suatu benih. Kemurnian varietas menunjukkan bahwa benih tersebut benar-benar berasal dari varietas yang dimaksud dan tidak tercampur dengan varietas lain. Benih yang memiliki mutu genetik tinggi akan menunjukkan karakteristik yang seragam sesuai dengan deskripsi varietasnya, seperti bentuk biji, warna biji, ukuran biji, tinggi tanaman, bentuk daun, waktu berbunga, serta potensi hasil. Kemurnian genetik sangat penting karena menjadi dasar bagi stabilitas sifat-sifat unggul yang dimiliki oleh suatu varietas.

Dalam sistem produksi benih, pemeliharaan mutu genetik dilakukan melalui beberapa kegiatan seperti penggunaan benih sumber yang jelas asal-usulnya, penerapan isolasi dalam proses produksi benih, serta pelaksanaan roguing atau seleksi lapangan untuk menghilangkan tanaman yang menyimpang dari karakter varietas. Pengawasan mutu genetik juga dilakukan melalui proses sertifikasi benih yang bertujuan untuk memastikan bahwa benih yang diproduksi memenuhi standar kemurnian varietas yang telah ditetapkan.

Selain mutu genetik, mutu fisik juga menjadi parameter penting dalam penilaian kualitas benih. Mutu fisik berkaitan dengan kondisi fisik benih yang dapat diamati secara langsung. Beberapa indikator yang digunakan untuk menilai mutu fisik benih antara lain kemurnian fisik, ukuran dan bentuk benih, tingkat kerusakan mekanis, kadar air benih, serta keberadaan bahan asing seperti kotoran, serpihan tanaman, atau biji gulma.

Benih dengan mutu fisik yang baik umumnya memiliki ukuran yang seragam, bebas dari kerusakan, serta memiliki tingkat kemurnian yang tinggi. Kemurnian fisik menunjukkan persentase benih murni dalam suatu lot benih dibandingkan dengan bahan lain yang tidak diinginkan. Semakin tinggi tingkat kemurnian fisik suatu benih, semakin baik pula kualitas benih tersebut untuk digunakan dalam kegiatan budidaya.

Kadar air benih juga merupakan salah satu faktor penting dalam mutu fisik karena berkaitan erat dengan daya simpan benih. Benih dengan kadar air yang terlalu tinggi cenderung lebih cepat mengalami kerusakan selama penyimpanan karena

meningkatkan aktivitas respirasi serta berkembangnya mikroorganisme. Oleh karena itu, dalam proses pengolahan benih biasanya dilakukan pengeringan untuk menurunkan kadar air hingga mencapai tingkat yang aman untuk penyimpanan.

1.2.2 Mutu Fisiologis dan Patologis

Selain mutu genetik dan mutu fisik, kualitas benih juga sangat dipengaruhi oleh mutu fisiologis dan mutu patologis. Kedua aspek ini berkaitan dengan kemampuan benih untuk berkecambah dan tumbuh menjadi tanaman yang sehat serta bebas dari organisme penyebab penyakit. Penilaian terhadap mutu fisiologis dan patologis sangat penting karena benih yang secara genetik murni dan secara fisik baik belum tentu mampu tumbuh optimal jika kondisi fisiologis dan kesehatannya tidak memenuhi standar yang diperlukan.

Mutu fisiologis mengacu pada kemampuan benih untuk melakukan proses perkecambahan dan menghasilkan bibit yang normal serta mampu tumbuh secara optimal di lapangan. Mutu fisiologis biasanya dinilai melalui beberapa parameter utama, seperti daya kecambah, vigor benih, kecepatan perkecambahan, serta keseragaman pertumbuhan bibit. Daya kecambah merupakan persentase benih yang mampu berkecambah secara normal dalam kondisi lingkungan yang sesuai. Sementara itu, vigor benih menggambarkan kekuatan atau kemampuan benih untuk tumbuh secara cepat dan seragam, bahkan dalam kondisi lingkungan yang kurang optimal.

Benih dengan mutu fisiologis yang baik umumnya memiliki tingkat perkecambahan yang tinggi dan mampu menghasilkan bibit yang kuat serta seragam. Hal ini sangat penting dalam sistem produksi tanaman karena tanaman yang tumbuh secara seragam akan memudahkan pengelolaan budidaya, seperti pemupukan, pengendalian hama dan penyakit, serta waktu panen. Sebaliknya, benih dengan mutu fisiologis rendah dapat menyebabkan pertumbuhan tanaman yang tidak seragam, sehingga berpotensi menurunkan produktivitas tanaman secara keseluruhan.

Selain mutu fisiologis, mutu patologis juga merupakan faktor penting dalam penilaian kualitas benih. Mutu patologis berkaitan dengan tingkat kesehatan benih, terutama terkait dengan keberadaan organisme penyebab penyakit yang dapat terbawa oleh benih. Patogen yang sering ditemukan pada benih antara lain jamur, bakteri, virus, dan nematoda. Keberadaan patogen pada benih dapat menyebabkan berbagai masalah dalam proses budidaya tanaman, seperti penurunan daya kecambah, kerusakan bibit, serta penyebaran penyakit pada tanaman di lapangan.

Benih yang terinfeksi patogen dapat menjadi sumber utama penyebaran penyakit pada pertanaman, terutama jika patogen tersebut bersifat *seed-borne* atau terbawa melalui benih. Oleh karena itu, pengujian kesehatan benih menjadi salah satu langkah penting dalam sistem produksi dan sertifikasi benih. Pengujian ini biasanya dilakukan melalui berbagai metode, seperti pengamatan visual, uji laboratorium, serta penggunaan media khusus untuk mendeteksi keberadaan patogen pada benih.

Dalam praktik produksi benih modern, upaya untuk menjaga mutu fisiologis dan patologis dilakukan melalui beberapa langkah, antara lain pemilihan benih sumber yang berkualitas, pengolahan benih yang tepat, pengaturan kondisi penyimpanan yang optimal, serta penerapan perlakuan benih seperti *seed treatment* untuk mencegah infeksi patogen. Dengan pengelolaan yang baik, mutu fisiologis dan kesehatan benih dapat dipertahankan sehingga benih yang dihasilkan mampu memberikan performa pertumbuhan yang optimal di lapangan.

1.3 Prinsip Dasar dan Sistem Produksi Benih

Benih merupakan faktor produksi utama dalam sistem pertanian karena menjadi titik awal keberhasilan budidaya tanaman. Benih yang berkualitas tinggi mampu menghasilkan tanaman yang tumbuh seragam, memiliki vigor yang baik, serta mampu mengekspresikan potensi genetik varietas secara optimal (Singh et al. 2026; Tiah et al. 2026). Oleh karena itu, produksi benih tidak hanya sekadar kegiatan memperbanyak tanaman, tetapi merupakan suatu

sistem produksi yang terencana dan terstandar untuk menjaga kualitas genetik, fisiologis, dan fisik benih.

Dalam konteks pembangunan pertanian, benih sering disebut sebagai pembawa teknologi genetik (*carrier of genetic technology*). Melalui benih, berbagai sifat unggul yang dihasilkan dari proses pemuliaan tanaman dapat ditransfer kepada petani. Sifat-sifat tersebut antara lain produktivitas tinggi, ketahanan terhadap hama dan penyakit, toleransi terhadap kondisi lingkungan tertentu seperti kekeringan atau salinitas, serta kualitas hasil yang lebih baik. Oleh karena itu, keberhasilan pemuliaan tanaman akan sangat bergantung pada sistem produksi benih yang mampu mempertahankan kemurnian varietas.

Prinsip dasar produksi benih pada dasarnya bertujuan untuk mempertahankan kemurnian genetik varietas, mutu fisiologis benih, serta kualitas fisik benih selama proses perbanyakan. Kemurnian genetik berkaitan dengan kesesuaian sifat tanaman dengan deskripsi varietas yang telah dilepas. Mutu fisiologis berkaitan dengan kemampuan benih untuk berkecambah dan tumbuh secara normal serta memiliki vigor yang tinggi. Sementara itu, kualitas fisik benih berkaitan dengan kebersihan benih dari kotoran, kerusakan mekanis, maupun kontaminasi benih tanaman lain.

Produksi benih juga memerlukan penerapan berbagai teknik budidaya yang lebih ketat dibandingkan dengan budidaya tanaman untuk tujuan konsumsi. Dalam produksi benih, setiap tahapan produksi harus dilakukan dengan pengawasan yang baik, mulai dari pemilihan sumber benih, penentuan lokasi produksi, pengelolaan budidaya tanaman, hingga proses panen dan pengolahan benih. Hal ini bertujuan untuk memastikan bahwa benih yang dihasilkan tetap memiliki mutu yang tinggi sesuai dengan standar yang ditetapkan.

Selain itu, produksi benih umumnya berada dalam suatu sistem pengawasan yang dikenal sebagai sistem sertifikasi benih. Sistem sertifikasi merupakan mekanisme pengendalian mutu yang dilakukan oleh lembaga resmi untuk memastikan bahwa benih yang diproduksi memenuhi standar kualitas tertentu. Dalam sistem ini, setiap tahapan produksi benih akan diawasi melalui kegiatan inspeksi lapangan, pengujian laboratorium, serta penilaian terhadap proses pengolahan dan penyimpanan benih.

Dalam praktiknya, penerapan prinsip dasar produksi benih melibatkan beberapa komponen penting yang saling berkaitan. Komponen tersebut meliputi sistem hierarki kelas benih, penerapan manajemen agronomi dan isolasi tanaman, serta kegiatan pemeliharaan kemurnian varietas melalui roguing. Ketiga komponen ini merupakan bagian penting dalam menjaga kualitas benih yang dihasilkan sehingga mampu mendukung produktivitas pertanian secara berkelanjutan.

1.3.1 Hierarki Kelas Benih

Hierarki kelas benih merupakan sistem pengelompokan benih berdasarkan tingkat kemurnian genetik serta tahapan perbanyakannya dalam sistem produksi benih (Takeshima et al. 2025). Sistem ini bertujuan untuk menjaga kesinambungan sumber benih unggul sehingga kualitas genetik varietas dapat dipertahankan dari satu generasi ke generasi berikutnya. Melalui sistem ini, proses perbanyak benih dilakukan secara bertahap dengan pengawasan yang ketat agar tidak terjadi penurunan mutu genetik varietas.

Pada umumnya, varietas tanaman yang telah dilepas oleh lembaga resmi akan menjadi sumber utama dalam sistem produksi benih. Varietas tersebut kemudian diperbanyak melalui beberapa tahapan produksi yang masing-masing memiliki standar mutu yang berbeda. Setiap tahapan perbanyak bertujuan untuk meningkatkan jumlah benih tanpa mengurangi kemurnian genetik varietas.

Secara umum, hierarki kelas benih terdiri atas empat tingkatan utama, yaitu benih penjenis, benih dasar, benih pokok, dan benih sebar.

1. Benih Penjenis (*Breeder Seed*)

Benih penjenis merupakan benih yang diproduksi langsung oleh pemulia tanaman atau lembaga penelitian yang mengembangkan varietas tersebut. Benih ini memiliki tingkat kemurnian genetik yang paling tinggi karena berasal langsung dari sumber varietas yang telah dilepas. Produksi benih penjenis biasanya dilakukan dalam jumlah terbatas dan di bawah pengawasan langsung oleh pemulia tanaman.

2. Benih Dasar (*Foundation Seed*)

Benih dasar merupakan hasil perbanyakan dari benih penjenis yang diproduksi dengan pengawasan yang sangat ketat. Benih ini digunakan sebagai sumber untuk menghasilkan benih pokok. Proses produksi benih dasar biasanya dilakukan oleh lembaga penelitian atau institusi yang memiliki fasilitas produksi benih yang memadai.

3. Benih Pokok (*Registered Seed*)

Benih pokok merupakan hasil perbanyakan dari benih dasar. Benih ini memiliki tingkat kemurnian genetik yang masih tinggi dan digunakan sebagai sumber untuk memproduksi benih sebar. Produksi benih pokok biasanya dilakukan oleh produsen benih yang telah memiliki izin dan memenuhi standar produksi benih.

4. Benih Sebar (*Certified Seed*)

Benih sebar merupakan hasil perbanyakan dari benih pokok dan biasanya diproduksi dalam jumlah besar untuk didistribusikan kepada petani. Benih ini telah melalui proses sertifikasi sehingga memenuhi standar mutu yang ditetapkan oleh lembaga pengawasan benih.

Dengan adanya sistem hierarki kelas benih ini, proses produksi benih dapat dilakukan secara sistematis dan berkelanjutan. Sistem ini juga membantu menjaga kualitas genetik varietas sehingga benih yang digunakan oleh petani tetap memiliki performa yang sesuai dengan karakteristik varietas yang telah dilepas.

1.3.2 Manajemen Agronomi dan Isolasi

Manajemen agronomi dalam produksi benih mencakup berbagai kegiatan budidaya yang bertujuan untuk mendukung pertumbuhan tanaman secara optimal sekaligus menjaga kemurnian varietas. Praktik agronomi yang diterapkan dalam produksi benih umumnya lebih ketat dibandingkan dengan budidaya tanaman untuk tujuan konsumsi karena berkaitan langsung dengan kualitas benih yang dihasilkan.

Salah satu aspek penting dalam manajemen agronomi adalah pemilihan lokasi produksi benih. Lokasi produksi harus memenuhi

beberapa persyaratan, antara lain memiliki kondisi agroekologi yang sesuai dengan kebutuhan tanaman, bebas dari pencemaran varietas lain, serta memiliki akses yang baik untuk kegiatan pengawasan dan pengelolaan produksi benih.

Selain pemilihan lokasi, pengelolaan budidaya tanaman juga menjadi faktor penting dalam produksi benih. Pengolahan lahan harus dilakukan dengan baik untuk menciptakan kondisi tanah yang mendukung pertumbuhan tanaman. Penentuan waktu tanam juga harus diperhatikan agar tanaman dapat tumbuh pada kondisi lingkungan yang optimal. Pemupukan dilakukan secara seimbang sesuai dengan kebutuhan tanaman untuk mendukung pertumbuhan vegetatif dan generatif.

Pengendalian hama dan penyakit juga menjadi bagian penting dalam manajemen agronomi produksi benih. Serangan hama dan penyakit tidak hanya dapat menurunkan hasil panen, tetapi juga dapat mempengaruhi kualitas fisiologis benih (Ouaarous et al. 2025). Oleh karena itu, pengendalian organisme pengganggu tanaman harus dilakukan secara efektif melalui pendekatan pengendalian terpadu.

Selain aspek agronomi, produksi benih juga memerlukan penerapan isolasi tanaman. Isolasi merupakan upaya untuk memisahkan tanaman benih dari tanaman lain yang memiliki varietas berbeda sehingga dapat mencegah terjadinya pencampuran genetik. Hal ini sangat penting terutama pada tanaman yang memiliki sistem penyerbukan silang.

Isolasi dapat dilakukan melalui beberapa metode, yaitu:

1. Isolasi jarak, yaitu pemisahan lahan produksi benih dengan tanaman lain berdasarkan jarak tertentu.
2. Isolasi waktu, yaitu pengaturan waktu tanam sehingga periode pembungaan tidak terjadi secara bersamaan dengan tanaman lain.
3. Isolasi fisik, yaitu penggunaan penghalang alami atau buatan untuk mencegah perpindahan serbuk sari.

Dengan penerapan manajemen agronomi dan isolasi yang tepat, kemungkinan terjadinya pencampuran genetik dapat diminimalkan sehingga kemurnian varietas tetap terjaga.

1.3.3 Pemeliharaan Kemurnian (*Roguing*)

Pemeliharaan kemurnian varietas merupakan kegiatan penting dalam produksi benih yang bertujuan untuk memastikan bahwa tanaman yang tumbuh di lahan produksi benar-benar sesuai dengan karakteristik varietas yang sedang diperbanyak. Salah satu metode utama yang digunakan untuk menjaga kemurnian varietas adalah kegiatan roguing (Chakrabarty et al. 2023; Kumar et al. 2023).

Roguing merupakan kegiatan mengidentifikasi dan menghilangkan tanaman yang menyimpang dari sifat varietas yang diinginkan. Tanaman yang menyimpang tersebut biasanya disebut sebagai off-type, yaitu tanaman yang memiliki karakter morfologi atau agronomi yang berbeda dari deskripsi varietas.

Penyimpangan varietas dapat disebabkan oleh berbagai faktor, antara lain pencampuran benih, penyerbukan silang dengan varietas lain, mutasi genetik, atau kesalahan dalam proses produksi benih. Oleh karena itu, kegiatan roguing sangat penting untuk mencegah penyebaran sifat yang tidak diinginkan dalam populasi tanaman.

Roguing biasanya dilakukan pada beberapa tahap pertumbuhan tanaman, yaitu:

1. Roguing pada fase vegetatif, untuk menghilangkan tanaman yang memiliki perbedaan karakter pertumbuhan atau bentuk daun.
2. Roguing pada fase pembungaan, untuk mengidentifikasi perbedaan warna bunga atau waktu berbunga.
3. Roguing pada fase menjelang panen, untuk memastikan keseragaman karakter hasil panen.

Keberhasilan kegiatan roguing sangat bergantung pada kemampuan petugas lapangan dalam mengenali karakter varietas yang sedang diproduksi. Oleh karena itu, pelatihan dan pengalaman menjadi faktor penting dalam pelaksanaan kegiatan ini.

Dengan melakukan roguing secara teratur dan sistematis, populasi tanaman di lahan produksi benih dapat dipertahankan dalam kondisi yang seragam. Hal ini akan membantu menjaga kemurnian genetik varietas serta memastikan bahwa benih yang dihasilkan memiliki kualitas yang sesuai dengan standar produksi benih.

1.4 Transisi Menuju Produksi Benih Modern

Perkembangan sistem produksi benih tidak dapat dilepaskan dari dinamika perkembangan ilmu pengetahuan, teknologi pertanian, serta kebutuhan manusia terhadap pangan yang terus meningkat. Sejak awal perkembangan pertanian, benih telah menjadi komponen utama dalam sistem budidaya tanaman karena menjadi sumber awal pertumbuhan tanaman dan menentukan potensi hasil yang dapat dicapai. Namun, cara manusia memproduksi dan mengelola benih telah mengalami perubahan yang signifikan seiring dengan kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Pada sistem pertanian tradisional, petani umumnya memproduksi benih secara mandiri dengan cara menyimpan sebagian hasil panen untuk digunakan kembali pada musim tanam berikutnya. Sistem ini dikenal sebagai *farmer-saved seed system*, yaitu sistem produksi benih yang berbasis pada praktik lokal dan pengalaman petani. Meskipun sistem tersebut memiliki kelebihan dalam hal kemandirian petani dan adaptasi lokal, kualitas benih yang dihasilkan sering kali tidak konsisten karena kurangnya pengawasan terhadap kemurnian varietas dan mutu benih.

Dalam sistem tradisional tersebut, pencampuran genetik antara varietas sering kali tidak dapat dihindari karena tidak adanya penerapan sistem isolasi yang memadai. Selain itu, proses seleksi benih yang dilakukan oleh petani umumnya masih bersifat sederhana dan tidak mengikuti prinsip-prinsip ilmiah dalam produksi benih. Akibatnya, benih yang dihasilkan sering mengalami penurunan kualitas genetik, fisiologis, maupun fisik dari waktu ke waktu.

Perkembangan ilmu pemuliaan tanaman pada abad ke-20 menjadi salah satu faktor penting yang mendorong perubahan sistem produksi benih. Melalui kegiatan pemuliaan tanaman, berbagai varietas unggul berhasil dikembangkan dengan karakteristik yang lebih baik dibandingkan varietas lokal, seperti produktivitas yang lebih tinggi, ketahanan terhadap hama dan penyakit, serta kemampuan beradaptasi terhadap berbagai kondisi lingkungan (Rahim et al. 2023). Namun, keberhasilan

pemuliaan tanaman tersebut hanya dapat dimanfaatkan secara optimal apabila didukung oleh sistem produksi benih yang mampu mempertahankan kemurnian dan kualitas varietas yang dihasilkan.

Seiring dengan meningkatnya kebutuhan pangan global, sistem produksi benih mulai mengalami transformasi menuju sistem yang lebih terorganisasi dan berbasis ilmu pengetahuan. Produksi benih modern tidak lagi hanya berfokus pada perbanyak tanaman, tetapi juga pada upaya menjaga integritas genetik varietas serta memastikan bahwa benih yang dihasilkan memiliki mutu yang tinggi dan konsisten. Dalam sistem ini, produksi benih dilakukan melalui tahapan yang terstruktur dan diawasi melalui berbagai mekanisme pengendalian mutu.

Transisi menuju produksi benih modern juga didorong oleh meningkatnya kompleksitas sistem pertanian. Pertanian modern menuntut produktivitas yang tinggi, efisiensi penggunaan sumber daya, serta kemampuan adaptasi terhadap perubahan lingkungan yang dinamis. Dalam konteks tersebut, penggunaan benih berkualitas tinggi menjadi salah satu faktor kunci dalam meningkatkan produktivitas dan stabilitas produksi tanaman.

Selain itu, globalisasi dalam sektor pertanian juga mempengaruhi perkembangan sistem produksi benih. Perdagangan benih antarnegara serta pertukaran sumber daya genetik semakin meningkat seiring dengan berkembangnya industri benih global. Kondisi ini menuntut adanya standar mutu benih yang lebih ketat serta sistem pengawasan yang lebih terintegrasi untuk memastikan kualitas benih yang beredar di pasar.

Perkembangan teknologi juga memberikan kontribusi besar terhadap modernisasi sistem produksi benih. Kemajuan dalam bidang bioteknologi, teknologi informasi, serta teknik budidaya modern telah membuka peluang baru dalam meningkatkan efisiensi dan akurasi dalam produksi benih. Teknologi tersebut memungkinkan pemantauan pertumbuhan tanaman secara lebih detail, pengendalian mutu benih secara lebih efektif, serta pengelolaan produksi yang lebih terintegrasi.

Dalam sistem produksi benih modern, berbagai teknologi baru mulai diterapkan untuk mendukung kegiatan produksi. Teknologi analisis genetik molekuler memungkinkan identifikasi varietas secara lebih akurat sehingga kemurnian genetik dapat dipertahankan dengan lebih baik. Teknologi pemetaan digital dan sistem informasi geografis memungkinkan pengelolaan lahan produksi benih secara lebih terencana. Sementara itu, penggunaan sensor dan teknologi pemantauan berbasis satelit memungkinkan pengamatan kondisi tanaman secara real-time.

Selain aspek teknologi, produksi benih modern juga ditandai dengan penerapan sistem manajemen mutu yang lebih ketat. Sistem sertifikasi benih menjadi salah satu mekanisme penting dalam memastikan bahwa benih yang diproduksi memenuhi standar mutu yang telah ditetapkan. Dalam sistem ini, setiap tahapan produksi benih diawasi melalui kegiatan inspeksi lapangan, pengujian laboratorium, serta pengawasan terhadap proses pengolahan dan penyimpanan benih.

Dengan demikian, transisi menuju produksi benih modern merupakan suatu proses yang melibatkan perubahan dalam berbagai aspek, mulai dari teknologi produksi, sistem manajemen, hingga pendekatan ilmiah dalam pengendalian mutu benih. Transformasi ini diharapkan mampu meningkatkan kualitas benih yang dihasilkan serta mendukung sistem pertanian yang lebih produktif, efisien, dan berkelanjutan.

1.4.1 Tantangan Produksi Kontemporer

Meskipun sistem produksi benih modern telah mengalami perkembangan yang pesat, sektor ini masih menghadapi berbagai tantangan yang semakin kompleks. Tantangan tersebut muncul sebagai akibat dari perubahan lingkungan global, dinamika sistem pertanian, serta meningkatnya tuntutan terhadap kualitas benih yang dihasilkan.

Salah satu tantangan utama dalam produksi benih saat ini adalah perubahan iklim global. Perubahan pola curah hujan, peningkatan suhu udara, serta meningkatnya frekuensi kejadian cuaca ekstrem dapat mempengaruhi pertumbuhan tanaman serta proses pembentukan benih. Kondisi lingkungan yang tidak

stabil dapat menyebabkan gangguan pada proses pembungaan, penyerbukan, dan pembentukan biji sehingga berpotensi menurunkan kualitas benih yang dihasilkan (Brunel-Muguet et al. 2025).

Perubahan iklim juga dapat mempengaruhi distribusi dan dinamika organisme pengganggu tanaman. Beberapa jenis hama dan penyakit tanaman dapat berkembang lebih cepat pada kondisi lingkungan tertentu sehingga meningkatkan risiko serangan pada tanaman produksi benih. Selain itu, beberapa patogen dapat terbawa melalui benih sehingga berpotensi menyebabkan penyebaran penyakit pada tanaman di berbagai wilayah.

Tantangan lain yang dihadapi dalam produksi benih adalah keterbatasan lahan produksi yang memenuhi persyaratan isolasi. Produksi benih memerlukan lahan yang memiliki jarak isolasi tertentu untuk mencegah terjadinya pencampuran genetik dengan varietas lain. Namun, dengan semakin meningkatnya intensitas penggunaan lahan pertanian, ketersediaan lahan yang memenuhi persyaratan tersebut menjadi semakin terbatas.

Selain faktor lingkungan dan lahan, produksi benih juga menghadapi tantangan dalam hal pengelolaan mutu dan distribusi benih. Sistem distribusi benih harus mampu memastikan bahwa benih yang sampai kepada petani tetap memiliki kualitas yang baik. Oleh karena itu, diperlukan sistem penyimpanan, transportasi, serta pengawasan mutu yang efektif untuk menjaga kualitas benih selama proses distribusi.

Di sisi lain, perkembangan sistem pertanian modern juga menuntut ketersediaan benih dengan karakteristik yang semakin spesifik. Petani membutuhkan benih yang tidak hanya memiliki produktivitas tinggi, tetapi juga memiliki ketahanan terhadap berbagai tekanan lingkungan serta mampu beradaptasi dengan berbagai sistem budidaya. Hal ini menuntut produsen benih untuk terus mengembangkan varietas baru serta meningkatkan kualitas sistem produksi benih.

Selain itu, produksi benih juga menghadapi tantangan dalam hal peningkatan kapasitas sumber daya manusia. Produksi benih memerlukan tenaga kerja yang memiliki pengetahuan dan

keterampilan khusus dalam bidang pemuliaan tanaman, agronomi, serta pengendalian mutu benih. Oleh karena itu, pengembangan sumber daya manusia menjadi faktor penting dalam mendukung keberhasilan sistem produksi benih modern.

1.4.2 Pengantar Inovasi Teknologi Presisi

Perkembangan teknologi digital dalam beberapa dekade terakhir telah membuka peluang baru dalam pengelolaan sistem produksi benih melalui penerapan teknologi pertanian presisi (*precision agriculture*). Teknologi ini merupakan pendekatan pengelolaan pertanian yang memanfaatkan berbagai perangkat digital untuk meningkatkan efisiensi dan akurasi dalam penggunaan sumber daya pertanian.

Teknologi presisi memungkinkan pengelolaan lahan pertanian secara lebih detail berdasarkan variasi kondisi lingkungan yang terdapat di dalam lahan tersebut. Melalui penggunaan sensor, citra satelit, serta sistem pemetaan digital, kondisi tanah dan tanaman dapat dipantau secara lebih akurat. Informasi tersebut kemudian digunakan untuk menentukan strategi pengelolaan yang paling sesuai dengan kondisi lahan.

Dalam produksi benih, teknologi presisi memiliki potensi yang sangat besar untuk meningkatkan efisiensi dan kualitas produksi. Salah satu penerapan teknologi presisi adalah penggunaan sensor tanah untuk memantau kondisi kelembapan, suhu, serta kandungan unsur hara dalam tanah. Informasi ini dapat digunakan untuk menentukan waktu irigasi dan pemupukan yang tepat sehingga pertumbuhan tanaman dapat dioptimalkan.

Selain itu, penggunaan drone dan citra satelit juga memungkinkan pemantauan kondisi tanaman secara real-time. Teknologi ini dapat digunakan untuk mendeteksi variasi pertumbuhan tanaman, kekurangan nutrisi, maupun serangan hama dan penyakit. Dengan demikian, tindakan pengendalian dapat dilakukan secara lebih cepat dan tepat.

Teknologi presisi juga memungkinkan penerapan *variable rate technology* (VRT), yaitu teknologi yang memungkinkan aplikasi pupuk, pestisida, dan air secara variabel sesuai dengan

kebutuhan tanaman pada setiap bagian lahan. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan efisiensi penggunaan input pertanian, tetapi juga membantu mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan.

Selain itu, teknologi presisi juga dapat mendukung kegiatan pemeliharaan kemurnian varietas dalam produksi benih. Teknologi pencitraan digital memungkinkan identifikasi perbedaan karakter tanaman secara lebih cepat sehingga kegiatan seleksi tanaman atau roguing dapat dilakukan secara lebih efektif.

Integrasi teknologi presisi dengan sistem informasi pertanian juga memungkinkan pengelolaan data produksi benih secara lebih sistematis. Data mengenai kondisi lahan, pertumbuhan tanaman, serta hasil produksi dapat disimpan dan dianalisis secara digital. Informasi tersebut dapat digunakan untuk meningkatkan efisiensi produksi serta mendukung pengambilan keputusan dalam pengelolaan produksi benih.

Dengan penerapan teknologi presisi, sistem produksi benih diharapkan dapat menjadi lebih efisien, akurat, dan berkelanjutan. Teknologi ini juga membuka peluang bagi pengembangan sistem produksi benih yang lebih modern dan berbasis data sehingga mampu mendukung peningkatan produktivitas pertanian di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- Anggi Mukhairokh Abdu, Yosini Deliana and Iwan Setiawan. 2025. Keputusan Pembelian Petani terhadap Benih East West Seed dalam Mendukung Penyediaan Benih Berkualitas serta Implementasi Green Agriculture di Jawa Barat. *JURNAL TRITON* 16(2), pp. 424–444. doi: 10.47687/jt.v16i2.1333.
- Brunel-Muguet, S. et al. 2025. Maternal environmental effects and climate-smart seeds: unlocking epigenetic inheritance for crop innovation in the seed industry. *The Plant Journal* 123(3). doi: 10.1111/tpj.70407.
- Chakrabarty, S.K., Basu, S. and Schipprach, W. 2023. Hybrid Seed Production Technology. In: *Seed Science and Technology*. Singapore: Springer Nature Singapore, pp. 173–212. doi: 10.1007/978-981-19-5888-5_9.
- Copeland, L.O. and McDonald, M.B. 2001. *Principles of Seed Science and Technology*. Boston, MA: Springer US. doi: 10.1007/978-1-4615-1619-4.
- Dai, J. et al. 2025. SeedGerm-VIG: an open and comprehensive pipeline to quantify seed vigor in wheat and other cereal crops using deep learning–powered dynamic phenotypic analysis. *GigaScience* 14. doi: 10.1093/gigascience/giaf129.
- Farmy, A., Attar, Z., Hikmah, N. and Kurniawan, A.B. 2023. Tarjih Agriculture System Journal Viabilitas dan Vigor Beberapa Varietas Padi pada berbagai Konsentrasi MOL Bonggol Pisang. *Tarjih Agriculture System Journal* 2(2), pp. 196–205. Available at: <https://jurnal-umsi.ac.id/index.php/agriculture>.
- Kumar, S., Sripathy, K. V., Udaya Bhaskar, K. and Vinesh, B. 2023. Principles of Quality Seed Production. In: *Seed Science and Technology*. Singapore: Springer Nature Singapore, pp. 109–131. doi: 10.1007/978-981-19-5888-5_6.
- Ojdowska, P., Oleksiak, T., Studnicki, M. and Iwańska, M. 2025. Certified Seed Use Enhances Yield Stability in Cereal Production Under Temperate Climate Conditions. *Agronomy* 15(8), p. 1886. doi: 10.3390/agronomy15081886.
- Ouaarous, M. et al. 2025. Impact of Field Insect Pests on Seed and Nutritional Quality of Some Important Crops: A Comprehensive

- Review. *ACS Omega* 10(9), pp. 8779–8792. doi: 10.1021/acsomega.4c08982.
- Pompelli, M.F., Jarma-Orozco, A. and Rodriguez-Páez, L.A. 2023. Imbibition and Germination of Seeds with Economic and Ecological Interest: Physical and Biochemical Factors Involved. *Sustainability* 15(6), p. 5394. doi: 10.3390/su15065394.
- Rahim, S., Suwarno, W.B. and Aswidinnoor, H. 2023. Genotype by Environment Interaction of IPB New Plant Type Rice Lines in Three Irrigated Lowland Locations. *Agrivita* 45(1), pp. 163–172. doi: 10.17503/agrivita.v45i1.3685.
- Singh, N.K., Alam, M., Saubhari, Y., Srivastava, R.P., Kumar, B., Shukla, A. and Baboo, A. 2026. The Science behind Seed Vigour: Biological Trait Linking Seed Quality. *Journal of Agriculture and Ecology Research International* 27(1), pp. 1–11. doi: 10.9734/jaeri/2026/v27i1724.
- Takeshima, H. et al. 2025. Seed certification, certified seeds use and yield outcomes in Nigeria: Insights from nationally-representative farm panel data and seed company location data. *Agricultural Systems* 224, p. 104268. doi: 10.1016/j.agry.2025.104268.
- Tiah, F.S., Msuya, D.G., Nassary, E.K. and Tryphone, G.M. 2026. Maize seed quality attributes: Exploring genetic, agronomic, and environmental factors for sustainable improvement – A Systematic Review. *Journal of Agriculture and Food Research* 25, p. 102623. doi: 10.1016/j.jafr.2025.102623.
- Wulantika, T., Fitri, F., Sondang, Y., Hardaningsih, W. and Wahono, S. 2025. Evaluasi Kualitas Benih Padi Junjuang (Varietas Unggul Lokal) dengan Aplikasi Pupuk Organik KoHeA+MF. *Agrotekma* 16(1), p. 2025. Available at: <http://ojs.uma.ac.id/index.php/agrotekma>.

BAB 2

RUANG LINGKUP DAN PERAN PEMULIAAN TANAMAN

2.1 Tahapan Kegiatan Pemuliaan Tanaman

Pemuliaan tanaman bukanlah kegiatan yang berdiri sendiri, tetapi terdiri dari beberapa tahapan yang saling terhubung dan membentuk satu proses yang berkelanjutan. Setiap tahapan memiliki tujuan, metode, dan hasil yang berbeda, namun semuanya saling terkait dan mendukung untuk mencapai hasil yang maksimal. Oleh karena itu, pemulia perlu memahami setiap tahapan secara menyeluruh, termasuk dasar ilmiah dan hubungan antar tahapan, agar dapat merancang program pemuliaan yang efektif dan efisien. Secara umum, proses pemuliaan tanaman berevolusi dari seleksi fenotipe konvensional menuju seleksi genotipe yang lebih presisi, terutama dengan adopsi teknologi Breeding 3.0 yang memanfaatkan data molekuler dan genomik (Fang, 2024).

2.1.1 Eksplorasi dan Koleksi Plasma Nutfah

1. Konsep dan Dasar Ilmiah

Plasma nutfah (*germplasm*) adalah seluruh bahan genetik yang dimiliki organisme hidup dan dapat diturunkan kepada keturunannya. Dalam pemuliaan tanaman, istilah ini mencakup semua sumber daya genetik yang tersimpan dalam bentuk biji, setek, kultur jaringan, serbuk sari, DNA, maupun tanaman hidup, termasuk juga kerabat liarnya (Nwachukwu *et al.*, 2016).

Ketersediaan plasma nutfah dengan keragaman genetik yang tinggi menjadi syarat utama dalam program pemuliaan. Tanpa variasi genetik yang cukup, proses seleksi tidak akan mampu menghasilkan perbaikan sifat yang berarti. Keragaman ini pada dasarnya terbentuk melalui proses panjang, seperti mutasi, rekombinasi, dan seleksi alam yang berlangsung selama ribuan bahkan jutaan tahun, sehingga menghasilkan kombinasi gen yang beragam dan sering kali sulit ditiru secara buatan.

2. Sumber Plasma Nutfah

Sumber plasma nutfah dapat dibagi menjadi beberapa kelompok dengan karakter dan nilai yang berbeda. Pertama, kultivar lokal (*landrace*), yaitu varietas tradisional yang telah lama beradaptasi dengan kondisi lingkungan setempat melalui seleksi oleh petani dari generasi ke generasi. Landrace biasanya memiliki keragaman genetik yang tinggi, sehingga lebih tahan terhadap perubahan lingkungan. (Gascuel *et al.*, 2017)

Kedua, varietas liar dan kerabat liar (*crop wild relatives/CWR*), yang menjadi sumber penting gen ketahanan terhadap hama, penyakit, dan cekaman lingkungan, namun belum banyak dimanfaatkan. Ketiga, varietas komersial, baik yang lama maupun yang baru, yang dapat menyimpan kombinasi gen unggul untuk sifat tertentu. Keempat, galur pemuliaan (*breeding lines*), yaitu hasil dari program pemuliaan sebelumnya yang masih memiliki potensi genetik dan belum sepenuhnya dimanfaatkan dalam varietas yang telah dilepas.

Kerabat liar tanaman budidaya (*crop wild relatives*) kini semakin banyak dimanfaatkan dalam pemuliaan modern karena menyimpan gen ketahanan yang sering hilang selama proses domestikasi. Misalnya, spesies liar dari genus *Oryza* seperti *O. rufipogon* dan *O. barthii* telah digunakan sebagai sumber gen untuk ketahanan terhadap penyakit hawar daun dan toleransi terhadap cekaman lingkungan pada padi (Zheng *et al.*, 2024). Begitu juga dengan spesies liar *Solanum* yang dimanfaatkan sebagai sumber gen ketahanan terhadap penyakit busuk daun (*Phytophthora infestans*) pada kentang. (Islam *et al.*, 2024).

Pemindahan gen dari kerabat liar ke tanaman budidaya memang tidak sederhana, karena sering membawa sifat yang tidak diinginkan. Oleh karena itu, diperlukan teknik khusus seperti persilangan bertahap (*bridging cross*) dan seleksi berbantuan penanda untuk memastikan hanya gen yang diinginkan yang dipertahankan. Meskipun cukup rumit, pendekatan ini menjadi salah satu cara penting untuk memperkaya keragaman genetik dalam program pemuliaan.

3. Metodologi Eksplorasi

Eksplorasi plasma nutfah dilakukan melalui kegiatan pengumpulan yang terencana di daerah-daerah yang menjadi pusat keragaman genetik. Menurut teori Vavilov, wilayah ini merupakan tempat asal domestikasi tanaman dan memiliki variasi sifat yang paling tinggi (Maxted & Vincent, 2021). Agar efektif, kegiatan eksplorasi perlu disusun secara sistematis, misalnya dengan gap analysis untuk melihat bagian mana dari koleksi yang masih kurang (Weise *et al.*, 2023). Dengan demikian, pengumpulan dapat difokuskan pada wilayah atau ekosistem yang belum banyak terwakili. Dalam pelaksanaannya, tim eksplorasi biasanya melibatkan ahli botani, ekologi, dan pemulia tanaman yang bekerja sama untuk mengidentifikasi, mencatat, dan mengumpulkan bahan genetik secara tepat dari populasi di alam.

Eksplorasi diambil dengan menyusuri area tertentu (transek) di berbagai jenis habitat. Selama eksplorasi tersebut, peneliti mencatat kondisi tempat tumbuh, seperti lokasi GPS, ketinggian, jenis tanah, dan curah hujan. Sampel yang diambil tidak dapat dilakukan secara sembarangan, harus mewakili keragaman dalam satu populasi. Oleh karena itu, biasanya diambil dari sekitar 50–100 tanaman, agar variasi genetiknya benar-benar tergambar, termasuk untuk memastikan keterwakilan gen yang jarang muncul (Weise *et al.*, 2023).

Setelah dikumpulkan, bahan tersebut tidak langsung disimpan begitu saja; biji perlu dikeringkan dulu hingga kadar airnya rendah (sekitar 5–7%), baru kemudian disimpan pada suhu dingin (sekitar -18°C) agar bisa bertahan lama (Corrales & Astrin, 2022). Sementara itu, bahan vegetatif atau bagian tanaman hidup butuh penanganan lebih khusus, misalnya disimpan dalam nitrogen cair, supaya tetap viabel untuk jangka panjang (Hay & Naidoo, 2021).

4. Sistem Konservasi dan Pengelolaan

Konservasi plasma nutfah umumnya dilakukan dengan dua cara, yaitu *ex situ* dan *in situ*. Konservasi *ex situ* berarti menyimpan bahan genetik di luar habitat aslinya. Bentuknya bisa berupa bank benih, kebun koleksi di lapangan, atau

penyimpanan dalam kultur jaringan (*in vitro*). Di antara metode tersebut, bank benih adalah yang paling efisien untuk penyimpanan jangka panjang, baik dari sisi biaya maupun ruang. Saat ini, sudah ada jaringan bank gen internasional yang dikoordinasikan oleh *Bioversity International*, yang menyimpan jutaan koleksi tanaman dari ratusan ribu spesies.

Sebaliknya, konservasi *in situ* dilakukan dengan mempertahankan tanaman tetap tumbuh di habitat aslinya (Nuraini *et al.*, 2022). Dengan cara ini, tanaman terus beradaptasi secara alami terhadap perubahan lingkungan dan tekanan dari hama maupun penyakit. Pendekatan ini sangat penting terutama untuk kerabat liar tanaman budidaya, karena dari proses alami tersebut dapat muncul gen-gen baru yang berguna, misalnya untuk ketahanan terhadap penyakit atau kondisi lingkungan yang ekstrem. Konservasi di habitat asli ini dapat berupa penanaman di kebun petani, hutan lindung, atau taman nasional, memadukan sistem budidaya dan pengelolaan tanaman dalam agroekosistem (Nuraini *et al.*, 2022).

Di tingkat nasional, pengelolaan plasma nutfah yang baik tidak dapat dilakukan oleh satu pihak saja. Dibutuhkan kerja sama antara lembaga penelitian, perguruan tinggi, pemerintah daerah, dan juga petani. Selain itu, harus ada aturan yang jelas terkait kepemilikan, akses, dan pembagian manfaat, agar pemanfaatan sumber daya genetik ini tetap adil dan sesuai dengan kesepakatan internasional seperti Protokol Nagoya.

Poin Kunci — Eksplorasi dan Koleksi Plasma Nutfah

Plasma nutfah merupakan fondasi utama dalam pemuliaan tanaman karena menyediakan keragaman genetik untuk pengembangan varietas. Pertanian modern yang seragam justru mempercepat erosi keragaman tersebut. Oleh karena itu, eksplorasi dan konservasi harus menjadi prioritas strategi jangka panjang agar program pemuliaan tidak terhambat.

2.1.2 Karakterisasi dan Evaluasi

1. Tujuan dan Diferensiasi Konsep

Karakterisasi dan evaluasi sering kali dianggap sama, padahal keduanya memiliki perbedaan yang cukup jelas dalam tujuan dan cara pelaksanaannya. Karakterisasi dilakukan untuk menggambarkan sifat-sifat dasar tanaman yang umumnya dikendalikan oleh sedikit gen dan cenderung stabil pada berbagai kondisi lingkungan. Dengan kata lain, sifat-sifat ini relatif tidak banyak dipengaruhi oleh perbedaan tempat tumbuh. Sifat yang diamati dalam karakterisasi biasanya berupa karakter morfologi yang mudah dikenali, seperti warna bunga, bentuk daun, tipe pertumbuhan, atau keberadaan struktur tertentu pada tanaman. Karena sifatnya yang konsisten, kegiatan karakterisasi umumnya cukup dilakukan satu kali pengamatan, dan hasilnya dapat digunakan sebagai acuan di lokasi lain.

Sebaliknya, evaluasi lebih difokuskan pada pengamatan sifat-sifat kompleks yang dikendalikan oleh banyak gen dan sangat dipengaruhi oleh interaksi dengan lingkungan. Penekanannya ada pada nilai agronomi dan kemampuan tanaman beradaptasi, bukan sekadar ciri dasarnya. Sifat yang dinilai dalam evaluasi umumnya bersifat kuantitatif, dikendalikan oleh banyak gen, dan sangat dipengaruhi oleh lingkungan. Contohnya hasil panen, ketahanan terhadap penyakit, efisiensi penggunaan hara, serta toleransi terhadap kekeringan. Karena sifat-sifat ini mudah berubah bergantung pada kondisi, pengujian perlu dilakukan di beberapa lokasi dan musim agar hasilnya lebih mewakili kondisi sebenarnya. Selain itu, karena pengaruh faktor genetik pada sifat-sifat ini sering tidak terlalu besar, diperlukan rancangan percobaan yang baik dan analisis statistik yang tepat. Dengan cara ini, pengaruh genetik dapat dibedakan dari pengaruh lingkungan secara lebih jelas.

2. Karakterisasi Morfologi dan Agronomi

Karakterisasi morfologi dilakukan menggunakan deskriptor yang sudah distandarisasi oleh lembaga internasional seperti Bioversity International, IPGRI, dan UPOV (Çakmakçı *et al.*, 2021; Leonelli, 2022). Standar ini penting agar data yang dihasilkan seragam dan bisa dibandingkan, baik antarlembaga

maupun antarnegara. Deskriptor tersebut mencakup berbagai sifat tanaman, mulai dari sifat vegetatif seperti bentuk, ukuran, dan warna daun atau batang, hingga sifat generatif seperti struktur bunga, tipe penyerbukan, dan bentuk biji. Selain itu, mencakup sifat fisiologis, misalnya waktu berbunga dan waktu panen. Dengan adanya standar ini, data karakterisasi dari berbagai sumber dapat digabungkan dan dimanfaatkan bersama dalam sistem informasi global, sehingga memudahkan pemulia tanaman di berbagai tempat untuk mengakses dan menggunakannya.

Seiring perkembangan teknologi, karakterisasi tidak lagi hanya bertumpu pada pengamatan morfologi, tetapi juga diperkuat dengan pendekatan biokimia dan molekuler (Bhat *et al.*, 2024). Pendekatan biokimia dilakukan dengan menganalisis komponen dalam tanaman, antara lain profil isozim, kandungan metabolit sekunder, serta komposisi protein (Bhat *et al.*, 2024). Pendekatan ini memberikan ketelitian yang lebih tinggi dalam membedakan antar aksesori dibandingkan pengamatan ciri fisik saja karena ciri fisik sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan (Yaman *et al.*, 2024). Selain itu, penanda molekuler antara lain SSR (*Simple Sequence Repeat*), SNP (*Single Nucleotide Polymorphism*), dan DArT (*Diversity Arrays Technology*), kini telah menjadi standar dalam karakterisasi plasma nutfah, terutama pada koleksi berskala besar. Keunggulannya terletak pada hasil yang tidak dipengaruhi oleh lingkungan, sehingga lebih stabil dan konsisten. Data yang dihasilkan dapat dianalisis secara statistik untuk menggambarkan keragaman genetik, menyusun struktur populasi, serta mengetahui hubungan kekerabatan antar aksesori (Bunjkar *et al.*, 2024).

Poin Kunci — Karakterisasi dan Evaluasi

Karakterisasi berfungsi untuk menetapkan identitas genetik suatu aksesori yang relatif stabil pada berbagai lingkungan, sedangkan evaluasi bertujuan menilai kinerja dan nilai agronominya pada kondisi lingkungan tertentu.

Integrasi data morfologis, biokimia, dan molekuler memberikan gambaran yang lebih utuh mengenai potensi serta posisi suatu aksesori dalam keragaman genetik. Informasi ini menjadi dasar penting dalam pemilihan tetua dan penyusunan strategi seleksi dalam program pemuliaan.

2.1.3 Seleksi

1. Dasar Genetik dalam Seleksi

Seleksi merupakan salah satu tahapan penting dalam kegiatan pemuliaan tanaman yang membedakannya dari perbanyakan biasa. Secara genetik, seleksi bekerja dengan mengubah frekuensi alel dalam suatu populasi dari satu generasi ke generasi berikutnya. Alel yang berkaitan dengan sifat unggul akan semakin banyak, sedangkan alel yang kurang menguntungkan akan semakin berkurang.

Keberhasilan seleksi sangat ditentukan oleh dua hal. Pertama, besarnya diferensial seleksi, yaitu selisih antara rata-rata individu terpilih dengan rata-rata populasi awal. Kedua, nilai heritabilitas dalam arti sempit (h^2), yang menunjukkan seberapa besar variasi sifat dipengaruhi oleh faktor genetik aditif.

Kemajuan seleksi dalam setiap generasi dapat diperkirakan melalui persamaan $\Delta G = i \times h^2 \times \sigma_p$, yakni i adalah intensitas seleksi, h^2 adalah heritabilitas, dan σ_p adalah simpangan baku fenotipik. Persamaan ini membantu pemulia dalam memperkirakan sekaligus mengoptimalkan hasil seleksi yang ingin dicapai.

Heritabilitas tidak dapat dipandang sebagai sifat yang melekat secara tetap pada suatu karakter, melainkan sangat bergantung pada populasi dan kondisi lingkungan tempat pengamatan dilakukan. Karakter yang sama dapat menunjukkan nilai heritabilitas yang berbeda pada populasi yang memiliki tingkat keragaman genetik yang berbeda. Pada populasi dengan keragaman genetik yang luas, nilai heritabilitas cenderung lebih tinggi, sedangkan pada populasi yang telah homogen secara genetik, nilainya dapat menurun (Dare *et al.*, 2024).

Selain itu, kondisi lingkungan juga memengaruhi besarnya heritabilitas. Lingkungan yang terkontrol umumnya menekan ragam lingkungan, sehingga meningkatkan estimasi heritabilitas. Sebaliknya, kondisi lingkungan yang heterogen meningkatkan ragam lingkungan dan menyebabkan penurunan nilai heritabilitas. Oleh karena itu, dalam pemuliaan tanaman, interpretasi dan pemanfaatan nilai heritabilitas harus selalu mempertimbangkan konteks populasi dan lingkungan, agar keputusan seleksi yang diambil tetap tepat dan relevan.

2. Metode Seleksi dalam Pemuliaan Tanaman

Seleksi massa merupakan metode paling sederhana dalam pemuliaan tanaman. Pada metode ini, individu dengan fenotipe terbaik dipilih langsung dari populasi yang bersegregasi, kemudian benih individu terpilih dicampur untuk membentuk generasi berikutnya tanpa melalui pengujian keturunan (Ammarellou & Mozaffarian, 2021; Mahajan *et al.*, 2021).

Metode ini umumnya efektif untuk sifat-sifat yang memiliki heritabilitas tinggi dan mudah diamati. Karena itu, seleksi massa masih banyak diterapkan, terutama pada tanaman menyerbuk silang dalam program pemuliaan berbasis populasi. Keunggulan utamanya terletak pada proses yang cepat dan biaya yang relatif rendah. Namun, metode ini kurang efektif untuk sifat-sifat yang kompleks dan memiliki heritabilitas rendah.

Seleksi galur murni (*pure line selection*) umumnya digunakan pada tanaman menyerbuk sendiri. Metode ini dilakukan dengan memilih individu dari populasi yang masih beragam, kemudian setiap individu diperbanyak secara terpisah hingga terbentuk galur yang secara genetik mendekati homozigot.

Selanjutnya, setiap galur diuji melalui percobaan berulang (*replicated*) untuk menilai kinerjanya. Dari hasil tersebut, galur-galur terbaik dipilih untuk dikembangkan lebih lanjut. Pendekatan ini memanfaatkan sifat menyerbuk sendiri untuk memfiksasi genotipe unggul, sehingga diperoleh galur yang stabil secara genetik dan mampu mempertahankan kemurnian varietas dalam produksi benih (Singh *et al.*, 2022).

Seleksi berulang (*recurrent selection*) merupakan metode yang bertujuan meningkatkan frekuensi alel yang menguntungkan secara bertahap melalui siklus seleksi berulang. Pada setiap siklus, individu terpilih disilangkan kembali, sehingga populasi yang dihasilkan semakin baik untuk sifat yang menjadi target (Ranjith & Rao, 2021).

Berbeda dengan seleksi galur murni yang menghasilkan varietas homozigot, seleksi berulang tetap mempertahankan keragaman genetik dalam populasi. Hal ini penting agar proses seleksi masih dapat dilanjutkan pada siklus-siklus berikutnya.

Salah satu bentuknya adalah seleksi berulang resiprokal (*Reciprocal Recurrent Selection/RRS*), yang melibatkan dua populasi. Masing-masing populasi digunakan sebagai penguji bagi yang lain, sehingga secara bersamaan dapat meningkatkan potensi hibrida yang dihasilkan dari kedua populasi tersebut (Fritsche-Neto, Ali, Asis, Allahgholipour, & Labroo, 2023).

Seleksi indeks merupakan metode yang menilai beberapa sifat sekaligus dengan menggabungkannya ke dalam satu nilai indeks melalui perhitungan matematis (Ambrósio, et al., 2024, p. 4029). Setiap sifat diberi bobot sesuai dengan tingkat kepentingan ekonomi dan nilai heritabilitasnya, sehingga penilaian tidak terfokus hanya pada satu sifat (Rahimi & Debnath, 2023).

Dengan cara ini, individu yang dipilih adalah yang memiliki kombinasi sifat terbaik secara keseluruhan, bukan sekadar unggul pada satu karakter. Pendekatan ini umumnya memberikan kemajuan yang lebih besar dibandingkan seleksi yang dilakukan satu per satu sifat (seleksi tandem) atau berdasarkan batas minimum tertentu (*threshold selection*), terutama jika sifat-sifat yang diamati saling berkorelasi negatif (Civán *et al.*, 2021).

3. Seleksi pada Berbagai Spesies Tanaman

Strategi seleksi sangat ditentukan oleh sistem perkawinan tanaman yang menjadi target. Pada tanaman menyerbuk sendiri, seperti padi, kedelai, gandum, dan sorgum, seleksi umumnya diarahkan untuk mendapatkan galur yang mendekati homozigot. Kegiatan ini dilakukan pada generasi filial (*F*),

biasanya mulai dari F3 atau F4, dengan metode seperti silsilah (*pedigree method*) atau *single seed descent* (SSD).

Pada tanaman menyerbuk silang, seperti jagung dan banyak tanaman hortikultura, tingkat heterozigositas yang tinggi membuat seleksi berdasarkan fenotipe individu kurang efektif. Oleh karena itu, pendekatan yang lebih tepat adalah melalui pengujian keturunan (progeni) dan seleksi berulang agar kemajuan genetik dapat dicapai secara bertahap dan berkelanjutan (Vieira *et al.*, 2021).

Sementara itu, pada tanaman yang diperbanyak secara vegetatif, seperti ubi kayu, kentang, pisang, dan tebu, kombinasi gen unggul dapat langsung dipertahankan dalam bentuk klon tanpa perlu proses *inbreeding*. Dengan demikian, satu individu yang menunjukkan performa unggul sudah dapat langsung dijadikan kandidat varietas (Ishtiaq *et al.*, 2023).

Poin Kunci — Seleksi

Kemajuan seleksi pada setiap generasi dipengaruhi oleh intensitas seleksi, nilai heritabilitas, dan besarnya keragaman fenotipik dalam populasi. Oleh karena itu, pemilihan metode seleksi harus disesuaikan dengan sistem perkawinan tanaman, sifat yang menjadi target, serta tujuan akhir program pemuliaan. Ketepatan dalam memilih metode ini sangat menentukan efisiensi program secara keseluruhan. Selain seleksi fenotipik yang selama ini digunakan, pendekatan berbasis penanda molekuler (marker-assisted selection/MAS) dan genomic selection kini semakin berperan sebagai pelengkap untuk meningkatkan ketepatan dan kecepatan seleksi.

2.1.4 Persilangan (Hibridisasi)

1. Tujuan dan Dasar Genetik dalam Hibridisasi

Hibridisasi merupakan proses persilangan antara dua tetua yang berbeda untuk menggabungkan materi genetik, dengan tujuan menghasilkan kombinasi alel baru pada keturunannya. Kombinasi ini sering kali tidak terdapat pada masing-masing tetua secara terpisah (Chawla *et al.*, 2023).

Secara genetik, hibridisasi didasarkan pada hukum segregasi dan assortasi bebas Mendel. Pada generasi F₁, individu hasil persilangan membawa satu *set* alel dari masing-masing tetua. Selanjutnya, pada generasi segregan (F₂ dan seterusnya), terjadi pemisahan dan rekombinasi alel yang menghasilkan keragaman genetik dan fenotipik yang luas. Keragaman pada populasi segregan ini menjadi dasar utama dalam kegiatan seleksi untuk memperoleh genotipe unggul dalam program pemuliaan tanaman.

Dalam pemuliaan tanaman modern, hibridisasi digunakan untuk menggabungkan gen-gen unggul dari beberapa tetua ke dalam satu genotipe. Tujuannya adalah memperoleh varietas yang stabil, biasanya dalam bentuk galur homozigot atau galur inbrida yang membawa kombinasi sifat yang diinginkan.

2. Pemilihan Tetua Persilangan

Pemilihan tetua yang tepat merupakan salah satu keputusan paling krusial dalam perancangan program hibridisasi karena menentukan batas atas keragaman genetik yang dapat dieksploitasi melalui seleksi. Prinsip dasar dalam pemilihan tetua mencakup tiga aspek utama: pertama, tetua harus memiliki nilai rata-rata yang tinggi untuk sifat target, sehingga keturunannya diharapkan berada di atas ambang batas yang diinginkan; kedua, tetua harus menunjukkan keragaman genetik yang komplementer, di mana setiap tetua berkontribusi alel unik yang tidak dimiliki tetua lainnya; serta ketiga, tetua harus memiliki nilai kombinasi (*combining ability*) yang baik (Yan, 2021).

Daya gabung umum (*General Combining Ability/GCA*) menunjukkan kemampuan rata-rata suatu galur untuk menghasilkan keturunan unggul ketika disilangkan dengan berbagai galur lain, yang pada dasarnya merepresentasikan efek gen aditif (Ahmed *et al.*, 2023; Begna *et al.*, 2023). Sebaliknya, daya gabung khusus (*Specific Combining Ability/SCA*) menggambarkan performa kombinasi persilangan spesifik yang menyimpang dari prediksi berdasarkan GCA kedua tetuanya, sebagai manifestasi efek non-aditif seperti dominansi dan epistasis (Ahmed *et al.*, 2023; Hosseini *et al.*, 2025). Dalam

program pemuliaan varietas bersari bebas dan varietas hibrida, GCA dan SCA memiliki implikasi yang berbeda: khusus untuk varietas hibrida, nilai SCA yang tinggi antara dua galur inbrida menjadi indikator kuat bahwa kombinasi tersebut akan menghasilkan hibrida F1 yang superior (Ahmed et al., 2023; Begna et al., 2023).

Pendekatan dialel dan top-cross digunakan untuk mengukur GCA dan SCA pada kumpulan galur calon tetua (Aslam et al., 2022; Hosseini et al., 2025). Persilangan dialel melibatkan semua kemungkinan pasangan persilangan dari sekelompok galur, yang menghasilkan data berbentuk matriks untuk dianalisis dengan metode Griffing untuk memisahkan GCA dan SCA (Essa & Alwan, 2024). Walaupun berguna, persilangan dialel lengkap sulit dilakukan jika jumlah galur banyak (untuk n galur, dibutuhkan $n(n-1)/2$ persilangan); oleh karena itu, cara sederhana seperti NC Design II atau analisis Line $\times$ Tester lebih sering digunakan dalam pemuliaan komersial (Aslam et al., 2022; Datta et al., 2021).

3. Teknik Hibridisasi

Teknik hibridisasi mekanis berbeda-beda tergantung pada bentuk bunga, cara penyerbukan, dan ukuran alat kelamin tanaman yang ditargetkan. Pada tanaman berbunga kecil seperti padi dan gandum, kastrasi, yaitu penghilangan benang sari dari induk betina sebelum matang, dilakukan dengan pinset dalam kondisi aliran udara terkendali untuk mencegah masuknya serbuk sari asing. Penyerbukan kemudian dilakukan dengan mengoleskan serbuk sari dari induk jantan ke kepala putik yang sudah matang pada induk betina yang telah dikastrasi, sering kali dilindungi dengan kantong isolasi sebelum dan sesudah proses untuk menghindari kontaminasi.

Pada tanaman dengan sistem ketidaksesuaian diri alami atau kemandulan jantan (*male sterility*), proses hibridisasi menjadi lebih mudah tanpa perlu kastrasi manual yang melelahkan. Sistem kemandulan jantan sitoplasmik (*Cytoplasmic Male Sterility*/CMS) banyak dimanfaatkan untuk produksi benih hibrida komersial pada padi, jagung, sorgum, bunga matahari, serta berbagai sayuran (Fang, Sun, Li, Li, & Zhang, 2023, p. 3).

Dalam sistem ini, galur mandul jantan (A-line) berfungsi sebagai induk betina, galur pemulih kesuburan (R-line) sebagai induk jantan, dan galur pemelihara (B-line) untuk memperbanyak galur A-line (Malik, *et al.*, 2024, p. 3). Pendekatan tiga galur ini memungkinkan produksi benih hibrida secara efisien dalam skala besar tanpa kastrasi manual.

4. Pengelolaan Populasi Segregan

Setelah persilangan berhasil menghasilkan keturunan F1, pengelolaan generasi berikutnya disesuaikan dengan sasaran program pemuliaan. Untuk mengembangkan varietas homozigot pada tanaman penyerbuk sendiri, terdapat beberapa metode: (1) Metode silsilah (*pedigree method*) melacak identitas setiap galur individu mulai F2 hingga generasi lanjut, dengan mencatat silsilah lengkap meski memerlukan lahan dan tenaga ekstra; (2) Metode *bulk* mencampur semua biji dari generasi awal (F2–F4) sambil membiarkan seleksi alam serta buatan berlangsung pada populasi campuran, diikuti pemilihan galur individu pada tahap berikutnya; (3) *Single Seed Descent* (SSD) mengambil satu biji per tanaman tiap generasi untuk mempercepat homozigositas dengan sumber daya seminimal mungkin; (4) *Doubled Haploid* (DH) memanfaatkan kultur antera atau biji tak tersubur untuk menghasilkan tanaman haploid, yang kemudian kromosomnya digandakan menggunakan kolkisin, sehingga langsung memperoleh individu homozigot sempurna dalam satu generasi.

Metode *Doubled Haploid* semakin luas diterapkan dalam program pemuliaan tanaman karena memberikan efisiensi waktu yang sangat tinggi: proses pencapaian homozigositas yang umumnya memerlukan 5–7 generasi selfing (3–5 tahun) dapat dipersingkat menjadi satu tahap saja, sehingga secara signifikan mempercepat siklus pemuliaan secara keseluruhan; namun, metode ini memiliki keterbatasan berupa biaya tinggi, ketergantungan pada fasilitas kultur jaringan, serta kemungkinan bias genotipe akibat tekanan seleksi *in vitro* yang tidak selalu mewakili populasi segregasi secara proporsional.

Poin Kunci — Persilangan (Hibridisasi)

Hibridisasi merupakan cara untuk menciptakan dan menyusun kembali keragaman genetik dalam populasi pemuliaan. Pemilihan tetua yang sesuai berdasarkan nilai GCA, SCA, dan kecocokan genetik, dikombinasikan dengan teknik persilangan yang tepat serta pengelolaan generasi segregan yang efisien, secara langsung mempengaruhi kualitas bahan genetik yang siap untuk diseleksi pada tahap selanjutnya.

2.1.5 Pengujian Varietas

1. Struktur dan Sasaran Pengujian

Pengujian varietas adalah proses verifikasi bertahap dan terstruktur untuk memastikan bahwa galur atau varietas calon unggul lebih baik daripada varietas pembanding (*check variety*) yang telah ada, stabil di berbagai lingkungan, serta aman dan bermanfaat bagi pertanian nasional. Pengujian dilakukan secara bertingkat dari skala kecil hingga besar, mulai dari kondisi penelitian terkendali hingga lapangan yang menyerupai praktik petani sehari-hari. Pendekatan hierarkis ini tidak hanya memvalidasi keunggulan genetik secara bertahap, tetapi juga mengungkap kelemahan yang mungkin terlewat pada tahap awal dengan lokasi dan ulangan terbatas.

Pengujian Awal (*Preliminary Yield Trial*) dilakukan pada generasi seleksi dini dengan ratusan hingga ribuan galur, menggunakan desain sederhana seperti augmented design tanpa atau dengan satu ulangan. Tujuannya adalah penyaringan kasar untuk membuang galur berkinerja rendah secara jelas, sehingga sumber daya difokuskan pada kandidat potensial (biasanya menyisakan 10–20% galur terbaik) (Ghifari *et al.*, 2021).

Pengujian Lanjutan (*Advanced Yield Trial*) melibatkan puluhan galur terpilih, dengan desain berulang (RCBD atau *Alpha Lattice*) di satu atau lebih lokasi. Tahap ini memberikan estimasi statistik yang lebih akurat tentang perbedaan genetik, serta evaluasi menyeluruh terhadap sifat agronomi seperti hasil,

ketahanan penyakit, kualitas, dan adaptasi terhadap cekaman lingkungan (Ibrahim *et al.*, 2022; Kleter *et al.*, 2023).

2. Pengujian Multilokasi dan Analisis Stabilitas

Uji Multilokasi (*Multi-Environment Trial*/MET) adalah bagian penting dalam pengujian varietas karena membantu mengukur interaksi genotipe-lingkungan (GxE), yang menjadi salah satu hambatan utama dalam memilih varietas unggul (Ghifari *et al.*, 2021; Kumar *et al.*, 2023). Interaksi GxE muncul ketika urutan unggul-rendahnya galur berubah-ubah antar lokasi atau musim, sehingga tidak ada galur yang terbaik di semua kondisi (Ghifari *et al.*, 2021). Dengan memahami pola GxE ini, pemulia dapat memutuskan: mengembangkan varietas adaptasi luas (performa stabil di banyak tempat) atau adaptasi spesifik (unggul di lokasi tertentu meski kurang di tempat lain) (Ibrahim *et al.*, 2022).

Analisis Stabilitas memanfaatkan metode statistik untuk mengukur dan menjelaskan respons galur terhadap variasi lingkungan. Metode umum dalam analisis data uji multilokasi (MET) meliputi regresi Eberhart & Russell, analisis AMMI (*Additive Main Effects and Multiplicative Interaction*), serta GGE biplot (*Genotype and Genotype-by-Environment interaction biplot*) (Yustiningsig *et al.*, 2026). GGE biplot paling disukai karena menyajikan grafik sederhana yang menunjukkan hubungan antargalur, antarlokasi, dan interaksi keduanya, sehingga memudahkan identifikasi galur stabil sekaligus unggul (*winning genotype*) untuk setiap megalingkungan yang terdeteksi (Zerehgar *et al.*, 2023).

3. Pengujian Nilai Keunggulan, Keceragaman, dan Kemantapan (VCU dan DUS)

Dalam regulasi pelepasan varietas tanaman, pengujian varietas dibagi menjadi dua kategori. Pertama adalah pengujian *Value for Cultivation and Use* (VCU) atau yang dalam istilah Indonesia disebut sebagai pengujian keunggulan, yang bertujuan memverifikasi bahwa varietas kandidat memiliki nilai tambah bagi petani dan industri pertanian dibandingkan varietas pembanding terbaik yang sudah ada (Yang *et al.*, 2021). VCU mengevaluasi sifat-sifat agronomis kunci seperti potensi hasil,

ketahanan terhadap hama dan penyakit utama, kualitas hasil panen, dan adaptabilitas terhadap kondisi lingkungan produksi yang relevan (Yang *et al.*, 2021).

Kedua adalah pengujian *Distinctness, Uniformity, and Stability* (DUS), yang merupakan persyaratan mutlak untuk pendaftaran dan perlindungan varietas baru (Yang *et al.*, 2021). Pengujian *Distinctness* memverifikasi bahwa varietas kandidat dapat dibedakan secara jelas dari semua varietas yang sudah terdaftar berdasarkan satu atau lebih karakteristik yang dapat diamati secara konsisten. Pengujian *Uniformity* memastikan bahwa tanaman dalam satu populasi varietas cukup seragam untuk karakteristik yang menjadi dasar pembedaannya, sesuai dengan sistem reproduksi varietas tersebut. Pengujian *Stability* memverifikasi bahwa karakteristik pembeda varietas tetap konsisten dari satu siklus produksi ke siklus berikutnya. Ketiga kriteria DUS ini secara kolektif menjamin bahwa varietas yang dilindungi memiliki identitas genetik yang terdefinisi dengan jelas dan dapat diidentifikasi secara reproduktibel.

Poin Kunci — Pengujian Varietas

Pengujian varietas merupakan mekanisme verifikasi bertahap yang menjamin keunggulan genetik kandidat varietas terealisasi secara konsisten di beragam kondisi lingkungan produksi yang relevan. Analisis interaksi Genotipe x Lingkungan (GxE) via uji multilokasi tidak hanya memenuhi tuntutan regulasi, melainkan juga menjadi instrumen ilmiah untuk mengarahkan strategi pelepasan varietas berdasarkan zona adaptasi yang terbukti secara empiris.

2.1.6 Pelepasan Varietas

1. Kerangka Regulatoris Pelepasan Varietas

Pelepasan varietas merupakan tahap resmi yang menetapkan suatu varietas baru agar benihnya dapat diproduksi dan diedarkan kepada petani (Adiyoga, 2021; Silva *et al.*, 2021). Di Indonesia, proses ini diatur dalam Undang-Undang Nomor 29 Tahun 2000 tentang Perlindungan Varietas Tanaman serta

berbagai peraturan turunan dari Kementerian Pertanian. Prosedurnya dimulai dari pengajuan oleh pemohon, baik pemulia, lembaga penelitian, maupun perusahaan benih (Rosra, 2023), kemudian dilanjutkan dengan dilakukannya evaluasi teknis berdasarkan data uji VCU dan DUS (Yang, *et al.*, 2021; Ngendo, *et al.*, 2022). Hasil evaluasi tersebut dibahas dalam sidang Komisi Varietas Nasional (KVN), dan jika memenuhi syarat, akan ditetapkan melalui Surat Keputusan Menteri Pertanian.

Secara teknis, varietas yang diajukan harus menunjukkan keunggulan yang jelas dibandingkan varietas pembanding, minimal pada satu sifat utama, tanpa memiliki kelemahan yang berarti pada sifat lainnya. Selain itu, deskripsi varietas harus disusun secara lengkap dan akurat; dokumen ini menjadi acuan resmi dalam proses sertifikasi benih untuk memastikan identitas dan kemurnian varietas selama beredar di lapangan (Azmi *et al.*, 2024; Chauhan *et al.*, 2023; Setiani *et al.*, 2023).

2. Jenis-jenis Varietas yang Dilepas

Berdasarkan asal genetik dan cara perbanyakannya, varietas tanaman dapat dibedakan ke dalam beberapa kelompok. Varietas bersari bebas (*open-pollinated variety/OPV*) merupakan varietas populasi yang terbentuk dari penyerbukan alami antar tanaman dalam satu populasi. Varietas ini umumnya tampak seragam secara fenotipik, tetapi masih memiliki keragaman genetik di dalamnya. Benih OPV dapat diproduksi kembali oleh petani dari hasil panen, selama kemurnian varietas tetap dijaga, misalnya melalui isolasi dari varietas lain.

Varietas hibrida (*F1 hybrid*) memiliki tingkat keseragaman yang tinggi dan biasanya menunjukkan keunggulan hasil akibat efek heterosis. Namun, benih yang dihasilkan pada generasi berikutnya (*F2*) akan mengalami segregasi sehingga sifat unggulnya tidak lagi stabil. Oleh karena itu, benih hibrida perlu diproduksi ulang setiap musim tanam. Sementara itu, varietas klon (*clonal variety*) digunakan untuk tanaman yang diperbanyak secara vegetatif. Pada varietas ini, seluruh tanaman merupakan salinan genetik yang sama dari satu individu asal, sehingga memiliki keseragaman yang sangat tinggi.

Varietas sintetik (*synthetic variety*) merupakan kategori khusus dalam pemuliaan tanaman modern yang dibentuk dari persilangan bebas beberapa galur atau klon terpilih yang memiliki daya gabung umum (*general combining ability/GCA*) tinggi. Varietas ini berada di antara varietas bersari bebas (OPV) dan varietas hibrida. Dari segi penampilan, varietas sintetik lebih seragam dan stabil dibandingkan dengan OPV, tetapi tidak memerlukan biaya produksi benih setinggi hibrida. Selain itu, benihnya masih dapat digunakan kembali oleh petani selama beberapa generasi, meskipun kualitasnya akan menurun secara bertahap.

Karena karakteristik tersebut, varietas sintetik sangat sesuai bagi tanaman menyerbuk silang, terutama di wilayah yang akses terhadap benih hibrida atau sistem benih formal masih terbatas (Dhillon & Jat, 2024).

2.1.7 Pendekatan dalam Pemuliaan Tanaman

1. Pemuliaan Konvensional

Pemuliaan konvensional bertumpu pada prinsip genetika Mendel dan genetika kuantitatif, dengan seleksi berdasarkan fenotipe serta hibridisasi sebagai cara utama untuk mengubah frekuensi alel dalam populasi (Vu *et al.*, 2022). Meskipun telah digunakan lebih dari satu abad dan menghasilkan kemajuan besar, termasuk varietas Revolusi Hijau, pendekatan ini memiliki keterbatasan yang semakin jelas dalam pemuliaan modern (Vu *et al.*, 2022).

Keterbatasan utamanya adalah ketidakmampuan untuk langsung menargetkan gen tertentu yang mengendalikan sifat yang diinginkan. Pemulia bekerja berdasarkan penampilan tanaman, yang merupakan hasil interaksi kompleks antara gen dan lingkungan (Saad *et al.*, 2021). Untuk sifat dengan heritabilitas rendah atau yang muncul pada tahap tertentu, seperti ketahanan terhadap penyakit, seleksi fenotipik menjadi kurang efisien dan membutuhkan waktu serta biaya yang besar. Selain itu, siklus pemuliaan yang panjang, sekitar 8–15 tahun dari persilangan hingga pelepasan varietas, menjadi tantangan tersendiri.

Meskipun demikian, pemuliaan konvensional tetap menjadi dasar penting dalam pemuliaan modern (Covarrubias-Pazaran *et al.*, 2021). Pemahaman tentang biologi tanaman, dinamika populasi, dan genetika kuantitatif tetap diperlukan sebagai landasan dalam memanfaatkan teknologi molekuler dan bioteknologi (Covarrubias-Pazaran *et al.*, 2021). Tanpa kemampuan mengamati tanaman di lapangan dan memahami sifat agronomisnya, data molekuler tidak dapat diinterpretasikan secara tepat dalam konteks biologis dan agronomi.

2. Pemuliaan Molekuler

Pemuliaan molekuler menggunakan penanda DNA untuk meningkatkan ketepatan dan efisiensi seleksi dalam pemuliaan tanaman (Karakaş, 2024). Penanda molekuler adalah segmen DNA dengan lokasi tertentu pada kromosom yang digunakan untuk melacak keberadaan gen atau alel yang berdekatan melalui keterkaitan genetik (linkage disequilibrium) (Karakaş, 2024). Karena tidak dipengaruhi oleh lingkungan dan dapat diamati sejak tahap bibit, penanda ini mempercepat proses seleksi dibandingkan menunggu ekspresi sifat pada tanaman dewasa (Meena *et al.*, 2023).

Marker-Assisted Selection (MAS) menggabungkan informasi penanda molekuler dengan data fenotipe untuk mengidentifikasi genotipe yang membawa alel target berdasarkan hasil pemetaan gen dan analisis QTL. MAS paling efektif digunakan untuk sifat yang dikendalikan oleh satu atau sedikit gen dengan efek besar, misalnya ketahanan terhadap penyakit tertentu. Pada kondisi ini, hubungan antara penanda dan gen target relatif jelas sehingga prediksi menjadi lebih akurat. Namun, untuk sifat kuantitatif yang dikendalikan oleh banyak gen dengan efek kecil, MAS menjadi kurang efisien karena jumlah QTL yang harus dilacak terlalu banyak (Maulana *et al.*, 2023).

Genomic Selection (GS) mengatasi keterbatasan tersebut dengan menggunakan data penanda genom secara luas, biasanya ribuan hingga jutaan SNP di seluruh genom, untuk memprediksi nilai pemuliaan individu. Model GS dibangun dari

populasi referensi yang memiliki data genotipe dan fenotipe lengkap, kemudian digunakan untuk memprediksi individu baru hanya berdasarkan data genotipe. Dengan pendekatan ini, evaluasi fenotipe yang memakan waktu dan biaya besar dapat dikurangi, sehingga siklus seleksi menjadi lebih cepat (Escamilla *et al.*, 2025).

Genome-Wide Association Studies (GWAS) merupakan metode untuk mengidentifikasi hubungan antara variasi SNP di seluruh genom dengan variasi sifat pada populasi yang besar dan beragam. Berbeda dengan pemetaan QTL yang menggunakan populasi hasil persilangan terstruktur, GWAS memanfaatkan variasi alami dan rekombinasi yang telah terjadi lama dalam populasi atau koleksi plasma nutfah, sehingga resolusi pemetaan menjadi lebih tinggi. SNP yang berasosiasi kuat dengan sifat tertentu dapat digunakan untuk menemukan gen kandidat yang mengendalikan sifat tersebut, sehingga memberikan pemahaman tentang dasar genetik dan fisiologis yang berguna dalam pemuliaan.

3. Pemuliaan Berbasis Bioteknologi

Pemuliaan berbasis bioteknologi mencakup berbagai teknologi yang memodifikasi genetika tanaman yang tidak dapat dilakukan melalui persilangan secara konvensional. Salah satu teknologi utama adalah tanaman transgenik (*genetically modified organisms/GMO*), yang mulai dikembangkan pada awal tahun 1980-an (Yu *et al.*, 2022). Teknologi ini memungkinkan pemindahan gen tertentu dari organisme yang secara evolusioner sangat jauh, bahkan dari kerajaan yang berbeda, ke dalam genom tanaman. Contohnya adalah gen Bt (*Bacillus thuringiensis*) yang menghasilkan protein toksik bagi serangga tertentu dan telah digunakan pada jagung, kapas, dan kedelai untuk meningkatkan ketahanan terhadap hama, sehingga dapat mengurangi penggunaan insektisida kimia di lapangan.

Perkembangan berikutnya adalah teknologi gene editing berbasis CRISPR-Cas9 (*Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats - CRISPR Associated protein 9*), yang memberikan kemampuan untuk memodifikasi genom secara lebih presisi. Sistem ini bekerja seperti 'gunting molekuler' yang

diarahkan oleh RNA panduan (guide RNA) untuk mengenali sekuens DNA tertentu, kemudian memotongnya pada lokasi spesifik. Setelah pemotongan, mekanisme perbaikan DNA sel dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan mutasi (*non-homologous end joining/NHEJ*), atau mengganti sekuens tertentu dengan sekuens baru (*homology-directed repair/HDR*).

Dalam pemuliaan tanaman, CRISPR telah digunakan untuk berbagai tujuan seperti meningkatkan ketahanan terhadap penyakit melalui modifikasi gen kerentanan pada padi dan gandum, meningkatkan kualitas nutrisi melalui perubahan jalur biosintesis, meningkatkan toleransi terhadap herbisida, serta memperbaiki arsitektur tanaman untuk efisiensi cahaya dan kemudahan panen (Basu *et al.*, 2023). Berbeda dengan transgenik yang memasukkan DNA asing, banyak hasil gene editing hanya menghasilkan perubahan yang mirip mutasi alami, sehingga menimbulkan perdebatan terkait regulasi yang seharusnya diterapkan

Selain itu, terdapat beberapa teknologi bioteknologi lain yang juga digunakan dalam pemuliaan, seperti kultur antera dan mikrospora untuk menghasilkan doubled haploid, fusi protoplas untuk hibridisasi somatik, serta RNA interference (RNAi) untuk menekan ekspresi gen tertentu (Anand *et al.*, 2023). Masing-masing teknologi memiliki kegunaan yang spesifik dan perlu dipilih serta diintegrasikan sesuai tujuan pemuliaan, ketersediaan fasilitas, dan regulasi yang berlaku.

4. Integrasi Pemuliaan Tanaman dengan Teknologi Benih

Integrasi antara pemuliaan tanaman dan teknologi benih merupakan syarat penting agar hasil perbaikan genetik dapat sampai ke petani secara efektif. Hubungan keduanya tidak hanya berurutan, dimana pemulia menghasilkan varietas lalu teknologi benih memperbanyaknya, tetapi juga saling memengaruhi sejak awal. Pertimbangan seperti keseragaman populasi, stabilitas genetik, dan kemudahan produksi benih perlu dimasukkan dalam perancangan program pemuliaan, bukan hanya dipikirkan di akhir proses.

Dari sisi teknologi benih, varietas yang dihasilkan harus mendukung produksi benih yang berkualitas. Hal ini meliputi

sistem reproduksi yang jelas, baik menyerbuk sendiri, menyerbuk silang, maupun vegetatif, serta respons benih yang stabil terhadap perlakuan seperti seed priming, seed coating, atau peningkatan vigor. Selain itu, benih juga harus memiliki daya simpan yang baik dan mampu berkecambah secara seragam. Jika viabilitas benih rendah atau cepat menurun selama penyimpanan, maka distribusi benih akan menjadi masalah, terutama di daerah dengan fasilitas penyimpanan yang terbatas.

Sebaliknya, perkembangan teknologi benih juga memberi ruang bagi pemuliaan untuk memanfaatkan sifat-sifat yang sebelumnya sulit digunakan dalam sistem konvensional. Misalnya, teknik priming dapat memperbaiki kecepatan perkecambahan varietas tertentu, sehingga tetap kompetitif di lapangan. Teknologi seed coating dengan mikroba atau agen hayati juga dapat membantu meningkatkan ketahanan terhadap penyakit yang sulit diperbaiki melalui perbaikan genetik langsung.

Pada varietas hibrida, keterkaitan antara pemuliaan dan teknologi benih menjadi lebih kuat. Produksi benih hibrida sangat bergantung pada pemahaman biologi reproduksi tanaman, seperti waktu berbunga, sinkronisasi penyerbukan, rasio penanaman tetua, serta isolasi dari sumber serbuk sari lain. Karena itu, pemulia perlu mempertimbangkan aspek produksi benih sejak tahap pemilihan tetua, bukan hanya fokus pada hasil atau heterosis saja.

Sertifikasi benih merupakan tahapan penting yang mempertemukan pemuliaan dan teknologi benih. Pada tahap ini, deskripsi varietas yang dibuat oleh pemulia digunakan sebagai acuan untuk memastikan identitas genetik tetap terjaga selama proses produksi benih. Jika deskripsi tersebut tidak cukup jelas atau sulit diamati di lapangan, maka proses verifikasi dapat menjadi tidak akurat. Karena itu, pemulia memiliki tanggung jawab untuk menyusun deskripsi varietas yang lengkap, jelas, dan dapat digunakan secara konsisten dalam sistem sertifikasi benih.

DAFTAR PUSTAKA

- Adiyoga, W. (2021). Seed Systems in the Four Shallot Producing Areas of Java: A Focus Group Discussion. *E3S Web of Conferences*, 232, 1003–1003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123201003>
- Ahmed, M., Qamar, M., Waqar, S., Naeem, A., Javaid, R. A., Tanveer, S. K., & Hussain, I. (2023). Estimation of genetic components, heterosis and combining ability of elite Pakistani wheat varieties for yield attributing traits and stripe rust response. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*, 27(6), 609–622. <https://doi.org/10.18699/vjgb-23-72>
- Ambrósio, M., Daher, R. F., Santos, R. M., Santana, J. G. S., Vidal, A. K. F., Nascimento, M. R., Leite, C. L., Souza, A. G. de, Freitas, R. S., Stida, W. F., Farias, J. E. C., Filho, B. F. de S., Melo, L. C., & Santos, P. R. dos. (2024). Multi-trait index: selection and recommendation of superior black bean genotypes as new improved varieties. *BMC Plant Biology*, 24(1).
- Ammarellou, A., & Mozaffarian, V. (2021). The first report of iron-rich population of adapted medicinal spinach (*Blitum virgatum* L.) compared with cultivated spinach (*Spinacia oleracea* L.). *Scientific Reports*, 11(1).
- Anand, A., Subramanian, M., & Kar, D. (2023). Breeding techniques to dispense higher genetic gains [Review of *Breeding techniques to dispense higher genetic gains*]. *Frontiers in Plant Science*, 13. Frontiers Media.
- Andriani, A., Wouters, D., Wolters, P. J., & Vleeshouwers, V. G. A. A. (2021). Quantifying the Contribution to Virulence of *Phytophthora infestans* Effectors in Potato. *Methods in Molecular Biology*, 303–313.
- Aslam, A., Farooq, F., Miquelajauregui, Y., Madariaga-Fregoso, A., Pallab, K., Sarma, N., Baruah, R., Borah, R. C., Borah, A., Sonowal, R., Kalita, P. K., Neog, P., Saikia, N., Gogoi, M., Bashir, Q.-U.-A., Raza, A., Rehim, H., Muhammad, A., Raza, S., ... Monirifar, H. (2022). Climate Change - Recent Observations [Working Title]. In *IntechOpen eBooks*.

IntechOpen.

<https://doi.org/10.5772/intechopen.100703>

- Azmi, C., Sembiring, A., & Kurniawan, H. (2024). Yield components and seed attribute of nine varieties of open-pollinated chili. *Jurnal Agro*, 11(1), 1–15.
- Basu, U., Ahmed, S. R., Bhat, B., Anwar, Z., Ali, A., Ijaz, A., Gulzar, A., Bibi, A., Tyagi, A., Nebapure, S. M., Goud, C. A., Ahanger, S. A., Ali, S., & Mushtaq, M. (2023). A CRISPR way for accelerating cereal crop improvement: Progress and challenges [Review of *A CRISPR way for accelerating cereal crop improvement: Progress and challenges*]. *Frontiers in Genetics*, 13. Frontiers Media.
- Bhat, A. R., Hegde, S., Kammar, S. S., Muthamma, M., Mudgal, G., H. P. B., Rajulu, C., & Mohan, T. C. (2024). Curating And Validating Universally Applicable Primers For Efficient ITS2-Based DNA Barcoding Across Plant Taxa. *International Journal of Health & Allied Sciences*, 13(1).
- Biermann, R. T., Bach, L. T., Kläring, H. -P., Baldermann, S., Börnke, F., & Schwarz, D. (2022). Discovering Tolerance—A Computational Approach to Assess Abiotic Stress Tolerance in Tomato Under Greenhouse Conditions. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6.
- Brand, T., Beltz, H., Ehsen, B., Adhikari, U., Daughtrey, M., Luster, D. G., Kong, P., & Hong, C. (2022). Multi-Year Field Plantings Evaluating Boxwood Cultivars for Susceptibility to the Blight Pathogens (*Calonectria* spp.) in Northern Germany. *Plant Disease*, 107(3), 713–719.
- Bunjkar, A., Walia, P., & Sandal, S. S. (2024). Unlocking Genetic Diversity and Germplasm Characterization with Molecular Markers: Strategies for Crop Improvement. *Journal of Advances in Biology & Biotechnology*, 27(6), 160–173.
- Çakmakçı, Ö., Şensoy, S., Alan, A. R., & Erdinç, Ç. (2021). Morphological Characterization of *A. vineale*. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi*, 31(4), 1001–1010. <https://doi.org/10.29133/yyutbd.1002453>
- Chauhan, J. S., SINGH, K. H., Choudhury, P., Singh, R. K., & Mishra, J. P. (2023). Growth, varietal development and cultivar

- diversity in seed production chain of cluster bean (*Cyamopsis tetragonoloba*) in India. *The Indian Journal of Agricultural Sciences*, 93(8). <https://doi.org/10.56093/ijas.v93i8.125470>
- Chawla, R., Poonia, A., Samantara, K., Mohapatra, S. R., Naik, S., Ashwath, M. N., Djalović, I., & Prasad, P. V. V. (2023). Green revolution to genome revolution: driving better resilient crops against environmental instability [Review of *Green revolution to genome revolution: driving better resilient crops against environmental instability*]. *Frontiers in Genetics*, 14. Frontiers Media. <https://doi.org/10.3389/fgene.2023.1204585>
- Civán, P., Rincent, R., Danguy-Des-Deserts, A., Elsen, J.-M., & Bouchet, S. (2021). Population Genomics Along With Quantitative Genetics Provides a More Efficient Valorization of Crop Plant Genetic Diversity in Breeding and Pre-breeding Programs. In *Population genomics* (pp. 225–288). Springer International Publishing.
- Corrales, C., & Astrin, J. J. (2022). Biodiversity Biobanking – a Handbook on Protocols and Practices. In *Pensoft Publishers eBooks*. Pensoft Publishers. <https://doi.org/10.3897/ab.e101876>
- Covarrubias-Pazaran, G., Martini, J. W. R., Quinn, M., & Atlin, G. N. (2021). Strengthening Public Breeding Pipelines by Emphasizing Quantitative Genetics Principles and Open Source Data Management. *Frontiers in Plant Science*, 12.
- Cudjoe, D. K., Virlet, N., Castle, M., Riche, A. B., Mhada, M., Waine, T., Mohareb, F., & Hawkesford, M. J. (2023). Field phenotyping for African crops: overview and perspectives [Review of *Field phenotyping for African crops: overview and perspectives*]. *Frontiers in Plant Science*, 14. Frontiers
- Dare, D., Wirnas, D., & Soepandi, D. (2024). Genetic variability and multi-trait selection of biomass and stalk juice for bioenergy in sorghum segregating populations. *Biodiversitas: Journal of Biological Diversity*, 25(11). 10.13057/biodiv/d251142

- Datta, A., Jaggi, S., Varghese, C., Varghese, E., Harun, M., & Bhowmik, A. (2021). Mating plans for breeding trials using generalized row-column designs. *The Indian Journal of Agricultural Sciences*, 91(10). <https://doi.org/10.56093/ijas.v91i10.117525>
- Dhillon, B. S., & Jat, S. L. (2024). Developing synthetics as a byproduct of hybrid maize breeding. *Indian Journal of Genetics and Plant Breeding (The)*, 84(3), 317–321. <https://doi.org/10.31742/isgpb.84.3.1>
- Escamilla, D. M., Li, D., Negus, K. L., Kappelmann, K. L., Kusmec, A., Vanous, A., Schnable, P. S., Li, X., & Yu, J. (2025). Genomic selection: Essence, applications, and prospects. *The Plant Genome*, 18(2). <https://doi.org/10.1002/tpg2.70053>
- Essa, B. A., & Alwan, O. K. (2024). Impact evaluation combining ability of tomato hybrids and lines for production and fruit quality traits. *Agronomía Mesoamericana*, 57558–57558. <https://doi.org/10.15517/am.2024.57558>
- Fang, X., Sun, Y., Li, J., Li, M., & Zhang, C. (2023). Male sterility and hybrid breeding in soybean. *Molecular Breeding*, 43(6). <https://doi.org/10.1007/s11032-023-01390-4>
- Fritsche-Neto, R., Ali, J., Asis, E. J. D., Allahgholipour, M., & Labroo, M. R. (2023). Improving hybrid rice breeding programs via stochastic simulations: number of parents, number of hybrids, tester update, and genomic prediction of hybrid performance. *Theoretical and Applied Genetics*, 137(1). <https://doi.org/10.1007/s00122-023-04508-6>
- Gascuel, Q., Diretto, G., Monforte, A. J., Fortes, A. M., & Granell, A. (2017). Use of Natural Diversity and Biotechnology to Increase the Quality and Nutritional Content of Tomato and Grape [Review of *Use of Natural Diversity and Biotechnology to Increase the Quality and Nutritional Content of Tomato and Grape*]. *Frontiers in Plant Science*, 8. Frontiers Media.
- Ghifari, S. U. A., Supriyanta, S., Kristamtini, K., Basunanda, P., Alam, T., Widyawan, M. H., & Taryono, T. (2021). Evaluasi Galur Harapan Padi Hitam (*Oryza sativa* L.) Berdaya Hasil

- Tinggi dan Berumur Genjah. *Magazine Mitra Investor (Edisi Elektronik)*, 10(2), 94–94. <https://doi.org/10.22146/veg.45011>
- Hay, F. R., & Naidoo, S. (2021). New technologies to improve the ex situ conservation of plant genetic resources. In *Plant Genetic Resources* (pp. 185–216). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.4324/9781003180623-10>
- Hosseini, S. M. S., Shiri, M., Mostafavi, K., Mohammadi, A., & Miri, S. M. (2025). Genetic analysis and association detection of agronomic traits in maize genotypes. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-84471-4>
- Ibrahim, E., Ladja, F. T., & Widiarta, I. N. (2022). ADVANCE YIELD TRIAL OF 10 RESISTANT RICE LINES TUNGRO DISEASE AT TUNGRO DISEASE RESEARCH STATION LANRANG SIDRAP. *Agric*, 34(1), 69–78. <https://doi.org/10.24246/agric.2022.v34.i1.p69-78>
- Ishtiaq, M., Mazhar, M., Maqbool, M., Ajaib, M., Hussain, T., & Waqas, M. (2023). Mutation Breeding of Vegetatively Propagated Crops. In *Apple Academic Press eBooks* (pp. 123–150). <https://doi.org/10.1201/9781003305064-6>
- Islam, S., Li, J., Rahman, Md. A., Xie, F., Song, B., & Nie, B. (2024). Resistance to biotic and abiotic stress in potato: the origin of the genes and corresponding molecular markers. *Phytopathology Research*, 6(1). <https://doi.org/10.1186/s42483-023-00222-9>
- Karakaş, İ. (2024). Molecular Marker Techniques and Genotypic Characterization Approaches in Plant Breeding. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 12(8), 1487–1498. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v12i8.1487-1498.6806>
- Kumar, S., Sripathy, K. V., Bhaskar, K. U., & Vinesh, B. (2023). Principles of Quality Seed Production. In *Seed Science and Technology* (pp. 109–131). International Seed Testing Association. https://doi.org/10.1007/978-981-19-5888-5_6
- Laidig, F., Feike, T., Hadasch, S., Rentel, D., Klocke, B., Miedaner, T., & Piepho, H. (2021). Breeding progress of disease

- resistance and impact of disease severity under natural infections in winter wheat variety trials. *Theoretical and Applied Genetics*, 134(5), 1281–1302. <https://doi.org/10.1007/s00122-020-03728-4>
- Leonelli, S. (2022). Process-Sensitive Naming: Trait Descriptors and the Shifting Semantics of Plant (Data) Science. *Philosophy Theory and Practice in Biology*, 14. <https://doi.org/10.3998/ptpbio.3364>
- Mahajan, V., DC, M., Gupta, A., Benke, A., & Singh, M. (2021). Onion (*Allium cepa* L.): Breeding for quality traits and export. *Vegetable Science*, 48(2), 123–135. <https://doi.org/10.61180/vegsci.2021.v48.i2.01>
- Malik, A. S., Sharma, N. K., Chandra, A. K., Kumar, P., Tyagi, S., Raghunandan, K., Murukan, N., Mallick, N., Jha, S. K., & Vinod, V. (2024). Conversion of superior bread wheat genotype HD3209 carrying Lr19/Sr25 into CMS line for development of rust-resistant wheat hybrids. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-65109-x>
- Maulana, F., Perumal, R., Serba, D. D., & Tesso, T. (2023). Genomic prediction of hybrid performance in grain sorghum (*Sorghum bicolor* L.). *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1139896>
- Maxted, N., & Vincent, H. (2021). Review of congruence between global crop wild relative hotspots and centres of crop origin/diversity. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 68(4), 1283–1297. <https://doi.org/10.1007/s10722-021-01114-7>
- Meena, V. K., Shekhawat, H. V. S., Chand, S., Choudhary, K., Sharma, J. K., & Lekha, L. (2023). Advances in Molecular Marker Technology and their Significance in Plant Improvement Strategies. In *IntechOpen eBooks*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1002773>
- Ngendo, M., Kinyua, M., Chebet, L., Mutiga, S., Ndung'u, J. M., Nyongesa, O., Njau, S., Panchbhai, A., Musila, R., & Murori, R. (2022). The importance of market signals in crop

- varietal development: lessons from Komboka rice variety. *CABI Agriculture and Bioscience*, 3(1).
<https://doi.org/10.1186/s43170-022-00122-6>
- Nuraini, N., Wahyuni, T. H., & Muzammil, M. (2022). Karakterisasi Beberapa Aksesori Tanaman Nanas Lokal dalam Upaya Pelestarian Sumber Daya Genetik di Bangka Belitung. *Proceedings Series on Physical & Formal Sciences*, 4, 128–136. <https://doi.org/10.30595/pspfs.v4i.493>
- Nwachukwu, I., Ndukwe, O. k, & Ekaiko, Marshall. U. (2016). Germplasm Preservation And Propagation; The Foundation Of Agricultural Development –A Review. *IOSR Journal of Pharmacy and Biological Sciences*, 11(4), 70–73. <https://doi.org/10.9790/3008-1104017073>
- Polukhin, A. A., Sidorenko, V. S., & Panarina, V. I. (2023). MODERN BREEDING AND SEED PRODUCTION IN THE PUBLIC SECTOR OF THE ECONOMY. *Экономика Сельского Хозяйства России*, 8, 64–69. <https://doi.org/10.32651/238-64>
- Rahimi, M., & Debnath, S. (2023). Estimating optimum and base selection indices in plant and animal breeding programs by development new and simple SAS and R codes. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46368-6>
- Ranjith, P., & Rao, M. S. (2021). Breeding for Drought Resistance. In *IntechOpen eBooks*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.97276>
- Rosra, D. (2023). The Registration Process of Industrial Property Rights. *KnE Social Sciences*. <https://doi.org/10.18502/kss.v8i13.13751>
- Saad, N. S. M., Severn-Ellis, A. A., Pradhan, A., Edwards, D., & Batley, J. (2021). Genomics Armed With Diversity Leads the Way in Brassica Improvement in a Changing Global Environment [Review of *Genomics Armed With Diversity Leads the Way in Brassica Improvement in a Changing Global Environment*]. *Frontiers in Genetics*, 12. Frontiers Media. <https://doi.org/10.3389/fgene.2021.600789>

- Sakr, N. (2022). In vitro Methodology to Assess Quantitative Resistance in Plant-fungus Pathosystems. *The Open Agriculture Journal*, 17(1). <https://doi.org/10.2174/18743315-v16-e221020-2022-ht14-3623-4>
- Setiani, C., Sahara, D., Prasetyo, T. B., & Wulanjari, M. E. (2023). Farmers' Behavior Towards the Use of Certified Rice Seeds in Rainfed Fields. *E3S Web of Conferences*, 444, 2011–2011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202344402011>
- Silva, E. J. de S., Calazans, C. C., Nunes, V. V., & Silva-Mann, R. (2021). Estimative of royalties: appropriation of gains provided by innovations associated with plant breeding. *Research Society and Development*, 10(13). <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i13.21497>
- Singh, K. H., Chauhan, J. S., Choudhury, P., & Thakur, A. K. (2022). Recent trends in crop breeding, the varietal induction in seed chain and its impact on food grain production in India. *Indian Journal of Genetics and Plant Breeding (The)*, 82(3), 259–279. <https://doi.org/10.31742/isgpb.82.3.1>
- Sitairesmi, T., Dewi, K., Rumanti, I. A., Herlinda, S., & Nugraha, Y. (2021). Response of Indonesian rice varieties to iron toxicity under field and green house condition. *E3S Web of Conferences*, 306, 1012–1012. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202130601012>
- Vieira, P. M. H., Báez, O. E. O., Almeida, B. K. da S., Mendes, M. H. S., & Souza, J. C. de. (2021). Number of progenies and repetitions for reciprocal full-sib recurrent selection programs in maize. *Ciência e Agrotecnologia*, 45. <https://doi.org/10.1590/1413-7054202145030420>
- Vu, T. V., Das, S., Hensel, G., & Kim, J. (2022). Genome editing and beyond: what does it mean for the future of plant breeding? [Review of *Genome editing and beyond: what does it mean for the future of plant breeding?*]. *Planta*, 255(6). Springer Science+Business Media. <https://doi.org/10.1007/s00425-022-03906-2>
- Weise, S., Hoekstra, R., Kutschan, K. J., Oppermann, M., Treuren, R. van, & Lohwasser, U. (2023). Analysis of gaps in rapeseed

- (*Brassica napus* L.) collections in European genebanks. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1244467>
- Yaman, M., Sun, M., Sümbül, A., Demirel, F., Tunç, Y., Khadivi, A., & Yılmaz, K. U. (2024). Multivariate analysis of morphological variation, biochemical content, antioxidant activity, and molecular characteristics of autochthonous *Berberis crataegina* DC. genotypes in Central Türkiye. *BMC Plant Biology*, 24(1). <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05873-0>
- Yang, C. J., Russell, J., Ramsay, L., Thomas, W., Powell, W., & Mackay, I. (2021). Overcoming barriers to the registration of new plant varieties under the DUS system. *Communications Biology*, 4(1). <https://doi.org/10.1038/s42003-021-01840-9>
- Yu, H., Yang, Q., Fu, F., & Li, W. (2022). Three strategies of transgenic manipulation for crop improvement [Review of *Three strategies of transgenic manipulation for crop improvement*]. *Frontiers in Plant Science*, 13. Frontiers Media. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.948518>
- Yustiningsih, M., Dinarti, D., Purwoko, B. S., Suwarno, W. B., Dare, D., & Sutapa, I. D. (2026). Drought-Tolerant selection model to identify prospective maize genotypes and support sustainable agroecological practices in the semiarid regions of East Nusa Tenggara, Indonesia. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 100730. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2026.100730>
- Zerehgar, K., Pourdad, S. S., Aziznezhad, R., & Etminan, A. (2023). Application of multivariate analysis for assessment of stability in winter safflower (*Carthamus tinctorius* L.) genotypes under rainfed conditions. *Indian Journal of Genetics and Plant Breeding (The)*, 83(2), 235–242. <https://doi.org/10.31742/isgpb.83.2.9>
- Zheng, X., Peng, Y., Qiao, J., Henry, R. J., & Qian, Q. (2024). Wild rice: unlocking the future of rice breeding. *Plant Biotechnology Journal*, 22(11), 3218–3226. <https://doi.org/10.1111/pbi.14443>

BAB 3

KERAGAMAN GENETIK DALAM PENGEMBANGAN VARIETAS UNGGUL

3.1 Pengertian dan Sumber Keragaman Genetik

Keragaman genetik (*genetic diversity*) merupakan variasi sifat antar individu dalam suatu spesies yang muncul akibat perbedaan susunan genetik. Variasi ini menjadi dasar utama dalam proses seleksi pada pemuliaan tanaman karena menentukan keberhasilan dalam memperoleh sifat unggul yang diinginkan (Allard, 1999; Falconer & Mackay, 1996).

Keragaman genetik merupakan variasi susunan gen atau alel dalam suatu populasi yang menyebabkan perbedaan karakter antarindividu, baik secara morfologi, fisiologi, maupun molekuler. Variasi genetik ini mencakup perbedaan pada tingkat DNA, gen, hingga ekspresi fenotip yang dapat diamati. Keragaman genetik pada tingkat DNA mencerminkan perbedaan informasi genetik, yaitu perbedaan basa-basa nukleotida antarindividu dalam suatu populasi. Variasi ini dapat terjadi pada gen penyandi maupun non-penyandi yang ditunjukkan melalui polimorfisme sekuens nukleotida. Dengan kata lain, tidak ada dua individu (dalam satu spesies) yang benar-benar identik secara genetik, kecuali klon.

Variasi genetik dapat berasal dari:

1. Variasi alamiah (*natural variation*) adalah perbedaan sifat yang sudah ada di alam dan biasanya ditemukan pada varietas lokal, kerabat liar, dan populasi alami.
2. Variasi buatan (*induced variation*) adalah variasi yang dibuat atau dipicu oleh manusia melalui teknik tertentu.

Sumber keragaman genetik dapat juga muncul dari beberapa mekanisme biologis, seperti: 1) Mutasi atau perubahan DNA, 2) Rekombinasi genetik pada saat meiosis, 3) Aliran gen (*gene flow*) yaitu perpindahan gen antarpopulasi, 4) Hibridisasi atau persilangan,

5) Poliploidi (penggandaan kromosom), dan 6) Pemanfaatan plasma nutfah (*germ plasm*). Proses-proses ini menghasilkan variasi yang menjadi bahan dasar evolusi dan pemuliaan (Hartl & Clark, 2007; Allard, 1999; Acquaah, 2012).

Mutasi (*mutation*) adalah perubahan permanen pada urutan DNA yang dapat terjadi secara spontan atau akibat faktor mutagen (radiasi, bahan kimia, atau kesalahan replikasi DNA). Mutasi dapat terjadi pada tingkat gen atau kromosom, bersifat acak (*random*), dan dapat diwariskan jika terjadi pada sel reproduksi. Adanya mutasi dapat menyebabkan munculnya alel baru dalam populasi, yang bisa menguntungkan, merugikan, atau netral. Mutasi adalah sumber utama variasi genetik baru yang belum ada sebelumnya.

Rekombinasi genetik terjadi saat meiosis, yaitu pada proses pembentukan gamet. Rekombinasi terjadi karena adanya peristiwa *crossing-over* (pertukaran segmen kromosom homolog) dan *independent assortment* (pemisahan kromosom secara acak). Peristiwa ini akan menghasilkan kombinasi gen baru yang dapat meningkatkan variasi tanpa mengubah jumlah gen.

Aliran gen (*gene flow*) adalah perpindahan alel antarpopulasi melalui migrasi individu, penyerbukan silang (*pollen flow*), dan penyebaran biji atau gamet. Peristiwa ini dapat menambah variasi genetik dalam suatu populasi, mengurangi perbedaan genetik antarpopulasi, dan juga dapat memperkenalkan alel baru dari populasi lain. Dalam tanaman, peristiwa ini sering terjadi melalui penyerbukan silang alami atau introduksi varietas baru (Futuyma, 2013).

Hibridisasi (persilangan) adalah perkawinan antara dua individu atau populasi yang berbeda genetik, baik dalam satu spesies (intraspesifik) maupun antarspesies (interspesifik) yang masih berkerabat. Hibridisasi dapat menggabungkan sifat unggul dari dua tetua, menghasilkan heterosis (*hybrid vigor*), dan meningkatkan variasi genetik secara cepat.

Poliploidi (penggandaan kromosom) yaitu kondisi jumlah kromosom yang digandakan menjadi lebih dari dua set (misalnya triploid, tetraploid). Tujuannya adalah untuk meningkatkan ukuran organ tanaman (buah, daun), meningkatkan vigor (kekuatan

pertumbuhan), dan menghasilkan tanaman steril (misalnya semangka tanpa biji). Contoh semangka tanpa biji (triploid).

Variasi genetik juga dapat diperoleh dengan memanfaatkan plasma nutfah yang sudah ada. Metode ini termasuk strategi pembentukan variasi melalui pengumpulan variasi genetik yang sudah ada. Plasma nutfah menjadi bahan baku utama dalam pemuliaan karena mengandung keragaman alel (gen) yang dapat dimanfaatkan. Plasma nutfah adalah kumpulan sumber daya genetik yang mencakup seluruh bahan hidup yang membawa informasi genetik suatu spesies, dapat berupa varietas lokal (*landrace*), kerabat liar, galur hasil pemuliaan tanaman, atau koleksi bank gen.

1. Varietas lokal (*landrace*) adalah populasi tanaman yang telah beradaptasi lama pada lingkungan tertentu dan biasanya dikelola oleh petani secara tradisional. Ciri utamanya adalah keragaman genetik tinggi, tahan terhadap stres lokal (kekeringan, penyakit, tanah miskin hara), dan produktivitas biasanya lebih rendah dibanding varietas unggul modern. Varietas lokal biasanya digunakan sebagai sumber gen ketahanan atau adaptasi spesifik.
2. Kerabat liar (*wild relatives*) adalah spesies yang masih berkerabat dengan tanaman budidaya tetapi belum didomestikasi. Kerabat liar memiliki gen ketahanan ekstrem (hama, penyakit, cekaman abiotik) dan variasi genetik sangat luas. Kelemahan dari spesies kerabat liar adalah kadang masih membawa sifat yang tidak diinginkan (*linkage drag*), sehingga perlu teknik persilangan khusus (misalnya *introgression*) untuk mendapatkan sifat yang diinginkan.
3. Galur hasil pemuliaan tanaman (*breeding lines*) adalah populasi atau individu tanaman yang telah melalui proses seleksi dan memiliki sifat tertentu yang diinginkan, tetapi belum dilepas secara resmi sebagai varietas. Ciri-ciri galur hasil pemuliaan adalah: 1) Relatif seragam (*uniform*), dimana tanaman dalam satu galur memiliki penampilan yang mirip, 2) Mulai stabil secara genetik, yaitu sifatnya tidak banyak berubah antar generasi, 3) Memiliki sifat unggul spesifik, seperti hasil tinggi, tahan penyakit, dan umur genjah, dan 4)

Masih dalam tahap uji, sehingga belum tentu lebih baik dari varietas yang sudah ada.

4. Koleksi bank gen (Gen Bank) adalah kumpulan plasma nutfah (bahan genetik tanaman) yang disimpan secara terorganisir pada bank gen untuk tujuan konservasi (pelestarian), penelitian, pemuliaan tanaman di masa depan, dan lain-lain. Bank gen adalah lembaga yang menyimpan plasma nutfah dalam bentuk benih, kultur jaringan, dan DNA. Contoh lembaga seperti *International Rice Research Institute* (IRRI) dan jaringan *Consultative Group on International Agricultural Research* memiliki koleksi ratusan ribu aksesori tanaman dari seluruh dunia.

Keragaman genetik yang tinggi menunjukkan adanya perbedaan genetik yang luas antarindividu, sehingga peluang untuk memperoleh genotipe unggul melalui seleksi menjadi lebih besar. Pernyataan ini sejalan dengan Deviona *et al.* (2024) yang menyatakan bahwa karakter dengan keragaman genetik yang luas memiliki peluang lebih besar untuk diseleksi dan dikembangkan menjadi varietas unggul. Sebaliknya, keragaman genetik yang rendah dapat membatasi keberhasilan seleksi karena variasi sifat yang tersedia relatif sempit (Hartl & Clark, 2007).

3.2 Pentingnya Keragaman Genetik

Dalam konteks pertanian modern, keragaman genetik berperan strategis untuk meningkatkan produktivitas dan ketahanan tanaman. Keragaman genetik merupakan komponen penting dalam mendukung ketahanan pangan global karena menyediakan sumber variasi genetik yang diperlukan untuk adaptasi tanaman terhadap berbagai tekanan lingkungan. Lingkungan selalu berubah, baik secara alami maupun akibat perubahan iklim. Keragaman genetik memungkinkan adanya individu dalam populasi yang memiliki: 1) Toleransi terhadap kekeringan (efisiensi penggunaan air lebih baik), 2) Kemampuan bertahan di tanah salin (mengatur keseimbangan ion), dan 3) Ketahanan terhadap suhu ekstrem (adaptasi fisiologis). Individu dengan gen adaptif ini akan lebih mampu bertahan dan berkembang, sehingga populasi tidak

mudah punah ketika kondisi lingkungan berubah. Variasi genetik memungkinkan tanaman memiliki kemampuan untuk bertahan terhadap perubahan iklim, serta meningkatkan toleransi terhadap stres biotik seperti hama dan penyakit (Food and Agriculture Organization, 2010; Hajjar & Hodgkin, 2007). Tanaman dengan latar belakang genetik yang beragam cenderung memiliki kemampuan adaptasi yang lebih baik terhadap kondisi lingkungan yang berubah. Deviona *et al.* (2024) melaporkan bahwa karakter tanaman kedelai yang memiliki keragaman genetik luas dan heritabilitas tinggi memberikan respons seleksi yang lebih efektif dibandingkan dengan karakter yang memiliki keragaman sempit. Hal ini menunjukkan bahwa keberadaan variasi genetik yang cukup merupakan prasyarat penting dalam meningkatkan efisiensi pemuliaan.

Selain itu, keragaman genetik juga berperan dalam pembentukan varietas unggul melalui proses rekombinasi genetik. Widyapangesthi *et al.* (2022) menyatakan bahwa induksi mutasi dapat meningkatkan variasi genetik pada tanaman mentimun, sehingga memperluas peluang untuk memperoleh sifat unggul baru. Proses ini menjadi salah satu pendekatan penting dalam menciptakan varietas yang memiliki keunggulan spesifik, seperti ketahanan terhadap kekeringan atau produktivitas tinggi.

Keragaman genetik menyediakan variasi alel yang mengendalikan sifat-sifat penting tanaman. Dalam populasi yang beragam, terdapat individu yang membawa gen unggul seperti ketahanan terhadap serangan hama, kemampuan menghasilkan biomassa lebih tinggi, serta kualitas hasil (rasa, ukuran, kandungan gizi).

Patogen seperti virus, bakteri, dan jamur terus berevolusi. Keragaman genetik membuat tanaman memiliki berbagai mekanisme pertahanan, seperti: 1) Gen ketahanan (R genes) yang mengenali patogen tertentu, 2) Produksi senyawa antibakteri atau antijamur alami, dan 3) Mekanisme pertahanan struktural (dinding sel lebih kuat). Jika suatu penyakit menyerang, tidak semua individu akan rentan. Sebagian tanaman yang memiliki gen tahan akan tetap hidup dan mempertahankan populasi.

Pada tanaman terdapat gen-gen tertentu yang mengatur efisiensi fotosintesis, pertumbuhan vegetatif, dan distribusi hasil

asimilat. Individu dengan kombinasi gen optimal akan menghasilkan biomassa lebih tinggi.

Sifat kualitas hasil (rasa, ukuran, kandungan gizi) dikendalikan oleh banyak gen (*polygenic traits*), seperti kandungan gula (rasa), ukuran buah/biji, dan kandungan protein atau vitamin. Variasi genetik memungkinkan munculnya individu dengan kualitas hasil lebih baik. Dalam pemuliaan tanaman, individu-individu dengan sifat unggul ini dapat dipilih sebagai tetua untuk menghasilkan varietas baru yang lebih baik. Tanpa keragaman genetik, proses seleksi menjadi terbatas karena semua individu memiliki sifat yang relatif seragam.

Keragaman genetik juga berkaitan erat dengan stabilitas produksi tanaman. Wati *et al.* (2021) menemukan bahwa jagung lokal dengan tingkat keragaman genetik tinggi menunjukkan ketahanan yang lebih baik terhadap serangan hama pada kondisi lingkungan yang kurang optimal. Hal ini menunjukkan bahwa keragaman genetik tidak hanya penting untuk meningkatkan hasil, tetapi juga untuk menjaga konsistensi produksi dalam jangka panjang.

Pemanfaatan keragaman genetik saat ini semakin didukung oleh perkembangan teknologi molekuler. Arisanti *et al.* (2024) menjelaskan bahwa penggunaan penanda molekuler seperti SSR dan RAPD memungkinkan identifikasi keragaman genetik secara lebih akurat pada tingkat DNA. Teknologi ini membantu pemulia dalam memilih induk yang tepat dan mempercepat proses seleksi. Dengan demikian, integrasi antara keragaman genetik dan teknologi modern menjadi kunci dalam pengembangan varietas unggul yang efisien dan berkelanjutan.

Adanya penurunan keragaman genetik atau erosi genetik menjadi tantangan serius dalam pertanian modern. Masluki dan Mutmainnah (2024) menunjukkan bahwa rendahnya variasi genetik pada beberapa komoditas dapat mengurangi kemampuan adaptasi tanaman terhadap perubahan lingkungan. Oleh karena itu, konservasi plasma nutfah menjadi langkah penting untuk menjaga keberlanjutan sumber daya genetik.

Dengan demikian, keragaman genetik memiliki peran yang sangat penting dalam pengembangan varietas unggul. Keragaman ini

tidak hanya menjadi dasar dalam proses seleksi dan perakitan varietas baru, tetapi juga berkontribusi terhadap peningkatan produktivitas, ketahanan tanaman, serta stabilitas sistem pertanian secara keseluruhan. Keragaman genetik tanaman menjadi bahan baku utama dalam pengembangan varietas unggul, karena tanpa variasi gen pemulia tanaman akan kesulitan menghasilkan tanaman dengan sifat-sifat yang lebih baik. Dengan kata lain, keragaman genetik adalah kunci untuk menciptakan varietas tanaman yang unggul, tahan, dan adaptif.

3.3 Pengembangan Varietas Unggul dan Kaitannya dengan Keragaman Genetik

Keragaman genetik merupakan dasar utama dalam kegiatan pemuliaan tanaman untuk pengembangan varietas unggul, karena menyediakan variasi gen yang menjadi bahan seleksi untuk menghasilkan individu unggul. Dalam suatu populasi tanaman, terdapat perbedaan genetik yang menyebabkan variasi fenotipe seperti hasil panen, kualitas produk, ketahanan terhadap hama dan penyakit, serta toleransi terhadap cekaman lingkungan. Tanpa adanya keragaman genetik, proses pemuliaan tidak dapat dilakukan secara efektif karena tidak tersedia variasi sifat yang dapat diperbaiki atau ditingkatkan (Allard, 1999; Acquaaah, 2012).

Varietas unggul adalah tanaman yang memiliki sifat lebih baik dibandingkan dengan varietas sebelumnya. Ciri-ciri varietas unggul adalah: 1) Produktivitas tinggi, 2) Tahan hama dan penyakit, 3) Umur panen lebih pendek, 4) Kualitas hasil baik, dan 5) Adaptif terhadap lingkungan.

Dalam pemuliaan tanaman, pengembangan varietas unggul dilakukan melalui serangkaian proses seleksi dan persilangan untuk memperoleh kombinasi sifat yang diinginkan. Tujuan seleksi adalah: 1) Memperoleh tanaman dengan sifat unggul (hasil tinggi, tahan hama, dll.), 2) Menghilangkan tanaman dengan sifat tidak diinginkan, 3) Meningkatkan frekuensi gen penyusun sifat unggul, dan 4) Mempercepat pembentukan varietas unggul. Pemulia akan memilih genotipe dengan performa terbaik dari populasi yang beragam, yang dapat menghasilkan peningkatan sifat secara bertahap (*genetic gain*). Individu-individu terpilih dengan karakter unggul kemudian

digunakan sebagai tetua dalam program persilangan guna menghasilkan rekombinasi genetik baru yang lebih superior. Keberhasilan proses ini sangat bergantung pada ketersediaan keragaman genetik dalam populasi awal, karena tanpa variasi genetik yang memadai, efektivitas seleksi menjadi terbatas (Fu, 2015; Salgotra & Chauhan, 2023; Wolter *et al.*, 2019). Seleksi hanya akan efektif apabila terdapat variasi genetik yang cukup luas dalam populasi. Semakin besar keragaman genetik, semakin tinggi peluang untuk menemukan kombinasi sifat yang diinginkan. Sebaliknya, jika keragaman genetik rendah, maka peluang perbaikan sifat juga menjadi terbatas. Tanpa keragaman tidak ada variasi dan tidak ada seleksi, sehingga tidak akan ada pengembangan varietas baru.

Selain seleksi, pemuliaan tanaman juga memanfaatkan hibridisasi untuk menggabungkan sifat unggul dari dua atau lebih individu yang berbeda. Misalnya, satu tetua memiliki ketahanan terhadap kekeringan, sedangkan tetua lainnya memiliki hasil tinggi. Melalui persilangan, dapat diperoleh keturunan yang menggabungkan kedua sifat unggul tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa keragaman genetik memungkinkan terciptanya kombinasi sifat yang lebih baik dibandingkan dengan individu asalnya. Hibridisasi sangat bergantung pada keberadaan keragaman genetik, karena tanpa perbedaan genetik antartetua, tidak akan ada kombinasi sifat baru yang terbentuk. Proses ini juga dapat menghasilkan fenomena heterosis (*hybrid vigor*), yaitu keturunan yang memiliki performa lebih baik dibandingkan kedua tetuanya.

Penelitian menunjukkan bahwa melalui pemuliaan varietas unggul padi, produktivitas dapat mencapai lebih dari 8 ton per hektar, yang berarti seleksi genetik dan pemilihan galur dapat menambah jumlah hasil panen secara signifikan (Waluyo *et al.*, 2022). Selain itu, pemilihan bahan pemuliaan yang tepat juga meningkatkan stabilitas hasil tanaman di berbagai kondisi lingkungan (Bari *et al.*, 1997). Penelitian pada padi juga menunjukkan bahwa pembentukan karakter ketahanan dapat dieksplorasi melalui strategi pemilihan gen dan interaksi mikroba yang mendukung respons tanaman terhadap patogen (Isnaeni *et al.*, 2022), dan studi pada kedelai memperlihatkan variasi ketahanan

terhadap infeksi virus yang bisa dipakai dalam program pemuliaan (Barmawi *et al.*, 2009).

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa keragaman genetik merupakan fondasi utama dalam pengembangan varietas unggul. Semakin tinggi keragaman genetik suatu populasi, semakin besar peluang untuk memperoleh kombinasi sifat unggul melalui seleksi dan persilangan, sehingga dihasilkan varietas yang produktif, berkualitas, dan adaptif terhadap lingkungan. Hasil akhir dari pemanfaatan keragaman genetik dalam pemuliaan tanaman adalah terbentuknya varietas unggul. Varietas unggul merupakan tanaman hasil seleksi dan persilangan yang memiliki kelebihan seperti produktivitas tinggi, kualitas hasil baik, serta ketahanan terhadap cekaman biotik dan abiotik. Varietas unggul ini berperan penting dalam meningkatkan produksi pangan dan menjaga stabilitas hasil pertanian. Dengan demikian, keragaman genetik secara tidak langsung berkontribusi terhadap ketahanan pangan global karena menyediakan bahan dasar untuk pengembangan varietas yang adaptif dan produktif.

3.4 Keragaman Genetik Berkaitan dengan Pertanian Berkelanjutan

Keragaman genetik berperan langsung dalam tiga pilar pertanian berkelanjutan, yaitu ekonomi, lingkungan, dan sosial.

1. Pilar ekonomi berkaitan erat dengan produktivitas dan stabilitas pendapatan. Keragaman genetik memungkinkan petani dan pemulia memilih varietas yang sesuai dengan kondisi spesifik, mengurangi risiko gagal panen, serta meningkatkan hasil dan kualitas.
2. Pilar lingkungan berkaitan erat dengan ketahanan ekosistem dan pengurangan input kimia. Keragaman genetik berperan besar dalam menjaga keseimbangan ekosistem pertanian karena dapat: 1) Mengurangi ketergantungan terhadap bahan kimia melalui pemanfaatan varietas tahan penyakit, sehingga mengurangi penggunaan fungisida/insektisida, serta mengurangi pencemaran tanah dan air, 2) Meningkatkan ketahanan terhadap perubahan iklim, karena adanya variasi genetik merupakan suatu peluang untuk menemukan gen

tahan kekeringan, banjir, dan suhu ekstrem, 3) Mencegah kerentanan sistem (*genetic uniformity risk*), karena jika semua tanaman seragam maka adanya satu penyakit yang menyerang bisa menghancurkan seluruh tanaman dalam satu lahan.

3. Pilar sosial berkaitan erat dengan ketahanan pangan dan pelestarian budaya, karena keragaman genetik juga berdampak langsung pada masyarakat. Dengan beragamnya varietas, dapat mengurangi ketergantungan pada satu jenis tanaman dan memberikan lebih banyak pilihan pangan untuk mencukupi ketahanan pangan masyarakat. Pelestarian budaya berkaitan dengan pelestarian varietas lokal (*landrace*) berdasarkan kearifan lokal atau tradisi masyarakat, sehingga mereka dapat menjaga identitas lokalnya. Petani kecil dapat memanfaatkan varietas lokal tanpa bergantung pada benih komersial.

Dalam konteks pertanian berkelanjutan, keragaman genetik berperan dalam mengurangi ketergantungan terhadap bahan kimia, meningkatkan ketahanan terhadap perubahan iklim, serta menjaga stabilitas produksi dan kelestarian sumber daya genetik. Keragaman genetik bukan hanya penting untuk menghasilkan varietas unggul, tetapi juga menjadi kunci dalam menciptakan sistem pertanian yang berkelanjutan. Dengan memanfaatkan variasi genetik, petani dan peneliti dapat mengembangkan tanaman yang lebih produktif, tahan terhadap perubahan lingkungan, serta mengurangi dampak negatif terhadap ekosistem.

DAFTAR PUSTAKA

- Allard, R.W. 1999. *Principles of Plant Breeding* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Acquaah, G. 2012. *Principles of Plant Genetics and Breeding* (2nd ed.). Wiley-Blackwell.
- Arisanti, T.N., Sobir, S., & Ritonga, A.W. 2024. *Keragaman Genetik Stroberi (*Fragaria* × *ananassa* Duch) Berdasarkan Marka Morfologi dan Molekuler*. Jurnal AGRO, 11(1): 118–132.
- Bari, A., Sjamsudin, E., & Sudiarto, S. 1997. *Pemilihan Bahan Pemuliaan Padi untuk Pembentukan Varietas Unggul Diskriminatif Tumpangsari: Padi + Jagung + Ubikayu di Lahan Kering II. Stabilitas Relatif Hasil Gabah*. Buletin Agronomi, 25(3): 1-6.
- Barmawi, M., Utomo, S.D., Mat Akin, H., & Ramli, S. 2009. *Uji Ketahanan terhadap Cowpea Mild Mottle Virus pada Sembilan Belas Populasi F1 Tanaman Kedelai (*Glycine max* [L.] Merrill) Hasil Persilangan Diallel*. Jurnal Agrotropika, 14(2). <https://doi.org/10.23960/ja.v14i2.4237>.
- Deviona, D., Roslim, D.I., Zul, D., Suhartina, S., & Syafitri, A.R. 2024. *Keragaman Genetik dan Heritabilitas Berbagai Karakter Tanaman Kedelai (*Glycine max* (L.) Merrill)*. Agrosains: Jurnal Penelitian Agronomi, 26(1): 38–42.
- Falconer, D.S., & Mackay, T.F.C. 1996. *Introduction to Quantitative Genetics* (4th ed.). Essex: Longman.
- Food and Agriculture Organization. 2010. *The Second Report on the State of the World's Plant Genetic Resources for Food and Agriculture*. Rome: FAO.
- Fu, Y.B. 2015. Understanding Crop Genetic Diversity Under Modern Plant Breeding. *Theoretical and Applied Genetics*, 128: 2131–2142.
- Futuyma, D.J. 2013. *Evolution* (3rd ed.). Sunderland, MA: Sinauer Associates, Inc. (an Imprint of Oxford University Press). ISBN 978-1-60535-115-5.
- Hajjar, R., & Hodgkin, T. 2007. *The Use of Wild Relatives in Crop Improvement: A Survey of Developments Over the Last 20 Years*.

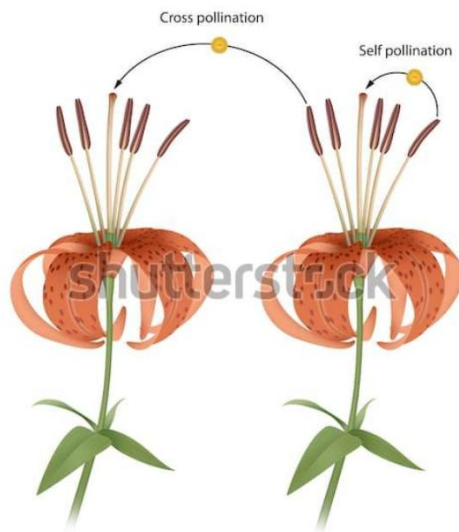
- Crop Science, 47(S3): S-3-S-13. <https://doi.org/10.2135/cropsci2007.10.0519>.
- Hartl, D.L., & Clark, A.G. 2007. *Principles of Population Genetics* (4th ed.). New York: Oxford University Press.
- Isnaeni, F.C., Mugiastuti, E., Leana, N.W.A., Oktaviani, E., & Purwanto, P. 2022. *Induction of Rice Resistance to Sheath Blight Pathogen (*Rhizoctonia solani*) Using Halotolerant Diazotroph Bacteria*. Jurnal AGRO, 9(1): 12–25.
- Masluki, M., & Mutmainnah, M. (2024). *Keragaman Genetik, Morfologi dan Produksi Tanaman Sagu Dataran Tinggi Latimojong Kabupaten Luwu*. AGROSAINSTEK: Jurnal Ilmu dan Teknologi Pertanian, 8(2): 91–100.
- Salgotra, R.K., & Chauhan, B.S. 2023. Genetic Diversity, Conservation, and Utilization of Plant Genetic Resources. *Genes*, 14(1):174. <https://doi.org/10.3390/genes14010174>.
- Waluyo, Suparwoto, Johanes, A., & Nur, W.S. 2022. *Pengembangan Produksi Benih Sumber Varietas Unggul Baru (VUB) Padi Umur Genjah Hasil di Provinsi Sumatera Selatan*. KaliAgri Journal, 3(2): 51–60.
- Wati, H.D., Ekawati, I., & Ratna, P. 2022. *Keragaman Genetik dan Heritabilitas Karakter Komponen Hasil Jagung Varietas Lokal Sumenep*. Jurnal Pertanian Cemara, 19(1): 85–94.
- Widyapangesthi, D.A., Moeljani, I.R., & Soedjarwo, D.P. 2022. *Keragaman Genetik dan Heritabilitas M1 Mentimun (*Cucumis sativus* L.) Lokal Madura Hasil Iradiasi Sinar Gamma ⁶⁰Co*. Jurnal Agrium, 19(2): 191–196.
- Wolter, F., Schindele, P., & Puchta, H. 2019. *Plant Breeding at The Speed of Light: The power of CRISPR/Cas*. BMC Plant Biology, 19: 176.

BAB 4

TEKNIK PEMULIAAN TANAMAN MENYERBUK SILANG

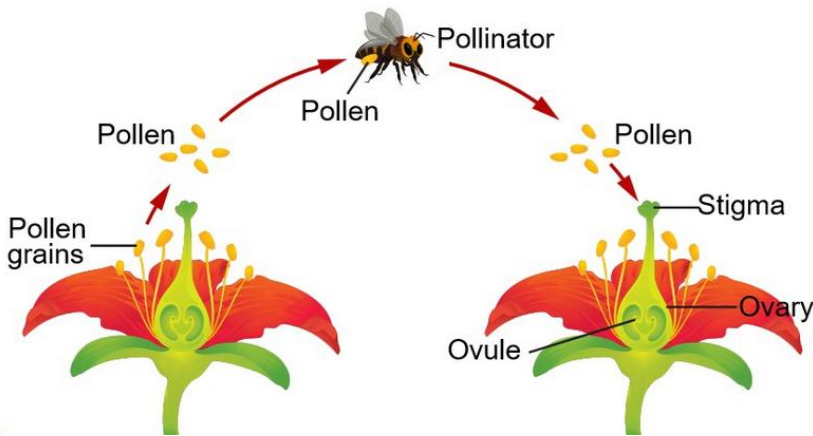
4.1 Pendahuluan

Tanaman menyerbuk silang (*allogamous*) adalah kelompok tanaman yang proses pembuahannya melibatkan perpindahan serbuk sari dari *anther* (kepala sari) satu individu ke *stigma* (kepala putik) individu lain yang memiliki genotipe berbeda. Berbeda dengan tanaman menyerbuk sendiri, fokus utama pemuliaan di sini adalah populasi, bukan individu tunggal. Keberhasilan pemuliaan sangat bergantung pada pengelolaan keragaman genetik dan pemanfaatan fenomena heterosis. Berikut adalah penjabaran mendalam mengenai pengertian, mekanisme pendukung, dan perbedaan mendasarnya dibandingkan tanaman menyerbuk sendiri.



Gambar 4.1. Penyerbukan sendiri dan penyerbukan silang
(sumber: www.shutterstock.com)

CROSS POLLINATION



Gambar 4.2. Penyerbuka Silang

4.1.1 Dasar Biologi dan Mekanisme Penyerbukan

Dasar biologi dan mekanisme penyerbukan pada tanaman menyerbuk silang (*allogamous*) berpusat pada upaya evolusi untuk memaksimalkan heterozigositas. Tanaman dalam kategori ini telah mengembangkan berbagai rintangan fisik, temporal, dan biokimia untuk mencegah penyerbukan sendiri (*selfing*) yang dapat mengakibatkan akumulasi alel homozigot berbahaya.

Hal yang perlu diperhatikan dalam teknik penyerbukan tanaman, khususnya penyerbukan silang, yaitu letak alat reproduksi (bunga jantan dan bunga betina) pada tanaman. Banyak tanaman menyerbuk silang memisahkan bunga jantan dan betina secara fisik untuk meminimalkan peluang penyerbukan sendiri. Mekanisme ini terbagi menjadi *monoecious*, di mana bunga jantan dan betina terpisah tetapi berada pada satu individu tanaman yang sama, contohnya jagung. Kondisi di mana alat kelamin jantan dan betina berada pada individu tanaman yang berbeda sama sekali disebut *dioecious*, contohnya pepaya dan salak. Menurut Acquaaah (2021), kondisi *dioecious* adalah mekanisme yang paling efektif untuk memastikan penyerbukan silang 100%, karena secara fisik tidak memungkinkan bagi serbuk sari untuk membuahi putik pada pohon yang sama.

Mekanisme-mekanisme penyerbukan yang terjadi dalam penyerbukan silang dapat mempengaruhi presentasi keberhasilan penyerbukan silang. Misalnya mekanisme pemisahan organ produksi secara spasial, pemisahan waktu kematangan (*dikogami*), ketidaksesuaian sendiri (*self-incompability*), dan diferensiasi morfologi bunga (*heterostili*). Banyak tanaman menyerbuk silang memisahkan bunga jantan dan betina secara fisik untuk meminimalkan peluang penyerbukan sendiri. Mekanisme ini terbagi menjadi monoecious, di mana bunga jantan dan betina terpisah tetapi berada pada satu individu tanaman yang sama, dan dioecious, di mana alat kelamin jantan dan betina berada pada individu tanaman yang berbeda sama sekali. Menurut Acquaaah (2021), kondisi dioecious adalah mekanisme yang paling efektif untuk memastikan penyerbukan silang 100%, karena secara fisik tidak memungkinkan bagi serbuk sari untuk membuahi putik pada pohon yang sama.

Mekanisme dikogami terjadi ketika organ reproduksi jantan dan betina pada bunga yang sama matang pada waktu yang berbeda. Terdapat dua jenis utama: protandri, di mana serbuk sari matang dan luruh sebelum putik reseptif, serta protogini, di mana putik menjadi reseptif sebelum serbuk sari matang. Sleper dan Poehlman (2020), menjelaskan bahwa dikogami sangat umum ditemukan pada tanaman sereal seperti jagung (*protandri*) dan mutlak diperlukan untuk menjaga keragaman genetik dalam populasi alami maupun pemuliaan.

Self-Incompatibility (SI) adalah mekanisme biokimia yang memungkinkan tanaman mengenali dan menolak serbuk sarinya sendiri meskipun serbuk sari tersebut subur dan fungsional. Mekanisme ini biasanya dikendalikan oleh lokus genetik tunggal yang disebut lokus-S. Bernardo (2020), menyatakan bahwa SI bekerja melalui interaksi protein antara serbuk sari dan stigma (atau gaya) yang menghentikan perkecambahan tabung serbuk sari jika terdapat kesamaan alel S. Hal ini memaksa tanaman untuk hanya menerima serbuk sari dari individu dengan genotipe berbeda, sehingga menjamin terjadinya rekombinasi genetik yang luas.

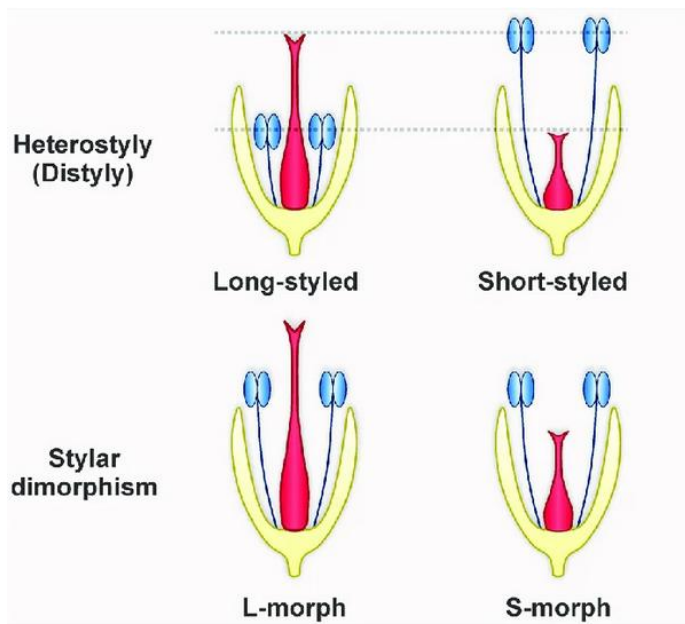
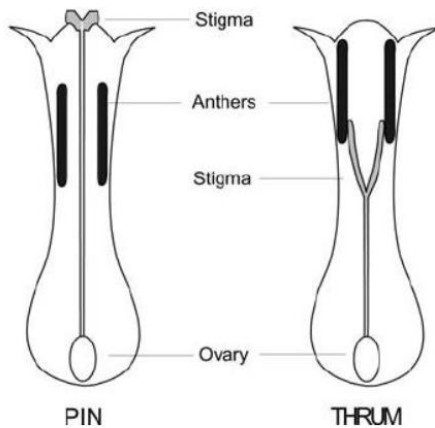
Beberapa spesies tanaman memiliki perbedaan struktur bunga yang ekstrem, seperti panjang tangkai putik (*style*) dan tangkai sari (*filament*) yang bervariasi antar individu dalam satu spesies. Fenomena ini disebut heterostili, yang bertujuan untuk memastikan bahwa serbuk sari dari satu tipe bunga hanya dapat menempel secara efektif pada bagian tubuh agen penyerbuk yang akan bersentuhan dengan putik pada tipe bunga lainnya (biasanya dibantu oleh posisi tubuh serangga penyerbuk yang spesifik). Mangoendidjojo (2023), menekankan bahwa adaptasi morfologis ini sering kali bekerja bersamaan dengan sistem inkompatibilitas fisiologis untuk memaksimalkan efisiensi penyerbukan silang. Mekanisme ini paling sering ditemukan pada genus *Primula*. Berikut adalah perbedaannya:

Karakteristik	Tipe Pin	Tipe Thrum
Posisi Putik	Tinggi (di mulut bunga)	Rendah (di dalam tabung)
Posisi Benang Sari	Rendah (di dalam tabung)	Tinggi (di mulut bunga)
Ukuran Serbuk Sari	Lebih kecil	Lebih besar
Permukaan Putik	Lebih kasar (papila panjang)	Lebih halus (papila pendek)

Logika Penyerbukannya: Ketika serangga mengunjungi bunga Thrum, serbuk sari dari bagian atas bunga akan menempel di kepala serangga. Saat serangga tersebut pindah ke bunga Pin, posisi serbuk sari di kepalanya akan tepat bersentuhan dengan kepala putik bunga Pin yang tinggi. Begitu pula sebaliknya. Contoh tanaman lain dengan heterostili:

- Kaca Piring (*Gardenia jasminoides*):** Menunjukkan variasi panjang putik untuk mencegah *selfing*.
- Tanaman Buckwheat (*Fagopyrum esculentum*):** Memiliki sistem distili yang sangat jelas untuk meningkatkan hasil biji melalui penyerbukan silang.

3. **Linum (*Linum usitatissimum*):** Beberapa spesies liar dalam genus ini memiliki mekanisme serupa.



Gambar 4.3. Heterostili (sumber: Carsodo *et al.* 2018)

4.1.2 Genetika Populasi: Hukum Hardy-Weinberg

Hukum Hardy-Weinberg adalah fondasi dari genetika populasi yang menjelaskan bagaimana frekuensi alel dan genotipe dalam suatu populasi dapat tetap stabil dari generasi ke generasi.

Bagi seorang pemulia tanaman menyerbuk silang, memahami hukum ini sangat krusial karena objek kerja pemuliaan adalah kumpulan gen (*gene pool*) dalam sebuah populasi, bukan sekadar individu tunggal. Untuk memahami Hukum Hardy-Weinberg dalam konteks pemuliaan tanaman modern, kita harus melihatnya bukan hanya sebagai rumus statis, tetapi sebagai alat diagnostik untuk mengukur perubahan genetik dalam sebuah populasi.

Prinsip Hardy-Weinberg menyatakan bahwa dalam populasi yang besar, di mana perkawinan terjadi secara acak dan tidak ada kekuatan evolusioner yang bekerja, frekuensi alel dan genotipe akan tetap konstan. Menurut Acquah (2021), keseimbangan ini memungkinkan pemulia untuk memprediksi komposisi genetik suatu populasi dasar sebelum melakukan program seleksi. Jika frekuensi alel dominan dilambangkan dengan p dan alel resesif dengan q , maka distribusinya mengikuti persamaan:

$$p^2 + 2pq + q^2 = 1$$

4.2 Konsep Keseimbangan Dinamis

Hukum Hardy-Weinberg (HW) menyatakan bahwa frekuensi alel dan genotipe dalam suatu populasi akan tetap konstan dari generasi ke generasi jika tidak ada pengaruh evolusioner. Dalam jurnal *Nature Education*, O'Connor (2014) menekankan bahwa HW berfungsi sebagai "model nol" (*null model*). Artinya, jika kita menemukan bahwa populasi tanaman tidak berada dalam keseimbangan, itu adalah bukti kuat bahwa ada kekuatan luar yang sedang bekerja, seperti seleksi alam atau intervensi pemulia.

4.3 Parameter Matematika dan Frekuensi Alel

Persamaan HW $p^2 + 2pq + q^2 = 1$ adalah dasar untuk menghitung Heterozigositas, yang merupakan indikator vital bagi tanaman menyerbuk silang. Penelitian oleh Falconer & Mackay (1995), dalam buku klasik mereka yang terus diperbarui (*Introduction to Quantitative Genetics*) menjelaskan bahwa nilai $2pq$ merepresentasikan potensi keragaman genetik. Pemulia tanaman menyerbuk silang (seperti jagung atau sawit) sangat bergantung

pada nilai ini untuk memprediksi Vigor Hibrida atau heterosis pada keturunan F1.

4.4 Kekuatan Pengubah Keseimbangan (Seleksi dan Drift)

Dalam pemuliaan praktis, hukum ini sengaja dilanggar. Bernardo (2020) dalam *Breeding for Quantitative Traits in Plants* menjelaskan bahwa Seleksi Rekuren adalah metode sistematis untuk secara bertahap menggeser frekuensi alel unggul (*p*) menjauh dari keseimbangan awal. Selain seleksi, jurnal *Frontiers in Plant Science* (Gozalo et al., 2023) menyoroti peran *Genetic Drift* pada populasi kecil. Drift dapat menyebabkan hilangnya alel langka yang mungkin berguna secara fungsional, sehingga pemulia harus menjaga ukuran populasi efektif (*Ne*) agar tetap besar.

4.5 Aplikasi dalam Marka Molekuler dan GWAS

Di era genomik, HW digunakan untuk melakukan kontrol kualitas pada data *Single Nucleotide Polymorphism* (SNP). Menurut Acquaah (2021), penyimpangan dari keseimbangan HW pada lokus tertentu sering kali menunjukkan adanya kesalahan *genotyping* atau tanda adanya seleksi ketat pada wilayah genom tersebut. Jurnal *Theoretical and Applied Genetics* sering menggunakan uji HW untuk memvalidasi populasi yang digunakan dalam *Genome-Wide Association Studies* (GWAS) guna memastikan asosiasi antara gen dan sifat tanaman adalah valid secara statistik.

Kekuatan	Dampak pada HW	Kegunaan bagi Pemulia
Seleksi	Mengubah frekuensi <i>p</i> dan <i>q</i> secara drastis.	Meningkatkan karakter ekonomi (hasil, ketahanan).
<i>Genetic Drift</i>	Perubahan acak pada frekuensi alel.	Bahaya bagi koleksi plasma nutfah (risiko kehilangan gen).
Migrasi	Introduksi alel baru ke populasi.	Memperluas keragaman genetik populasi dasar.
Inbreeding	Meningkatkan <i>p</i> ² dan <i>q</i> ² menurunkan <i>2pq</i>	Digunakan untuk membentuk galur murni (<i>inbred lines</i>).

4.5.1 Heterosis dan Depresi Inbreeding

1. Heterosis

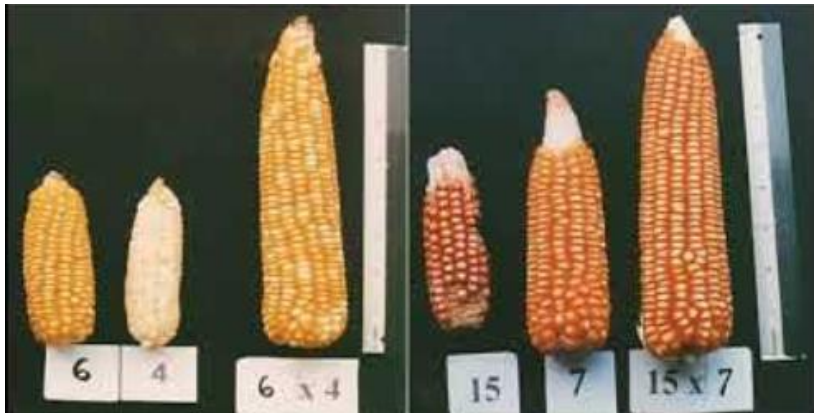
Heterosis dan depresi inbreeding adalah dua fenomena genetika yang saling bertolak belakang namun menjadi pilar utama dalam pemuliaan tanaman menyerbuk silang. Pemahaman atas keduanya memungkinkan pemulia untuk memprediksi seberapa besar keunggulan yang bisa didapat dari sebuah persilangan dan seberapa besar risiko penurunan vigor jika terjadi penyerbukan sendiri.

Heterosis, atau sering disebut vigor hibrida, adalah fenomena di mana keturunan hasil persilangan (F1) memiliki performa yang jauh melampaui rata-rata kedua tetuanya atau tetua terbaiknya. Fenomena ini mencakup peningkatan laju pertumbuhan, daya hasil, hingga ketahanan terhadap stres lingkungan. Menurut Acquaah (2021), heterosis adalah manifestasi dari interaksi alel pada lokus yang berbeda yang menghasilkan efek sinergis, yang menjadikannya landasan utama dalam industri benih hibrida global, terutama pada komoditas seperti jagung dan sorgum.

Heterosis bukan lagi sekadar fenomena tunggal, melainkan hasil dari interaksi genomik yang kompleks. Dalam jurnal *Nature Reviews Genetics*, Birchler et al. (2010) mengusulkan bahwa heterosis terjadi karena adanya variasi dalam dosis genetik dan regulasi ekspresi gen pada tingkat transkriptom. Literatur terbaru dari Fu et al. (2022) dalam *Frontiers in Plant Science* menambahkan bahwa perubahan epigenetik, seperti metilasi DNA, memainkan peran krusial dalam memicu vigor hibrida pada tanaman alogam, yang menjelaskan mengapa persilangan antar kelompok genetik yang jauh sering kali menghasilkan lonjakan produktivitas yang drastis.

Terdapat dua teori utama yang menjelaskan terjadinya heterosis secara ilmiah. Teori pertama adalah Teori Dominansi, yang menyatakan bahwa heterosis terjadi karena penutupan alel-alel resesif merugikan oleh alel dominan unggul pada kondisi heterozigot. Teori kedua adalah Teori Overdominansi, yang berargumen bahwa kondisi heterozigot (Aa) secara

inheren lebih unggul dibandingkan kedua kondisi homozigot (AA atau aa). Bernardo (2020), dalam publikasinya menekankan bahwa kemajuan teknologi genomik terbaru menunjukkan bahwa heterosis kemungkinan besar merupakan kombinasi dari kedua teori tersebut, ditambah dengan interaksi epistasis antar gen.



Gambar 4.4. Heterosis pada jagung
(sumber: Kuliah umum pemuliaan tanaman 2021 IPB University)

2. Depresi Inbreeding

Perkawinan sedarah (*inbreeding*) didefinisikan sebagai perkawinan individu yang memiliki hubungan kekerabatan melalui garis keturunan. Penyerbukan sendiri (perkawinan individu dengan dirinya sendiri) merupakan bentuk perkawinan sedarah yang paling ekstrem. Perkawinan sedarah menyebabkan peningkatan homozigositas dengan mengorbankan heterozigositas. Ciri utama perkawinan sedarah adalah bahwa ketika homozigositas meningkat dalam populasi yang mengalami perkawinan sedarah tanpa adanya seleksi, frekuensi genotipe berubah sementara frekuensi alel tetap tidak berubah. Perkawinan sedarah dapat terjadi secara tidak sengaja sebagai akibat dari seleksi atau pemeliharaan populasi kecil. Perkawinan sedarah juga dipraktikkan secara sengaja sebagai metode untuk

menciptakan keseragaman genetik dalam populasi yang diminati untuk penelitian genetik atau pemuliaan, untuk mempertahankan genotipe kultivar hasil perkawinan sedarah dari spesies yang melakukan penyerbukan sendiri selama bertahun-tahun produksi, atau untuk produksi galur hasil perkawinan sedarah yang andal yang akan digunakan dalam pengembangan kultivar hibrida komersial.

Depresi *inbreeding* adalah penurunan vigor, fertilitas, dan produktivitas yang terjadi ketika tanaman yang biasanya menyerbuk silang dipaksa untuk melakukan penyerbukan sendiri atau perkawinan antar kerabat dekat. Hal ini terjadi karena peningkatan homozigositas yang menyebabkan alel-alel resesif berbahaya yang sebelumnya tersembunyi menjadi muncul secara fenotipik. Sleper dan Poehlman (2020) menjelaskan bahwa tingkat depresi *inbreeding* sangat bervariasi antar spesies; tanaman seperti jagung menunjukkan depresi yang sangat tajam, sementara beberapa tanaman rumput-rumputan lebih toleran.

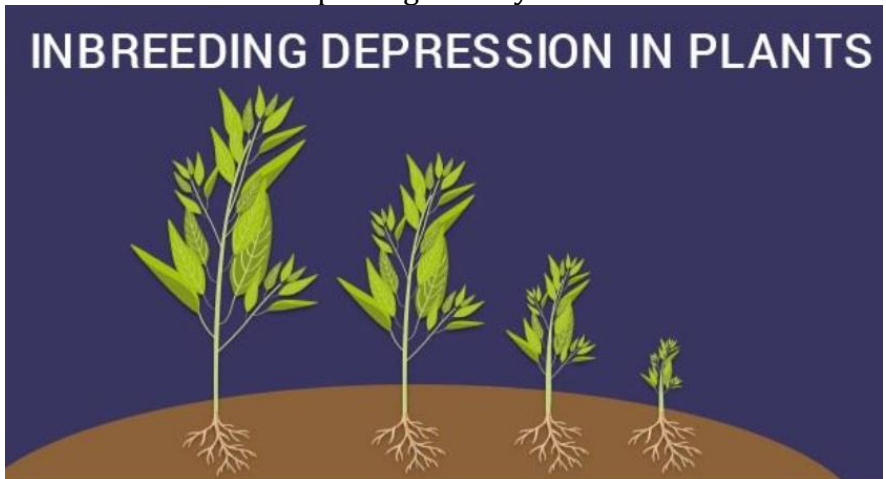
Depresi *inbreeding* dipandang sebagai manifestasi dari "beban genetik" (*genetic load*) dalam suatu populasi. Menurut penelitian Charlesworth & Willis (2009), akumulasi alel resesif yang merugikan (letal atau semi-lethal) tetap tersembunyi dalam kondisi heterozigot pada tanaman menyerbuk silang. Namun, ketika terjadi penyerbukan sendiri, alel-alel ini menjadi homozigot. Literatur klasik dari Falconer & Mackay (1996) yang tetap relevan hingga kini menekankan bahwa kecepatan penurunan vigor berbanding lurus dengan koefisien *inbreeding* (F), di mana tanaman alogam seperti jagung dapat kehilangan hingga 25-30% produktivitasnya hanya dalam satu generasi penyerbukan sendiri.

Charles Darwin, naturalis Inggris yang terkenal dengan teori evolusi dan seleksi alamnya, adalah orang pertama yang membedakan antara tumbuhan yang melakukan penyerbukan silang (spesies dengan mekanisme reproduksi yang mendorong penyerbukan silang, yang biasanya menunjukkan depresi perkawinan sedarah dan cenderung tidak toleran terhadap

perkawinan sedarah, misalnya jagung dan alfalfa) dan tumbuhan yang melakukan perkawinan sedarah (spesies dengan mekanisme reproduksi yang mendorong penyerbukan sendiri di mana depresi perkawinan sedarah minimal, yang mentolerir banyak generasi perkawinan sedarah, misalnya gandum dan oat). Darwin memperhatikan bahwa:

1. Penyerbukan silang lebih umum terjadi di alam daripada penyerbukan sendiri.
2. Terdapat sistem reproduksi kompleks yang mendorong penyerbukan silang pada tumbuhan.
3. Banyak spesies tumbuhan telah mengembangkan sistem yang mencegah penyerbukan sendiri.

Dalam program pemuliaan, depresi inbreeding sebenarnya digunakan sebagai alat untuk mencapai heterosis. Pemulia sengaja melakukan penyerbukan sendiri selama beberapa generasi untuk membentuk galur murni (*inbred lines*) yang stabil meskipun vigornya rendah. Ketika dua galur murni yang berbeda ini disilangkan, heterosis akan muncul secara maksimal pada keturunannya. Mangoendidjojo (2023) menekankan bahwa kunci keberhasilan hibrida terletak pada "daya gabung" (*combining ability*) antara galur-galur yang telah mengalami depresi inbreeding tersebut untuk memulihkan dan melampaui vigor aslinya.



Gambar 4.5. Depresi *Inbreeding* (sumber: byjus-com)

4.5.2 Metode Seleksi

Metode Seleksi Tanpa Uji Keturunan

Metode seleksi tanpa uji keturunan (*selection without progeny testing*) merupakan pendekatan klasik dalam pemuliaan tanaman menyerbuk silang yang didasarkan sepenuhnya pada penampilan fenotipe tanaman secara individual. Pada metode ini, tanaman yang terpilih langsung digunakan sebagai tetua atau benih untuk generasi berikutnya tanpa terlebih dahulu mengevaluasi performa keturunannya melalui pertanaman terpisah.

Dalam pemuliaan tanaman menyerbuk silang (*allogamous*), unit seleksi dapat berupa individu maupun populasi. Pada metode tanpa uji keturunan, seleksi difokuskan pada pengumpulan alel-alel unggul dari individu-individu terbaik yang tampak di lahan. Menurut Acquaah (2021), efisiensi metode ini sangat bergantung pada nilai heritabilitas (h^2) karakter yang diseleksi. Jika suatu karakter memiliki heritabilitas tinggi (misalnya warna biji atau tinggi tanaman), maka penampilan fenotipe tanaman tersebut mencerminkan keadaan genotipe yang sesungguhnya. Sebaliknya, jika heritabilitas rendah (seperti hasil panen), seleksi fenotipik langsung menjadi kurang efektif karena tertutup oleh pengaruh lingkungan.

Secara umum, terdapat dua variasi utama dari seleksi tanpa uji keturunan yang sering diterapkan di lapangan:

1. Seleksi Massa Positif (*Positive Mass Selection*)

Pada metode ini, pemulia mengamati populasi dasar secara keseluruhan, memilih sejumlah tanaman yang memiliki fenotipe unggul sesuai kriteria, lalu memanen dan mencampur bijinya (*bulking*) untuk ditanam pada musim berikutnya.

- a. **Penerapan:** Digunakan untuk memurnikan varietas lokal atau memperbaiki populasi dasar yang sangat beragam.
- b. **Keterbatasan:** Menurut Sleper dan Poehlman (2020), kelemahan utama seleksi massa positif adalah tidak adanya kontrol terhadap tetua jantan. Serbuk sari yang

membuahi tanaman terpilih bisa saja berasal dari tanaman inferior di sekitarnya yang tidak ikut terseleksi.

2. Seleksi Massa Terstratifikasi (*Stratified/Grid Mass Selection*)

Untuk mengatasi kelemahan seleksi massa klasik terhadap variasi lingkungan (seperti kesuburan tanah yang tidak merata), Gardner (1961) dalam penelitian klasiknya yang dipublikasikan dalam *Crop Science* memperkenalkan metode seleksi massa terstratifikasi atau sistem *grid*.

- a. **Prosedur:** Lahan pertanaman dibagi menjadi petak-petak kecil atau *grid* yang seragam. Seleksi kemudian dilakukan dengan memilih individu terbaik dari **setiap petak**, bukan dari keseluruhan lahan secara acak.
- b. **Tujuan:** Meminimalkan pengaruh variasi mikro-lingkungan lahan, sehingga perbedaan fenotipe antar tanaman dalam satu petak kecil lebih mencerminkan perbedaan genetik yang sebenarnya.

Berikut adalah perbandingan karakteristik kedua metode tersebut sebagai bahan pertimbangan dalam menyusun strategi pemuliaan

Parameter	Kelebihan	Kelemahan
Waktu & Biaya	Sangat cepat (hanya butuh 1 musim per siklus) dan ekonomis.	Kurang efektif untuk sifat kuantitatif yang dikendalikan banyak gen.
Teknis	Prosedur di lapangan sangat sederhana, tidak memerlukan pencatatan silsilah (<i>pedigree</i>).	Tidak ada kontrol terhadap asal-usul serbuk sari (tetua jantan).
Keragaman	Mempertahankan dasar genetik yang luas (<i>broad genetic base</i>), mencegah depresi inbreeding.	Kemajuan seleksi (<i>genetic advance</i>) cenderung lambat untuk karakter dengan heritabilitas rendah.

Meskipun saat ini telah berkembang metode seleksi berbasis marka molekuler, seleksi tanpa uji keturunan tetap memiliki tempat dalam pemuliaan modern. Menurut Bernardo (2020), metode ini masih sangat efektif digunakan pada tahap

awal pembentukan populasi dasar (*base population*) sebelum pemulia melakukan seleksi rekuren yang lebih intensif. Selain itu, seleksi massa terstratifikasi tetap menjadi pilihan utama bagi pemulia di negara berkembang untuk memperbaiki varietas lokal (*landrace*) secara partisipatif bersama petani.

Metode Seleksi dengan Pengujian Keturunan

Metode seleksi dengan pengujian keturunan (*selection with progeny testing*) adalah pendekatan pemuliaan di mana pemilihan tanaman tetua didasarkan pada performa keturunannya, bukan hanya pada penampilan fenotipe individu tanaman itu sendiri. Dalam tanaman menyerbuk silang (*allogamous*), metode ini sangat penting karena penampilan luar suatu tanaman sering kali tidak mencerminkan nilai genetiknya yang sebenarnya akibat pengaruh lingkungan yang kuat atau adanya gen resesif yang tersembunyi.

Pada tanaman menyerbuk silang, nilai pemuliaan (*breeding value*) suatu tanaman paling akurat dinilai dengan cara menanam dan mengevaluasi keturunannya pada musim berikutnya. Menurut Acquaah (2021), metode ini memisahkan pengaruh variasi lingkungan dari variasi genetik, sehingga sangat efektif untuk karakter-karakter yang memiliki heritabilitas rendah (h^2), seperti hasil panen (ton/ha) atau ketahanan terhadap cekaman abiotik. Proses ini memungkinkan pemulia untuk mengontrol kontribusi genetik tetua secara lebih pasti. Jika keturunan dari suatu tanaman menunjukkan performa rata-rata yang unggul di lapangan, maka tanaman tetua tersebut dipastikan memiliki nilai genetik yang baik dan dipilih untuk direkombinasi pada siklus berikutnya.

Terdapat beberapa metode yang umum digunakan oleh pemulia tanaman menyerbuk silang:

1. Seleksi Tongkol ke Baris (*Ear-to-Row Selection*)

Metode ini awalnya dikembangkan oleh Hopkins pada tahun 1896 untuk tanaman jagung.

- a. Prosedur:** Tanaman dipilih berdasarkan fenotipe, kemudian biji dari masing-masing tongkol (atau tanaman) dipanen secara terpisah. Pada musim

berikutnya, sebagian biji dari setiap tongkol ditanam dalam satu baris terpisah untuk dievaluasi.

- b. **Modifikasi Gardner:** Biji dari tongkol terpilih ditanam dalam uji multilokasi dengan ulangan untuk memperkecil bias lingkungan sebelum sisa bijinya dicampur untuk pembentukan populasi baru (Gardner, 1961).

2. Seleksi Rekuren (*Recurrent Selection*)

Metode seleksi berulang yang dirancang untuk meningkatkan frekuensi alel unggul dalam suatu populasi secara bertahap tanpa kehilangan keragaman genetik. Menurut Hallauer et al. (2010), seleksi rekuren terdiri dari tiga fase utama yang membentuk satu siklus:

- a. **Pembentukan Keturunan:** Tanaman dari populasi dasar disilangkan secara terkontrol (misalnya *selfing*, *half-sib*, atau *full-sib*).
- b. **Uji Keturunan:** Keturunan tersebut ditanam dalam rancangan percobaan terstruktur (biasanya multilokasi) untuk dievaluasi karakter unggulnya.
- c. **Rekombinasi:** Sisa benih dari tetua yang keturunannya terbukti paling unggul dicampur dan ditanam bersama untuk saling menyerbuk silang, menghasilkan populasi baru untuk siklus berikutnya.

3. Seleksi Berdasarkan Daya Gabung (*Combining Ability*)

Metode ini secara spesifik digunakan dalam pembentukan varietas hibrida untuk menguji kemampuan suatu genotipe menghasilkan keturunan unggul bila disilangkan.

- a. **Daya Gabung Umum (DGU):** Rata-rata performa suatu galur ketika disilangkan dengan berbagai galur lain (menggunakan penguji berdasar genetik luas).
- b. **Daya Gabung Khusus (DGK):** Kemampuan pasangan galur tertentu untuk menghasilkan keturunan yang jauh lebih unggul daripada rata-rata persilangan lainnya (Bernardo, 2020).

Berikut adalah perbandingan karakteristik kedua metode tersebut sebagai bahan pertimbangan dalam menyusun strategi pemuliaan:

Parameter	Kelebihan	Kelemahan
Akurasi Genetik	Sangat tinggi karena didasarkan pada nilai pemuliaan (<i>breeding value</i>) yang nyata.	Memerlukan waktu lebih lama (setidaknya 2–3 musim per satu siklus seleksi).
Karakter Sasaran	Sangat efektif untuk memperbaiki karakter kuantitatif dengan heritabilitas rendah.	Memerlukan lahan yang lebih luas untuk pengujian baris keturunan.
Kontrol Tetua	Kontrol terhadap tetua jantan dan betina bisa dilakukan secara penuh (pada <i>full-sib</i> atau <i>selfing</i>).	Biaya operasional dan tenaga kerja untuk pencatatan serta persilangan tangan relatif tinggi.

Dalam pemuliaan modern, seleksi dengan pengujian keturunan kini banyak diintegrasikan dengan teknologi marka molekuler (*Marker-Assisted Selection* atau MAS). Menurut Bernardo (2020), pengujian keturunan di lapangan tetap menjadi validasi akhir yang mutlak diperlukan untuk membuktikan apakah prediksi genetik di laboratorium sesuai dengan ekspresi fenotipe tanaman di bawah tekanan lingkungan nyata.

4.6 Pengembangan Varietas Bersari Bebas (*Open-Pollinated*) dan Sintetik

Pengembangan Varietas Bersari Bebas (*Open-Pollinated Varieties*/OPV) dan Varietas Sintetik merupakan dua strategi penting dalam pemuliaan tanaman menyerbuk silang (*allogamous*). Meskipun keduanya menghasilkan benih yang dapat ditanam kembali oleh petani pada musim berikutnya, keduanya memiliki dasar genetik, metode pembentukan, dan tingkat keseragaman yang berbeda.

Pengembangan Varietas Bersari Bebas (Open-Pollinated)

Varietas bersari bebas adalah populasi tanaman menyerbuk silang yang dipelihara melalui penyerbukan alami antar individu di dalam populasi tersebut tanpa adanya kontrol buatan terhadap serbuk sari. Menurut Mangoendidjojo (2023), secara genetik varietas ini bersifat heterozigot dan heterogen. Artinya, setiap tanaman individual memiliki susunan gen yang tidak sama (heterogen), namun keragaman ini sengaja dipertahankan dalam batas tertentu agar populasi tetap adaptif terhadap perubahan lingkungan.

Pengembangan OPV umumnya diawali dari populasi dasar yang memiliki keragaman genetik luas (*broad genetic base*), seperti koleksi plasma nutfah lokal atau komposit.

1. **Seleksi Massa:** Pemulia memilih individu-individu dengan fenotipe unggul, lalu mencampurkan bijinya untuk ditanam pada generasi berikutnya (Acquaah, 2021).
2. **Isolasi Reproduksi:** Untuk menjaga kemurnian varietas OPV dari kontaminasi serbuk sari luar, pertanaman harus diisolasi secara jarak (minimal 200–400 meter untuk jagung) atau waktu (Sleper & Poehlman, 2020).

Varietas Sintetik (*Synthetic Varieties*)

Varietas sintetik adalah varietas yang dibentuk melalui persilangan terbuka (*intermating*) dari sejumlah komponen tetua (biasanya 5 hingga 10 tetua) yang telah diuji Daya Gabung Umumnya (DGU). Tetua ini dapat berupa galur murni (*inbred lines*), klon, atau varietas bersari bebas lain.

Menurut Bernardo (2020), varietas sintetik memiliki dasar genetik yang lebih sempit dibandingkan OPV konvensional tetapi lebih luas dibandingkan varietas hibrida tunggal. Varietas ini sengaja dirancang untuk memanfaatkan sebagian dari gejala heterosis pada generasi awal (*Syn₁*) dan mempertahankan stabilitas hasil pada generasi berikutnya (*Syn₂*, *Syn₃*, dst.).

Pembentukan varietas sintetik melibatkan tiga tahap utama yang dijelaskan oleh Hallauer dkk. (2010):

1. **Pemilihan Tetua:** Memilih sejumlah tetua potensial.

2. **Pengujian DGU:** Menguji daya gabung umum untuk memastikan bahwa ketika tetua-tetua tersebut saling bersilang, mereka menghasilkan keturunan yang unggul.
3. **Rekombinasi:** Menanam tetua terpilih secara bersamaan di lahan isolasi agar terjadi penyerbukan silang secara acak.

Untuk memprediksi penurunan hasil pada generasi Syn_2 akibat berkurangnya heterosis, pemulia menggunakan Persamaan Wright (1922):

$$\hat{Y}_{Syn2} = \bar{Y}_{Syn1} - \frac{\bar{Y}_{Syn1} - \bar{Y}_{Inbred}}{n}$$

$\hat{Y}_{Syn2}$ = Prediksi hasil generasi Syn_2

$\bar{Y}_{Syn1}$ = Hasil rata-rata generasi Syn_1 (F1 dari persilangan semua tetua).

$\bar{Y}_{Inbred}$ = Rata-rata hasil dari tetua itu sendiri jika mengalami penyerbukan sendiri

n = Jumlah tetua yang digunakan

Berdasarkan rumus di atas, makin banyak jumlah tetua yang digunakan, maka penurunan hasil pada generasi Syn_2 akan makin kecil. Namun, jika n terlalu banyak, rata-rata keunggulan tetua $\bar{Y}_{Syn1}$ biasanya akan menurun.

Berikut adalah perbedaan utama OPV vs Varietas sintetik:

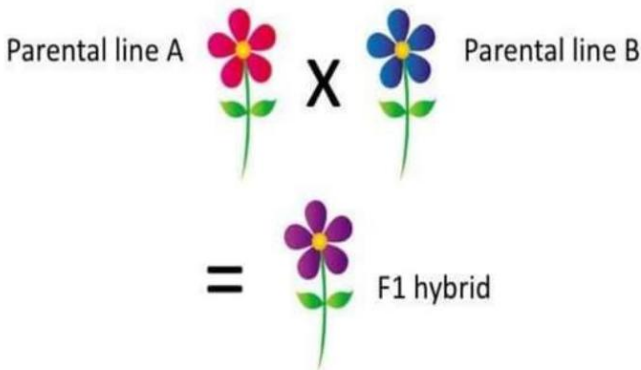
Parameter	Varietas Bersari Bebas (OPV)	Varietas Sintetik
Asal-Usul Tetua	Seleksi dari populasi lokal atau komposit yang sudah ada.	Kombinasi terencana dari tetua (galur/klon) yang diuji daya gabungannya.
Kontrol Genetik	Sangat rendah; penyerbukan terjadi secara bebas alami.	Terkontrol pada generasi awal (\$Syn_1\$), kemudian dibiarkan bebas.
Tingkat Hasil (Yield)	Lebih rendah dibandingkan sintetis dan hibrida.	Lebih tinggi dari OPV karena memanfaatkan sebagian heterosis.
Keseragaman	Relatif beragam (heterogen).	Lebih seragam dibandingkan OPV konvensional.
Penggunaan Benih	Benih dapat terus ditanam ulang oleh petani selama bertahun-tahun.	Benih dapat ditanam ulang, namun disarankan diganti setelah 3-4 generasi.

4.7 Pemuliaan Varietas Hibrida

Pemuliaan varietas hibrida pada tanaman menyerbuk silang (*allogamous*) merupakan teknik pemuliaan yang paling intensif untuk mengeksploitasi fenomena **heterosis** atau vigor hibrida. Berbeda dengan varietas bersari bebas, hibrida adalah keturunan generasi pertama (F1) dari persilangan antara dua atau lebih tetua (galur murni) yang secara genetik berbeda namun homogen secara individu.

Tujuan utama pemuliaan hibrida adalah untuk mengeksploitasi Daya Gabung Khusus (DGK) guna mendapatkan kombinasi genetik yang menghasilkan performa jauh di atas rata-rata tetuanya. Menurut Acquaah (2021), varietas hibrida menawarkan keunggulan berupa hasil yang lebih tinggi, ketahanan terhadap hama/penyakit yang lebih baik, serta keseragaman fenotipe yang sangat tinggi di lapangan, yang memudahkan pemanenan mekanis.

Hybridization in plants



Pembentukan tanaman hibrida

Proses pengembangan hibrida melalui siklus yang ketat dan memakan waktu bertahun-tahun. Tahapannya meliputi:

1. Pembentukan Galur Murni (*Inbred Lines*)

Proses ini dilakukan melalui penyerbukan sendiri (*selfing*) secara berulang selama 6–8 generasi. Tujuannya adalah mencapai homozigositas total sehingga sifat-sifat tanaman menjadi stabil dan seragam. Bernardo (2020) menjelaskan bahwa selama proses ini, pemulia melakukan *purging* atau pembuangan individu yang menunjukkan depresi inbreeding yang parah, sehingga hanya galur dengan kombinasi genetik kuat yang dipertahankan.

2. Evaluasi dan Pengujian Silng (*Top-Cross*)

Tidak semua galur murni memiliki daya gabung yang baik, oleh karena itu dilakukan pengujian awal menggunakan "penguji" (*tester*) berdasar genetik luas. Menurut Hallauer et al. (2010), tahap ini krusial untuk mengidentifikasi galur-galur yang memiliki Daya Gabung Umum (DGU) tinggi sebelum dilanjutkan ke persilangan dialel untuk mencari pasangan DGK terbaik.

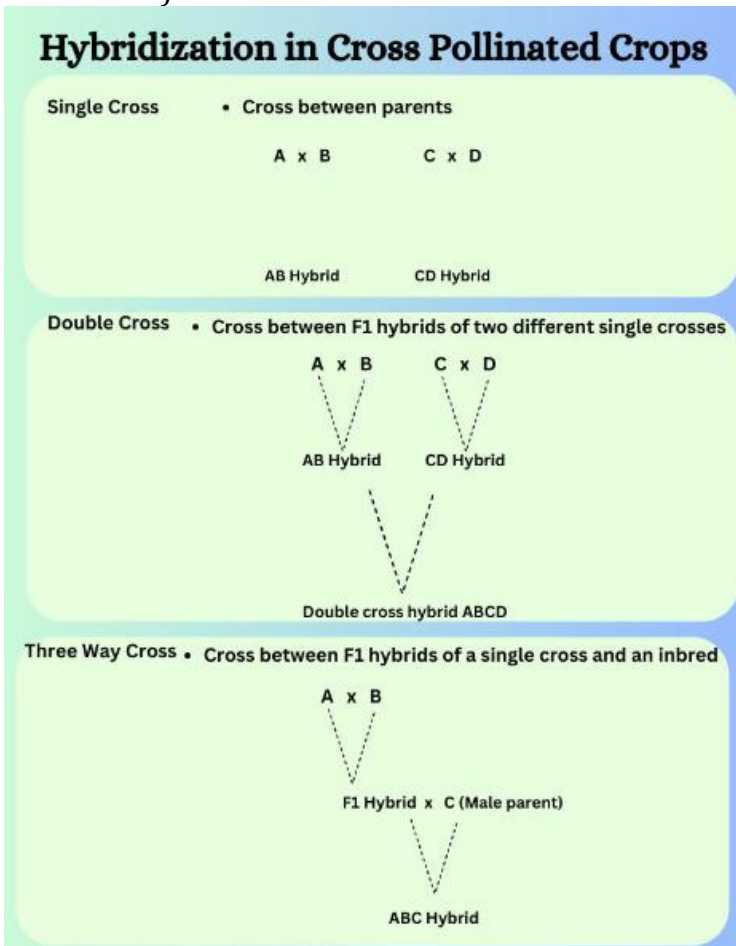
- a. **Daya Gabung Umum (DGU):** Performa rata-rata galur dalam serangkaian persilangan (diuji dengan *topcross*).

- b. **Daya Gabung Khusus (DGK):** Performa spesifik dari pasangan persilangan tertentu yang melampaui ekspektasi DGU-nya (Hallauer et al., 2010).

3. Pembentukan Hibrida Komersial

Hibrida dapat dibentuk dalam beberapa tipe:

- Single Cross:** Persilangan antara dua galur murni ($A \times B$) Menghasilkan keseragaman tertinggi.
- Three-way Cross:** Persilangan hibrida F1 dengan galur murni ketiga ($A \times B \times C$)
- Double Cross:** Persilangan antara dua hibrida F1 ($A \times B$) $\times$ ($C \times D$).



Ilustrasi tipe polinasi untuk pembentukan hibrida

4. Uji Multilokasi

Kombinasi hibrida terbaik (F1) kemudian diuji di berbagai lokasi dan musim untuk memastikan stabilitas hasilnya sebelum dilepas ke pasar.

Untuk memproduksi benih hibrida secara massal dan ekonomis, pemulia harus mencegah tanaman betina melakukan penyerbukan sendiri. Beberapa mekanisme yang digunakan antara lain:

- a. **Emaskulasi Manual/Mekanis:** Pembuangan bunga jantan secara manual (misal: *detasseling* pada jagung).
- b. **Kemandulan Jantan Sitoplasmik (*Cytoplasmic Male Sterility* - CMS):** Penggunaan sifat genetik yang membuat bunga jantan tidak menghasilkan serbuk sari fungsional, sehingga penyerbukan hanya bisa terjadi dari baris tanaman "restorer" atau jantan (Sleper & Poehlman, 2020).
- c. ***Self-Incompatibility* (SI):** Digunakan pada tanaman seperti kubis-kubisan untuk memastikan hanya serbuk sari dari varietas lain yang dapat membuahi.

Varietas hibrida memberikan keuntungan berupa hasil yang tinggi dan keseragaman waktu panen yang sangat baik bagi industri. Namun, benih hibrida tidak dapat ditanam ulang oleh petani karena pada generasi F2 akan terjadi segregasi genetik yang menyebabkan penurunan hasil secara drastis. Mangoendidjojo (2023) menekankan bahwa penggunaan hibrida di daerah tropis seperti Indonesia memerlukan adaptasi terhadap cekaman biotik lokal agar potensi heterosisnya dapat keluar secara maksimal.

4.8 Bioteknologi dalam Pemuliaan Penyerbuk Silang

Penerapan bioteknologi dalam pemuliaan tanaman menyerbuk silang (*allogamous*) telah merevolusi cara pemulia mengelola keragaman genetik dan mempercepat siklus seleksi. Pada tanaman alogam, tantangan utama adalah heterozigositas yang tinggi dan adanya depresi inbreeding. Bioteknologi hadir

untuk memberikan presisi yang tidak dapat dicapai oleh metode konvensional.

1. Seleksi Berbantuan Marka (*Marker-Assisted Selection - MAS*)

Proses seleksi dengan bantuan MAS memungkinkan pemulia untuk memilih tanaman berdasarkan keberadaan marka DNA spesifik yang terkait dengan sifat unggul, tanpa harus menunggu tanaman tumbuh dewasa atau terpapar stres lingkungan. Penggunaan MAS sangat efektif untuk *pyramiding* gen ketahanan (menggabungkan beberapa gen tahan penyakit dalam satu tanaman). Menurut Acquaaah (2021), MAS secara drastis meningkatkan efisiensi seleksi untuk karakter kuantitatif dengan heritabilitas rendah pada populasi alogam karena marka molekuler tidak dipengaruhi oleh fluktuasi lingkungan.

2. Teknologi *Doubled Haploids* (DH)

Teknologi DH merupakan terobosan terbesar untuk mengatasi masalah depresi inbreeding dan lamanya waktu pembentukan galur murni pada tanaman menyerbuk silang. Mekanisme teknologi DH ini yaitu dilakukan melalui kultur anther atau induksi polen, yang akan menghasilkan tanaman haploid (n). Selanjutnya terjadi penggandaan kromosom menjadi diploid ($2n$) yang homozigot sempurna hanya dalam satu generasi. Bernardo (2020) menjelaskan bahwa teknologi DH pada jagung dapat memangkas waktu pengembangan galur murni dari 6–8 generasi (melalui *selfing* manual) menjadi hanya 2 generasi, yang secara ekonomi sangat meningkatkan *return on investment* industri benih.

3. Seleksi Genomik (*Genomic Selection - GS*)

Seleksi genomik adalah bentuk lanjutan dari MAS yang menggunakan ribuan marka (SNP) di seluruh genom untuk memprediksi nilai pemuliaan (*Genomic Estimated Breeding Values - GEBVs*). Kelebihan dari seleksi genomik yaitu sangat cocok untuk sifat kompleks, seperti hasil panen (ton/ha) yang dikendalikan oleh banyak gen kecil. Gozalo et al. (2023) dalam artikelnya yang dimuat di Jurnal *Frontiers in Plant*

Science menyoroti bahwa GS memungkinkan pemulia tanaman alogam untuk melakukan seleksi pada tahap bibit tanpa pengujian lapangan yang ekstensif, sehingga mempercepat kemajuan genetik per tahun secara signifikan.

4. Pengeditan Genom (*Genome Editing* - CRISPR/Cas9)

Teknologi ini memungkinkan perubahan presisi pada sekuens DNA spesifik untuk memperbaiki sifat atau menonaktifkan gen yang merugikan. Pada tanaman penyerbuk silang yang memiliki sistem *Self-Incompatibility* (SI), CRISPR dapat digunakan untuk menonaktifkan gen SI tersebut sehingga tanaman dapat dilakukan penyerbukan sendiri dengan mudah untuk riset galur murni. Menurut Fu et al. (2022), pengeditan gen memberikan peluang untuk menciptakan variasi genetik baru pada populasi alogam yang memiliki dasar genetik sempit tanpa memasukkan DNA asing (non-transgenik).

5. Rekayasa Genetika (GMO)

Meskipun pengeditan genom mulai mendominasi, penyisipan gen asing (transgenik) tetap relevan untuk sifat-sifat yang tidak ditemukan dalam *gene pool* spesies tersebut, seperti sifat *Bt-corn* untuk resistensi hama. Sleper & Poehlman (2020) mencatat bahwa pada tanaman penyerbuk silang, manajemen aliran gen (*gene flow*) dari tanaman transgenik ke kerabat liarnya menjadi perhatian utama dalam bioetika dan regulasi keamanan hayati.

DAFTAR PUSTAKA

- Acquaah, G. (2021). *Principles of plant genetics and breeding* (3rd ed.). Wiley-Blackwell.
- Bernardo, R. (2020). *Breeding for quantitative traits in plants*. Stemma Press.
- Birchler, J. A., Yao, H., Chudalayandi, S., Vaiman, D., & Veitia, R. A. (2010). Heterosis. *Nature Reviews Genetics*, 11(11), 753–763. <https://doi.org/10.1038/nrg2876>
- Charlesworth, D., & Willis, J. H. (2009). The genetics of inbreeding depression. *Nature Reviews Genetics*, 10(11), 783–796. <https://doi.org/10.1038/nrg2664>
- Duvick, D. N. (2001). Biotechnology in the 1930s: the development of hybrid maize. *Advances in Agronomy*, 73, 1–30.
- Falconer, D. S., & Mackay, T. F. (1996). *Introduction to quantitative genetics* (4th ed.). Longman.
- Fu, R., Wang, L., & Zhang, J. (2022). The role of epigenetics in plant heterosis. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.851034>
- Gardner, C. O. (1961). An evaluation of effects of mass selection and seed irradiation with thermal neutrons on yield of corn. *Crop Science*, 1(4), 241–245.
- Gozalo, J., et al. (2023). Efficiency of genomic selection in open-pollinated populations. *Frontiers in Plant Science*, 14.
- Hallauer, A. R., Carena, M. J., & Filho, J. B. M. (2010). *Quantitative genetics in maize breeding*. Springer Science & Business Media.
- Lippman, Z. B., & Zamir, D. (2007). Heterosis: Revisiting the magic. *Theoretical and Applied Genetics*, 114, 157–164.
- Mangoendidjojo, W. (2023). *Dasar-dasar pemuliaan tanaman*. Kanisius.
- O'Connor, C. (2014). Adams, Hardy, Weinberg, and the population genetics of Mendelian locus. *Nature Education*, 7(4).
- Sleper, D. A., & Poehlman, J. M. (2020). *Breeding field crops* (6th ed.). John Wiley & Sons.

- Wray, N., & Visscher, P. (2008). Estimating trait heritability. *Nature Education*, 1(1), 29.
- Wright, S. (1922). The effects of inbreeding and crossbreeding on guinea pigs. *USDA Bulletin*, No. 1121.

BAB 5

TEKNIK PEMULIAAN TANAMAN SECARA VEGETATIF

5.1 Pengertian Pemuliaan Tanaman

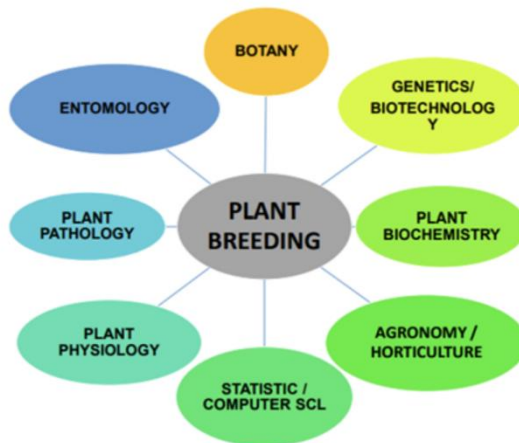
Pemuliaan tanaman merupakan ilmu dan kegiatan yang bertujuan memperbaiki sifat genetik tanaman sehingga diperoleh varietas unggul yang memiliki produktivitas tinggi, mutu hasil baik, tahan terhadap hama dan penyakit, serta mampu beradaptasi terhadap kondisi lingkungan tertentu. Pemuliaan tanaman dilakukan melalui berbagai metode, seperti seleksi, persilangan, mutasi, poliploidisasi, hingga pemanfaatan bioteknologi modern.

Menurut Firmansyah *et al.*, 2023; Cahyadi, 2024, pemuliaan tanaman merupakan upaya perubahan sifat tanaman menjadi lebih unggul dibandingkan varietas sebelumnya sehingga memberikan manfaat lebih besar bagi manusia. Sementara itu, penelitian terbaru mengenai pengembangan varietas padi tahan kekeringan menjelaskan bahwa pemuliaan tanaman merupakan pendekatan ilmiah untuk menghasilkan tanaman yang adaptif terhadap perubahan lingkungan melalui seleksi genotipe unggul dan teknik pemuliaan konvensional maupun molekuler.

Dalam perkembangan ilmu pertanian modern, pemuliaan tanaman juga dipahami sebagai proses pemanfaatan keragaman genetik untuk menghasilkan varietas yang memiliki karakter agronomis lebih baik, baik dari aspek hasil, kualitas, maupun ketahanan terhadap cekaman biotik dan abiotik. Hal ini terlihat pada berbagai penelitian terkini mengenai pemuliaan mutasi dan pengembangan tanaman hortikultura di Indonesia.

Seorang pemulia tanaman perlu memiliki pengetahuan dasar yang sangat penting dalam pelaksanaan program pemuliaan tanaman. Pengetahuan tersebut meliputi genetika dan sitogenetika, pemahaman mengenai karakteristik tanaman yang akan diperbaiki, analisis hasil seleksi melalui pendekatan statistik, pengujian galur

maupun populasi, serta pemahaman terhadap kebutuhan konsumen. Selain itu, berbagai disiplin ilmu lain juga dapat diterapkan secara terpadu untuk mendukung keberhasilan kegiatan pemuliaan tanaman.



Gambar 5.1. Ilmu-ilmu yang mendukung pemuliaan tanaman (Selvia, 2021)

Tujuan utama pemuliaan tanaman meliputi:

1. Meningkatkan produktivitas tanaman.
2. Memperbaiki kualitas hasil panen.
3. Meningkatkan ketahanan terhadap hama dan penyakit.
4. Meningkatkan toleransi terhadap cekaman lingkungan.
5. Menghasilkan varietas yang sesuai dengan kebutuhan konsumen dan industri pertanian.

Selain tujuan utama, pemuliaan juga memiliki manfaat yaitu :

1. Menciptakan varietas unggul.
2. Produktivitas tanaman meningkat.
3. Meningkatkan resistensi tanaman.

5.2 Pengertian Pemuliaan Tanaman Secara Vegetatif

Pemuliaan tanaman secara vegetatif adalah salah satu teknik pemuliaan tanaman yang dilakukan melalui perbanyakan secara

aseksual dengan memanfaatkan organ vegetatif tanaman, seperti batang, akar, daun, tunas, stek, cangkok, okulasi, sambung pucuk, serta kultur jaringan, tanpa melibatkan proses reproduksi generatif. Metode ini digunakan untuk mempertahankan karakter unggul dari tanaman induk agar individu yang dihasilkan memiliki kesamaan genetik dan fenotipik dengan tanaman asal. Penerapan pemuliaan vegetatif banyak dilakukan pada tanaman hortikultura, tanaman perkebunan, tanaman hias, serta beberapa jenis tanaman pangan yang memiliki kemampuan perkembangbiakan biji yang rendah atau sulit dilakukan secara generative (Firmansyah *et al.*, 2023). Dalam perkembangan pemuliaan tanaman modern, teknik pemuliaan vegetatif tidak hanya dimanfaatkan sebagai metode perbanyakan tanaman secara cepat dan seragam, tetapi juga digunakan dalam pengembangan varietas unggul melalui penerapan teknologi *in vitro*, induksi mutasi, dan mikropropagasi. Penerapan kultur jaringan berperan penting dalam menghasilkan bibit dalam jumlah besar, memiliki kualitas kesehatan yang baik karena bebas dari patogen, serta mendukung percepatan penyediaan bahan tanam unggul dengan tingkat produktivitas tinggi dan kemampuan adaptasi yang baik terhadap kondisi lingkungan.

Pemuliaan vegetatif mempunyai kelebihan dalam mempertahankan kestabilan karakter genetik tanaman unggul karena proses perbanyakannya berlangsung secara aseksual tanpa melalui rekombinasi genetik. Oleh karena itu, metode ini широко digunakan dalam program pengembangan varietas unggul guna meningkatkan mutu hasil produksi, memperbaiki ketahanan tanaman terhadap berbagai cekaman lingkungan, serta mendukung efisiensi dalam sistem produksi pertanian modern. Selain itu, pemuliaan vegetatif mempunyai kelebihan dalam mempertahankan kestabilan karakter genetik tanaman unggul karena proses perbanyakannya berlangsung secara aseksual tanpa melalui rekombinasi genetik. Oleh karena itu, metode ini banyak digunakan dalam program pengembangan varietas unggul guna meningkatkan mutu hasil produksi, memperbaiki ketahanan tanaman terhadap berbagai cekaman lingkungan, serta mendukung efisiensi dalam sistem produksi pertanian modern.

Tujuan dari pemuliaan tanaman menurut Syukur, 2023 yaitu menghasilkan klon unggul yang memiliki kesamaan genetik dengan tanaman induknya secara cepat, seragam, dan tidak dipengaruhi oleh musim. Teknik perbanyakan vegetatif, seperti stek, cangkok, okulasi, sambung pucuk, dan kultur jaringan, digunakan untuk mempertahankan karakter unggul tetua, terutama pada tanaman buah, tanaman tahunan, serta tanaman yang sulit diperbanyak melalui biji secara generatif. Pemuliaan vegetatif memastikan stabilitas genetik dari satu generasi ke generasi berikutnya (klonal) tanpa melalui proses persilangan seksual yang dapat mengubah karakteristik unggul.

5.3 Dasar Genetik Pemuliaan Tanaman secara Vegetatif

Dasar genetik dalam pemuliaan tanaman secara vegetatif berfokus pada pemanfaatan klon, yaitu individu tanaman hasil perbanyakan yang memiliki kesamaan susunan genetik dengan tanaman induknya. Karena proses reproduksi berlangsung secara aseksual tanpa terjadinya rekombinasi genetik, karakter unggul tanaman dapat dipertahankan secara stabil dari satu generasi ke generasi berikutnya. Metode pemuliaan ini umumnya diterapkan pada tanaman yang berkembang biak secara vegetatif, baik bersifat obligat maupun fakultatif, seperti ubi kayu, kentang, tebu, serta berbagai jenis tanaman buah-buahan. Sistem perbanyakan tersebut memungkinkan produksi tanaman yang seragam dalam hal pertumbuhan, produktivitas, dan kualitas hasil. Menurut Syukur *et al.*, 2015, keturunan dari suatu tanaman tunggal atau sekelompok tanaman hasil perbanyakan vegetative dikenal sebagai klon. Klon sebagai hasil pembelahan mitosis memiliki beberapa karakteristik umum yaitu sebagai berikut :

1. Klon memiliki susunan genetik yang identik.
2. Klon memiliki susunan genetik yang heterozigot.
3. Klon diperbanyak secara vegetatif.
4. Karakteristik suatu klon stabil.

Keunggulan dari keseragaman genetik ini adalah:

1. Stabilitas sifat unggul tinggi.

2. Produksi tanaman seragam.
3. Karakter hasil lebih mudah dipertahankan.

Namun demikian, kelemahannya adalah:

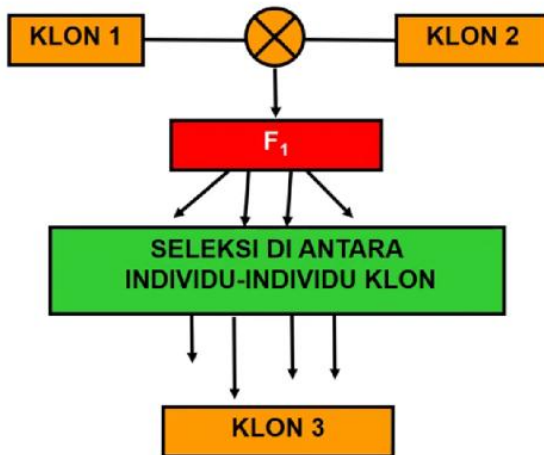
1. Keragaman genetik rendah.
2. Rentan terhadap perubahan lingkungan.
3. Penyakit dapat menyebar lebih cepat karena seluruh tanaman memiliki genotipe yang sama.

5.4 Metode Pemuliaan Tanaman

Tanaman membiak vegetative dibedakan menjadi 2 yaitu tanaman membiak vegetative obligat dan tanaman membiak vegetative fakultatif. Menurut Syukur *et al.*, 2015 bahwa seleksi pada tanaman membiak vegetative disebut seleksi klonal. Seleksi klonal adalah metode seleksi klon-klon terbaik yang diterapkan untuk meningkatkan kemampuan genetik tanaman membiak vegetative. Pada tanaman membiak vegetatif obligat, perbanyakan hanya dapat dilakukan secara aseksual karena organ reproduksi seksualnya tidak berfungsi atau tidak lengkap. Oleh sebab itu, pembentukan keragaman genetik tidak dapat dilakukan melalui hibridisasi sehingga pendekatan pemuliaan konvensional menjadi terbatas. Dalam kelompok ini, pembentukan variasi genetik umumnya dilakukan melalui mutasi alami, mutasi buatan, maupun rekayasa genetika. Contoh tanaman vegetatif obligat adalah pisang dan manggis. Pada metode pemuliaan tanaman secara vegetatif obligat memiliki strategi pemuliaan yang dilakukan yaitu seleksi dari populasi alami yang disebabkan oleh adanya mutasi alam, mutasi yaitu keragaman yang diciptakan melalui mutasi buatan sehingga dapat dilakukan seleksi, mengulang pembentukan spesies pada awalnya untuk menghasilkan konstitusi genetik yang baru, dan transformasi genetik untuk kemajuan ilmu bioteknologi yang dapat memungkinkan dalam memindahkan gen target ke genotype yang akan diperbaiki (Syukur *et al.*, 2015).

Sementara itu, tanaman membiak vegetatif fakultatif masih mampu berkembang biak secara seksual, namun perbanyakan vegetatif lebih banyak digunakan karena lebih praktis dan

mampu menghasilkan populasi yang seragam. Pada kelompok ini, pembentukan keragaman genetik dapat dilakukan melalui persilangan atau pendekatan konvensional, kemudian genotipe unggul yang diperoleh dipertahankan melalui perbanyakan vegetatif. Tanaman seperti nenas, bawang, kentang, dan ubi kayu termasuk dalam kelompok vegetatif fakultatif.



Gambar 5.2. Prinsip penerapan seleksi klonal (Syukur *et al.*, 2015)

5.5 Jenis-Jenis Teknik Pemuliaan Secara Vegetatif

Pemuliaan tanaman secara vegetatif adalah suatu metode perbanyakan tanaman yang menggunakan bagian vegetatif, seperti akar, batang, dan daun, untuk membentuk individu baru yang memiliki susunan genetik identik dengan tanaman induknya atau bersifat klon. Teknik ini berperan penting dalam program pemuliaan tanaman karena mampu menjaga dan mempertahankan sifat-sifat unggul induk secara konsisten dan stabil pada generasi selanjutnya. Perbanyakan vegetatif dibedakan menjadi dua, yaitu vegetatif alami dan vegetatif buatan.

1. Pemuliaan Vegetatif Alami

Pemuliaan vegetatif alami adalah perkembangbiakan tumbuhan secara aseksual (tanpa perkawinan/bantuan manusia) yang menghasilkan keturunan identik dengan induknya. Proses ini terjadi langsung di alam menggunakan bagian tubuh tanaman,

seperti tunas, umbi, atau akar tinggal, menghasilkan individu baru yang memiliki keunggulan genetik persis induknya.

a. Tunas

Tunas adalah calon tanaman baru yang tumbuh dari pangkal batang atau akar tanaman induk. Tunas ini lama-kelamaan akan tumbuh besar dan bisa menjadi tanaman yang mandiri. Tunas muncul secara alami, tanpa bantuan manusia. Tunas umumnya akan tumbuh pada ketiak daun, ruas-ruas batang, bagian ujung batang.

Salah satu contoh perbanyakan vegetatif alami melalui tunas dapat ditemukan pada tanaman pisang. Pada tanaman ini, tunas-tunas baru umumnya muncul di sekitar pangkal batang induk dan berkembang dari bagian bawah batang. Tunas tersebut selanjutnya dapat tumbuh menjadi individu tanaman baru yang memiliki karakter serupa dengan induknya. Selain pisang, tunas juga dapat terjadi pada tanaman bambu. Tunas bambu tumbuh dari sistem perakaran atau rimpang yang berada di dalam tanah, kemudian berkembang ke arah permukaan hingga membentuk batang baru. Setelah mencapai pertumbuhan optimal, batang bambu tersebut mampu hidup secara mandiri dan membentuk rumpun bambu yang semakin rapat dan lebat.



Pisang



Bambu

Gambar 5.3. Tumbuhan yang berkembang biak dengan tunas adalah pisang, bambu (Onny Rudianto, 2020).

b. Umbi

Perkembangbiakan tumbuhan melalui umbi dilakukan dengan memanfaatkan organ umbi sebagai bahan perbanyakan untuk menghasilkan individu tanaman baru. Umbi yang ditanam akan mengalami pertumbuhan dan berkembang menjadi tanaman baru dengan karakter yang serupa dengan induknya. Berdasarkan bentuk dan asal organ penyusunnya, perbanyakan melalui umbi dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu umbi lapis, umbi batang, dan umbi akar.

Umbi lapis merupakan bagian dari tumbuhan berupa batang yang berada di dalam tanah, dimana bentuk umbi lapis merupakan hasil dari modifikasi daun, yaitu lapisan daun berdaging yang digunakan untuk menyimpan cadangan makanan. Sedangkan bagian daun terluar mengering dan membentuk sisik yang digunakan untuk melindungi daun tebal dan berdaging disebelah dalam umbi. Di sela-sela daun tersebut akan tumbuh mata tunas yang disebut dengan siung untuk menghasilkan individu baru. Umbi batang dapat tumbuh di dalam tanah yang berfungsi sebagai penyimpan cadangan makanan. Umbi ini mempunyai mata tunas yang akan tumbuh untuk menghasilkan individu baru. Umbi akar berfungsi sebagai menyimpan cadangan makanan, dimana umbi ini berkembangbiak melalui tunas yang tumbuh dari bekas batangnya. Contoh dari umbi lapis, umbi batang, dan umbi akar yaitu bawang merah, ubi jalar, kentang, singkong, dan wortel.



Gambar 5.4. Contoh dari umbi lapis, umbi batang, dan umbi akar yaitu bawang merah, ubi jalar, singkong, dan wortel (Onny Rudianto, 2020).

c. Stolon

Geragih atau stolon merupakan batang yang tumbuh menjalar di atas permukaan tanah dan berfungsi sebagai alat perbanyakan vegetatif pada beberapa jenis tumbuhan. Bagian stolon yang bersentuhan dengan tanah akan membentuk akar dan tunas pada setiap ruasnya sehingga mampu menghasilkan individu tanaman baru. Meskipun tanaman baru tersebut masih terhubung dengan tanaman induk, pertumbuhannya tidak sepenuhnya bergantung pada induknya karena telah mampu menyerap unsur hara dan air secara mandiri. Contoh tumbuhan yang berkembangbiak dengan stolon adalah strawberry dan rumput teki.



Gambar 5.5. Contoh tumbuhan yang berkembangbiak dengan stolon adalah strawberry dan rumput teki (Onny Rudianto, 2020).

d. Rhizoma

Rhizoma atau rimpang merupakan modifikasi batang tanaman yang tumbuh secara horizontal di bawah permukaan tanah serta memiliki ruas dan buku sebagai tempat terbentuknya tunas dan akar baru. Struktur ini berperan penting sebagai sarana perkembangbiakan vegetatif alami sekaligus sebagai organ penyimpan cadangan makanan bagi tanaman. Pada setiap ruas rhizoma terdapat mata tunas yang mampu berkembang menjadi individu baru. Dengan demikian, tanaman yang memiliki rhizoma dapat

memperbanyak diri secara cepat tanpa melalui proses pembentukan biji.

Contoh tumbuhan yang berkembangbiak dengan rhizoma/akar tinggal adalah jahe, lengkuas, temulawak, kunyit.



Gambar 5.6. Contoh tumbuhan yang berkembangbiak dengan rhizome/akar tinggal adalah jahe, lengkuas, dan kunyit (Onny Rudianto, 2020).

2. Pemuliaan Vegetatif Buatan

Pemuliaan tanaman yang berkembang biak secara vegetatif buatan merupakan teknik perbaikan genetik pada tanaman yang diperbanyak melalui metode aseksual, seperti stek, cangkok, okulasi, sambung pucuk, dan kultur jaringan, dengan tujuan menghasilkan klon unggul yang seragam, cepat memasuki fase produktif, serta memiliki karakter genetik identik dengan tanaman induknya. Metode ini mampu mempertahankan tingkat heterozigositas dan sifat unggul tanaman tanpa mengalami segregasi genetik sebagaimana yang terjadi pada reproduksi generatif. Pembiakan secara vegetatif buatan di antaranya adalah cangkok, stek, okulasi, dan kultur jaringan.

a. Cangkok

Perkembangbiakan vegetatif buatan melalui teknik cangkok dilakukan dengan merangsang pertumbuhan akar pada bagian batang tanaman tertentu. Setelah akar terbentuk, bagian batang tersebut dapat dipisahkan dari tanaman induk dan ditanam sehingga berkembang menjadi individu baru. Tanaman hasil cangkok umumnya memiliki sifat yang sama

dengan tanaman induknya karena proses perbanyakan berlangsung secara aseksual. Keunggulan metode ini terletak pada proses pembentukan tanaman baru yang relatif cepat, sedangkan kelemahannya adalah sistem perakaran yang dihasilkan cenderung kurang kuat dibandingkan tanaman yang berasal dari biji.



Gambar 5.7. Perbanyakan vegetatif buatan dengan cara mencangkok (Fitriani, Nur Syah, 2017).

b. Stek

Stek merupakan metode perbanyakan tanaman yang dilakukan dengan memanfaatkan bagian tertentu dari tubuh tanaman untuk ditanam dan menghasilkan individu baru. Bagian tanaman yang digunakan dalam teknik stek dapat berupa batang, daun, akar, maupun tangkai daun. Namun, tidak semua jenis tanaman memiliki kemampuan untuk diperbanyak melalui metode ini. Stek daun umumnya diterapkan pada tanaman cocor bebek dan begonia, sedangkan stek akar dapat dilakukan pada tanaman sukun. Selain itu, stek batang banyak digunakan pada tanaman singkong, sementara stek tangkai diterapkan pada tanaman mawar. Beberapa contoh tanaman yang umum diperbanyak melalui teknik stek antara lain mawar.



Gambar 5.8. Perbanyakan vegetatif buatan dengan cara stek pada bunga mawar (Onny Rudianto, 2020).

c. Okulasi

Okulasi atau penempelan merupakan teknik perbanyakan tanaman yang dilakukan dengan menempelkan tunas muda dari suatu tanaman pada batang atau cabang tanaman lain yang masih berkerabat dekat. Teknik ini bertujuan mengombinasikan sifat unggul dari dua tanaman berbeda sehingga diperoleh tanaman baru dengan karakter yang lebih baik dibandingkan tanaman induknya. Metode okulasi banyak diterapkan pada tanaman buah karena mampu meningkatkan kualitas hasil, ketahanan tanaman, serta produktivitas. Beberapa contoh tanaman yang umum diperbanyak melalui teknik okulasi antara lain jeruk, rambutan, dan durian.



Gambar 5.9. Perbanyakan vegetatif buatan dengan cara okulasi (Onny Rudianto, 2020).

d. Kultur Jaringan

Kultur jaringan merupakan teknik perbanyakan tanaman yang dilakukan dengan menumbuhkan bagian kecil jaringan tanaman secara *in vitro* pada media steril hingga berkembang menjadi tanaman utuh dalam jumlah besar. Teknik ini didasarkan pada sifat totipotensi sel tumbuhan, yaitu kemampuan setiap sel tanaman untuk membelah dan berkembang menjadi individu lengkap apabila berada pada kondisi lingkungan yang sesuai. Dalam perkembangannya, teknik kultur jaringan telah banyak dimanfaatkan untuk mendukung produksi tanaman secara massal melalui mikropopagasi atau perbanyakan klonal pada berbagai jenis tanaman. Melalui metode ini, sejumlah kecil jaringan tanaman mampu menghasilkan ratusan hingga ribuan individu tanaman baru secara berkelanjutan dalam waktu relatif singkat.



Gambar 5.10. Perbanyakan vegetatif buatan dengan cara kultur jaringan (Anjali Singh, 2024).

5.6 Peranan Pemuliaan Vegetatif dalam Pertanian Modern

Pemuliaan vegetatif memiliki peran penting dalam mendukung ketahanan pangan dan pengembangan pertanian modern, antara lain:

1. Penyediaan bibit unggul berkualitas tinggi.
2. Pelestarian plasma nutfah tanaman lokal.
3. Produksi tanaman bebas penyakit.
4. Pengembangan tanaman hortikultura dan perkebunan.

5. Mendukung industri benih dan agribisnis.

Di Papua dan Papua Barat, teknik vegetatif sangat potensial diterapkan pada tanaman lokal seperti ubi jalar, sagu, pisang, keladi, dan tanaman hortikultura tropis karena mampu mempertahankan adaptasi lokal tanaman terhadap kondisi lingkungan setempat.

DAFTAR PUSTAKA

- Anjali Singh. 2024. *Which Parts of the Plant Are Best for Tissue Culture and How Should They Be Sterilized?*. http://plantcelltechnology.com/blogs/blog/which-parts-of-the-plant-to-use-for-induction-and-how-to-sterilize-them?srsltid=AfmBOoov6vxH_8WyOoV3pYnoBA5dblecInv8T47wqxL4w2XH0taHXjey. Diakses pada tanggal 5 Mei 2026.
- Cahyadi, R. A. 2024. Pengembangan Varietas Padi Tahan Kekeringan Melalui Teknik Pemuliaan Tanaman. *Tugas Mahasiswa Fakultas Pertanian*, 1(1).
- Firmansyah, F., Hamzah, P., Indriatama, W., & Ismayanti, R. 2023. *Pengantar Pemuliaan Tanaman*. Haura Utama.
- IPB University. 2023. *M. Syukur IPB Channel: Pemuliaan Tanaman dan Perbanyak Vegetatif*. YouTube. Diakses pada 6 Mei 2026, dari M. Syukur IPB Channel.
- Nur Syah Fitriani. 2024. *Makalah Pemuliaan Tanaman (Perkembangbiakan Tanaman Secara Vegetatif)*. https://docs.google.com/document/d/1O5Ks-2QRVLfZ1NuyL0bl_x0bIHMkXTwuyXiiZYfhxp4/mobilebasic. Diakses pada tanggal 5 Mei 2026.
- Onny Rudianto. 2020. *Perkembangbiakan Tumbuhan Secara Vegetatif dan Generatif*. <https://onnyrudianto.wordpress.com/2020/10/03/perkembangbiakan-tumbuhan>. Diakses pada tanggal 5 Mei 2026.
- Rahmah R. 8 *Vegetatif Alami pada Tumbuhan dan Faktor yang Mempengaruhi*. <https://www.gramedia.com/literasi/vegetatif-alami-pada-tumbuhan/>. Diakses pada tanggal 5 Mei 2026.
- Selvia, I. N. 2021. *Diktat Pemuliaan Tanaman*. Program Studi Biologi. Gresik: Universitas Muhammadiyah Gresik.
- Syukur, M., Sriani Sujiprihati, Rahmi Yunianti. 2015. *Teknik Pemuliaan Tanaman (Edisi Revisi)*. Penerbit Penebar Swadaya.

BAB 6

SELEKSI DAN PENGUJIAN VARIETAS

6.1 Pendahuluan

Seleksi dan pengujian varietas merupakan tahap penentu dalam rantai pemuliaan tanaman menuju produksi benih unggul. Seleksi bertujuan mengidentifikasi genotipe terbaik dari populasi segregan atau koleksi introduksi, sedangkan pengujian memverifikasi keunggulan, stabilitas, keunikan, dan adaptasi varietas di berbagai lingkungan. Di Indonesia, proses ini diatur ketat untuk menjamin benih yang dilepas aman, produktif, dan berkontribusi pada ketahanan pangan nasional.

Proses seleksi modern mengintegrasikan pendekatan konvensional dengan teknologi molekuler seperti Marker-Assisted Selection (MAS) dan genomic selection, yang memungkinkan identifikasi sifat unggul lebih cepat, akurat, dan efisien, bahkan tanpa menunggu ekspresi fenotipe penuh. Sementara itu, pengujian mengikuti standar DUS (Distinctness, Uniformity, Stability) serta uji multilokasi untuk menangkap interaksi genotipe $\times$ lingkungan ($G \times E$). Pendekatan ini semakin penting di tengah perubahan iklim, tekanan biotik (hama dan penyakit), serta kebutuhan varietas yang adaptif terhadap kondisi marginal seperti lahan tadah hujan atau tanah salin.

Regulasi utama mencakup Peraturan Menteri Pertanian (Permentan) No. 38 Tahun 2019 tentang Pelepasan Varietas Tanaman yang telah mengalami beberapa perubahan (termasuk Permentan No. 23 Tahun 2023 dan Permentan No. 05 Tahun 2026 sebagai perubahan kedua) serta Permentan No. 29 Tahun 2021 tentang Penamaan dan Pendaftaran Varietas Tanaman (dengan perubahan melalui Permentan No. 17 Tahun 2025). Regulasi ini mengatur prosedur pengujian keunggulan, uji adaptasi/observasi, penilaian oleh Tim Penilai Varietas, hingga pelepasan resmi oleh Menteri Pertanian, termasuk ketentuan

khusus untuk varietas hasil rekayasa genetik (PRG) dan genome editing.

Tujuan bab ini adalah menjelaskan prinsip, metode, prosedur, tantangan, serta inovasi terkini dalam seleksi dan pengujian varietas di Indonesia. Pembahasan mencakup penerapan teknologi frontier seperti seleksi genomik dan genome editing untuk mempercepat siklus pemuliaan, respons terhadap dinamika iklim dan preferensi konsumen, serta peran lembaga seperti Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Badan Perakitan dan Modernisasi Pertanian (BRMP), serta Pusat Perlindungan Varietas Tanaman dan Perizinan Pertanian (PVTTP) dalam mendukung inovasi berkelanjutan. Dengan demikian, bab ini diharapkan memberikan landasan ilmiah dan praktis bagi pemulia, peneliti, serta pemangku kepentingan dalam menghasilkan varietas unggul yang mendukung kemandirian dan ketahanan pangan nasional di masa depan.

6.2 Prinsip Dasar Seleksi Varietas

Prinsip dasar seleksi varietas tanaman mencakup pendekatan sistematis untuk mengidentifikasi dan memajukan genotipe unggul dari populasi awal hingga galur stabil yang siap dilepas sebagai varietas. Seleksi dilakukan secara bertahap dari generasi awal (F_2 – F_6) atau lebih lanjut pada tanaman autogam) hingga galur stabil. Prinsip utama meliputi:

1. **Efisiensi:** Memaksimalkan *genetic gain* (kenaikan genetik) per siklus pemuliaan melalui pemilihan intensitas yang optimal, pengurangan biaya, dan pemanfaatan variasi genetik maksimal.
2. **Akurasi:** Mengurangi kesalahan seleksi (*selection error*) yang disebabkan oleh pengaruh lingkungan, dengan memisahkan komponen genetik dari fenotip melalui desain percobaan yang baik (misalnya replicated trials) atau teknologi molekuler.
3. **Kecepatan:** Memperpendek waktu pelepasan varietas (ideal <8–10 tahun di Indonesia) dengan mengintegrasikan generasi off-season, greenhouse screening, dan teknologi modern untuk mempercepat siklus.

Metode seleksi konvensional (masih banyak digunakan di Indonesia, terutama untuk komoditas utama seperti padi, jagung, dan kedelai):

1. **Seleksi massa** — Eliminasi tanaman buruk secara massal pada tahap awal (F_2 atau F_3) berdasarkan fenotip sederhana seperti vigor, tinggi tanaman, atau ketahanan awal. Cocok untuk sifat yang mudah diamati dan populasi besar, tetapi kurang akurat untuk sifat kuantitatif.
2. **Seleksi pedigree** — Pelacakan silsilah individu secara rinci dari F_2 hingga galur murni, dengan seleksi individu dan baris pada setiap generasi. Sangat cocok untuk tanaman autogam seperti padi, memungkinkan pemantauan keturunan dan retensi gen unggul.
3. **Seleksi bulks** — Penundaan seleksi intensif hingga generasi F_4 – F_6 , di mana populasi dibudidayakan secara campur (*bulk*) untuk memungkinkan rekombinasi alami dan seleksi alamiah sebelum seleksi individu. Efektif untuk menghemat tenaga pada tahap awal.
4. **Seleksi tunggal (*single plant selection*)** — Pemilihan tanaman individu terbaik berdasarkan performa superior, sering dikombinasikan dengan metode lain untuk tahap akhir.

Metode seleksi modern (semakin diadopsi di Indonesia melalui BRIN, Balitbangtan, dan lembaga pemuliaan):

1. **Marker-Assisted Selection (MAS)** — Menggunakan penanda DNA (seperti SSR, SNP) yang terkait dengan QTL (*Quantitative Trait Loci*) untuk seleksi dini pada tahap seedling atau bahkan biji, tanpa menunggu ekspresi fenotipe penuh. MAS mempercepat proses 2–3 kali lipat, efektif untuk sifat kompleks seperti ketahanan biotik/abiotik, dan mengurangi linkage drag. *Contoh aplikasi di Indonesia:* Pengembangan padi tahan wereng coklat (*brown planthopper*/BPH) melalui introgressi gen dari donor seperti PTB-33 menggunakan marker RM8213 dan RM5953 pada populasi segregan (misalnya pada program IP-1 dan PP-11). Selain itu, pyramiding gen ketahanan blas (Pi genes) dan

hawar daun bakteri (Xa genes seperti xa5, xa7, Xa21) telah berhasil pada varietas seperti Angke (membawa xa5), Conde (xa7), serta perbaikan varietas Ciherang dan Inpari series melalui introgressi gen dari *Oryza rufipogon* atau donor lain. Varietas Inpari 30 Ciherang Sub1 juga merupakan hasil integrasi MAS untuk ketahanan genangan (Sub1) dengan background unggul.

2. **Genomic selection (GS)** — Prediksi nilai pemuliaan (*breeding value*) menggunakan ribuan hingga jutaan marker genome-wide (seperti SNP dari genotyping-by-sequencing) dan model statistik (misalnya GBLUP, Bayesian methods). GS memungkinkan seleksi pada tahap awal tanpa uji fenotipik ekstensif, sangat berguna untuk sifat poligenik dan tanaman perennial (seperti kelapa sawit). Di Indonesia, GS mulai diadopsi pada kelapa sawit (efisiensi biaya 26–65% dan percepatan siklus hingga 35%), serta diskusi percepatan adopsi GS dan genome editing dalam KorteK Pelepasan Varietas 2025 oleh PVTTP. Aplikasi pada padi dan tanaman pangan lainnya masih berkembang, didukung BRIN melalui data genomik.

Integrasi metode konvensional dan modern menjadi kunci sukses di Indonesia, di mana MAS dan GS membantu mengatasi tantangan seperti perubahan iklim, serangan hama baru, dan kebutuhan varietas adaptif lahan marginal. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan efisiensi dan akurasi, tetapi juga mendukung ketahanan pangan nasional melalui pelepasan varietas unggul yang lebih cepat dan tepat sasaran.

6.3 Metode Pengujian Varietas: Uji Keunggulan dan Kebenaran

Pengujian varietas di Indonesia merupakan proses verifikasi ilmiah yang ketat untuk memastikan varietas yang dilepas memenuhi kriteria keunggulan, kebenaran (DUS: *Distinctness, Uniformity, Stability*), serta adaptasi yang baik sesuai regulasi nasional. Proses ini diatur terutama oleh Peraturan Menteri Pertanian (Permentan) No. 38 Tahun 2019 tentang

Pelepasan Varietas Tanaman (sebagaimana telah diubah dengan Permentan No. 23 Tahun 2023 dan Permentan No. 05 Tahun 2026 sebagai perubahan kedua), serta pedoman teknis terkait dari Pusat Perlindungan Varietas Tanaman dan Perizinan Pertanian (PVTTP/PPVTTP).

Pengujian varietas dibedakan menjadi:

6.3.1 Uji Keunggulan Varietas

Uji ini bertujuan membuktikan bahwa calon varietas memiliki performa superior dibandingkan varietas pembanding (*check variety*) dalam hal hasil, ketahanan, kualitas, dan adaptasi.

1. Dilakukan melalui **uji adaptasi** (untuk tanaman semusim seperti padi, jagung, kedelai) atau **uji observasi** (untuk tanaman tahunan/perennial seperti kelapa sawit, mangga, atau hortikultura lama beredar).
2. **Desain percobaan:** Rancangan Acak Lengkap (RAL) atau Rancangan Acak Kelompok (RAK)/Baris-Blok dengan replikasi minimal 3–4 kali, dilaksanakan di 3–6 lokasi multilokasi yang mewakili agroekosistem beragam (misalnya dataran rendah, menengah, tinggi; lahan irigasi, tadah hujan, marginal).
3. **Karakter yang diamati:**
 - a. Hasil (yield potensial, hasil rata-rata/ha).
 - b. Umur panen (hari ke berbunga, hari ke masak fisiologis).
 - c. Morfologi tanaman (tinggi tanaman, jumlah anakan/produktif, bentuk daun/buah).
 - d. Ketahanan biotik (hama seperti wereng, penggerek batang; penyakit seperti blas, hawar) dan abiotik (kekeringan, genangan, salinitas).
 - e. Kualitas (kadar gula/brix, vitamin, kadar amilosa, warna, tekstur, umur simpan).
4. Data dikumpul secara periodik sesuai fase pertumbuhan, dianalisis statistik (ANOVA, uji beda nyata DMRT/LSD), dan dibandingkan dengan varietas pembanding nasional/unggul setempat.
5. Hasil uji keunggulan digunakan untuk menyusun **deskripsi sementara varietas** yang menjadi dasar verifikasi lebih lanjut.

6.3.2 Uji Kebenaran Varietas (BUSS: Baru, Unik, Seragam, Stabil)

Uji ini memverifikasi kebenaran deskripsi varietas sesuai standar DUS, sebagaimana diatur dalam Keputusan Menteri Pertanian No. 12/Kpts/SR.130/D/8/2019 tentang Teknis Penyusunan Deskripsi dan Pengujian Kebenaran Varietas Tanaman Hortikultura (untuk hortikultura; prinsip serupa diterapkan pada tanaman pangan/perkebunan melalui pedoman PPVTTP).

1. Dilakukan oleh lembaga terakreditasi atau yang ditunjuk PPVTTP (misalnya Balai Penelitian Tanaman, UPTD BPSBTPH, atau lembaga pemulia resmi).
2. Parameter utama:
 - a. *Distinctness* (Keunikan): Varietas harus berbeda secara jelas dari varietas pembanding terdekat dalam setidaknya satu karakter kualitatif atau kuantitatif yang signifikan (misalnya warna bunga, bentuk buah, ketahanan spesifik).
 - b. *Uniformity* (Keseragaman): Tanaman dalam plot harus seragam (variasi intra-varietas minimal, diukur dengan standar statistik seperti koefisien variasi tertentu).
 - c. *Stability* (Stabilitas): Karakteristik konsisten antar generasi (generasi awal hingga akhir) dan antar lokasi/ulangan, tanpa perubahan signifikan akibat lingkungan.
3. Pengujian melibatkan pengamatan visual, pengukuran, dan kadang analisis molekuler (untuk konfirmasi keunikan pada varietas modern). Deskripsi varietas disusun berdasarkan karakter kualitatif (misalnya bentuk daun: bulat, lonjong) dan kuantitatif (misalnya panjang buah: 10–15 cm).
4. Untuk hortikultura, pedoman mencakup deskripsi baku per komoditas (misalnya mangga, cabai, tomat) dengan parameter spesifik seperti warna kulit buah, tekstur daging, kadar gula ($^{\circ}\text{Brix}$), dan ketahanan penyimpanan.

6.3.3 Uji Multilokasi dan Analisis Interaksi Genotipe × Lingkungan (G×E)

Uji multilokasi esensial untuk mengevaluasi stabilitas performa dan adaptasi luas, mengingat Indonesia memiliki keragaman agroekologi tinggi.

1. Dilaksanakan di minimal 3–6 lokasi representatif selama 2–3 musim tanam.
2. **Analisis G×E** menggunakan metode statistik canggih untuk memisahkan efek utama genotipe (G), lingkungan (E), dan interaksi (G×E):
 - a. AMMI (*Additive Main effects and Multiplicative Interaction*): Memecah variasi G×E menjadi komponen principal (IPCA/PC), dengan biplot AMMI1 (rata-rata hasil vs. skor IPCA1) untuk identifikasi genotipe stabil (skor IPCA rendah) dan adaptif.
 - b. GGE biplot (*Genotype + Genotype × Environment*): Visualisasi yang lebih komprehensif, menunjukkan "which-won-where" (genotipe terbaik per mega-lingkungan), stabilitas (panah panjang ke pusat), dan *ideal genotype* (titik tertinggi di sektor positif).
 - c. Pendekatan nonparametrik seperti *Huehn's nonparametric stability* (berdasarkan ranking) atau regresi Eberhart-Russell (deviasi dari regresi linier).
3. Contoh aplikasi di Indonesia:
 - a. Pada padi gogo, analisis AMMI pada 7 lokasi menunjukkan genotipe dengan skor IPCA rendah lebih stabil terhadap variasi tanah dan curah hujan.
 - b. Pada jagung manis hibrida, GGE biplot mengidentifikasi hibrida stabil seperti Padjadjaran G10 di berbagai lingkungan, sementara AMMI biplot menyoroti genotipe toleran salinitas atau kekeringan.
 - c. Pada kedelai, AMMI PC1 menyumbang >60% variasi G×E, membantu seleksi galur stabil seperti G100H/SHRW-60-38 dengan potensi hasil tinggi dan deviasi rendah.

Integrasi uji keunggulan, kebenaran, dan analisis G×E memastikan varietas yang dilepas tidak hanya unggul secara nasional tetapi juga adaptif secara regional, mendukung ketahanan pangan dan pertanian berkelanjutan di tengah perubahan iklim. Hasil pengujian diajukan ke Tim Penilai Varietas (TPV) untuk rekomendasi pelepasan oleh Menteri Pertanian

6.4 Prosedur Pelepasan Varietas di Indonesia (Terkini 2025–2026)

Prosedur pelepasan varietas tanaman di Indonesia telah mengalami transformasi signifikan menuju digitalisasi penuh, sesuai dengan Peraturan Menteri Pertanian (Permentan) No. 38 Tahun 2019 tentang Pelepasan Varietas Tanaman sebagaimana telah diubah pertama kali dengan Permentan No. 23 Tahun 2023 dan kedua dengan Permentan No. 05 Tahun 2026 (ditetapkan Februari 2026) serta didukung Peraturan Pemerintah (PP) No. 28 Tahun 2025 tentang Penyelenggaraan Perizinan Berusaha Berbasis Risiko. Perubahan ini bertujuan meningkatkan efektivitas, efisiensi, transparansi, dan akuntabilitas pelayanan, termasuk penegasan peran Kepala Badan (Badan Riset dan Inovasi Nasional/BRIN atau unit terkait) atas nama Menteri, serta penguatan Tim Penilai Varietas Produk Rekayasa Genetik (TPV-PRG).

Proses pelepasan kini terintegrasi dengan sistem Online Single Submission (OSS-RBA) untuk perizinan berbasis risiko, dan aplikasi khusus Pusat Perlindungan Varietas Tanaman dan Perizinan Pertanian (PVTTP), seperti SIPERINTIS (Sistem Informasi Pelepasan Varietas Tanaman) atau SPESSINTIS, yang wajib digunakan sejak November 2025 untuk seluruh pengajuan.

Tahapan prosedur pelepasan varietas secara bertahap adalah sebagai berikut:

- 1. Pengajuan Rencana Pengujian dan Persiapan Data**
Pemulia atau pemohon (individu, lembaga penelitian, perusahaan benih) mengajukan rencana pengujian (uji keunggulan, uji kebenaran/DUS, uji multilokasi) ke **Tim Penilai Varietas (TPV)** atau langsung ke **PVTTP** melalui

aplikasi digital. Dokumen pendukung meliputi deskripsi varietas sementara, bukti asal-usul genotipe, dan komitmen pengujian sesuai standar. Untuk varietas introduksi atau lokal, disertakan bukti adaptasi minimal (misalnya 5 tahun untuk varietas lokal sesuai update regulasi).

2. Pelaksanaan Pengujian dengan Supervisi Pengujian dilaksanakan di lokasi multilokasi oleh lembaga terakreditasi atau ditunjuk (misalnya Balitbangtan, BRIN, atau UPTD BPSBTPH). Supervisi dilakukan oleh PVTTP atau TPV untuk memastikan kepatuhan terhadap protokol pengujian. Hasil dicatat dalam laporan akhir pengujian, termasuk data keunggulan (yield superior $\geq 10-15\%$ dibanding *check variety*), BUSS (Baru, Unik, Seragam, Stabil), dan analisis $G \times E$.

3. Pengajuan Permohonan Pelepasan secara Digital Pemohon mengajukan permohonan pelepasan secara wajib melalui sistem **OSS** (oss.go.id) terintegrasi dengan aplikasi PVTTP (SIPERINTIS/SPESSINTIS) sejak 4 November 2025. Pengajuan meliputi:

- a. Upload dokumen lengkap (laporan pengujian akhir, deskripsi varietas, bukti keunggulan, sertifikat kebenaran dari lembaga terakreditasi).
- b. Komitmen pemenuhan persyaratan (untuk PB-UMKU nontransaksional).
- c. Pembayaran PNBPN jika diperlukan. Proses ini sepenuhnya elektronik, menggantikan pengajuan manual untuk mempercepat verifikasi.

4. Penilaian oleh Tim Penilai Varietas (TPV atau TPV-PRG) PVTTP memverifikasi kelengkapan dokumen, kemudian meneruskan ke **TPV** (Tim Penilai Varietas) untuk evaluasi komprehensif:

- a. Keunggulan agronomis dan ekonomi.
- b. Pemenuhan kriteria BUSS/DUS.
- c. Potensi produksi benih (kemurnian, vigor, potensi multiplikas).
- d. Risiko lingkungan dan keamanan (khususnya untuk varietas modern). Untuk **varietas Produk Rekayasa Genetik (PRG)** atau genome editing, penilaian tambahan

oleh **TPV-PRG**, termasuk uji keunggulan khusus, uji mutu hasil panen, uji ketahanan hama-penyakit, dan asesmen risiko lingkungan/biosafety sesuai regulasi terkait. TPV memberikan rekomendasi tertulis kepada Kepala Badan/Menteri.

5. **Pelepasan Resmi dan Pendaftaran Lanjutan** Pelepasan dilakukan oleh **Menteri Pertanian** (dalam pelaksanaannya oleh Kepala Badan atas nama Menteri) melalui **Keputusan Menteri** (SK Pelepasan Varietas). Setelah SK diterbitkan:
- a. Varietas didaftarkan nama resminya (sesuai **Permentan No. 29 Tahun 2021. Permentan No. 17 Tahun 2025** tentang Penamaan dan Pendaftaran).
 - b. Pendaftaran ke sistem PVTTP untuk sertifikasi benih penjenis (breeder seed) dan produksi benih bersertifikat.
 - c. Publikasi resmi di Berita Negara atau situs PVTTP, diikuti peluncuran varietas oleh pemulia/pemohon.

Untuk varietas **PRG** (termasuk genome editing), tahapan tambahan mencakup:

1. Uji keunggulan khusus di bawah pengawasan ketat.
2. Uji mutu hasil (kandungan nutrisi, residu, toksisitas).
3. Uji ketahanan hama-penyakit dan dampak lingkungan.
4. Persetujuan biosafety dari Komisi Keamanan Hayati (jika diperlukan).

Proses keseluruhan kini lebih cepat (target <12–18 bulan pasca-pengujian berkat digitalisasi), transparan, dan terintegrasi OSS-RBA, mendukung inovasi pemuliaan nasional serta ketahanan pangan. Pemohon disarankan memantau update melalui situs resmi PVTTP (ppvtp.setjen.pertanian.go.id) atau aplikasi SIPERINTIS untuk panduan simulasi pengajuan.

6.5 Contoh Kasus Seleksi dan Pengujian di Komoditas Utama

6.5.1 Padi

1. MAS untuk introgressi gen Sub1 (tahan genangan) dan Xa21 (tahan BLB).
2. Uji multilokasi di Jawa, Sumatera, Sulawesi menunjukkan stabilitas tinggi pada varietas Inpari series.

6.5.2 Jagung

1. Seleksi hibrida menggunakan marker untuk toleransi kekeringan (ZmDREB2A).
2. Uji multilokasi di Jawa Timur mengevaluasi G×E pada 15 hibrida.

6.5.3 Cabai dan Hortikultura

1. Pengujian kebenaran menggunakan deskripsi baku (bentuk buah, warna, kadar gula).
2. Uji observasi untuk varietas lokal tahan penyakit antraknosa.

6.6 Tantangan dan Inovasi Terkini

Seleksi dan pengujian varietas tanaman merupakan proses krusial dalam pemuliaan untuk menghasilkan varietas unggul yang adaptif terhadap perubahan iklim, tahan hama/penyakit, dan produktif tinggi. Di Indonesia, proses ini diatur oleh PPVTPP (Pusat Perlindungan Varietas Tanaman dan Perizinan Pertanian) melalui pelepasan varietas sesuai regulasi seperti Peraturan Menteri Pertanian dan PP Nomor 28 Tahun 2025 tentang Perizinan Berbasis Risiko. Tantangan utama muncul dari perubahan iklim, degradasi lahan, dan kebutuhan swasembada pangan, sementara inovasi seperti teknologi genomik mempercepat proses. (Sumber: PPVTPP Laporan Tahunan 2023 & KorteK Pelepasan Varietas 2025; BRIN berita 2024–2025).

Beberapa tantangan utama yang dihadapi saat ini (terutama di Indonesia dan global):

1. **Perubahan Iklim dan Cekaman Abiotik/Biotik:** Kekeringan, banjir, suhu ekstrem, serta serangan hama/penyakit yang semakin cepat berkembang (misalnya

wereng coklat pada padi atau layu bakteri pada kentang). Ini menyebabkan varietas lama kurang stabil, dan pengujian lapang memakan waktu lama (hingga 10–15 tahun). Di Indonesia, intensitas cuaca ekstrem menghambat pengujian stabilitas hasil. (Sumber: BRIN pengembangan cabai tahan kekeringan 2024; Resensi Buku Deskripsi Varietas Padi 2025; PPVTPP 2023).

2. **Proses Pengujian dan Pelepasan yang Lambat serta Regulasi:** Pengujian kebenaran varietas (deskripsi, DUS test) dan pelepasan memerlukan data multi-lokasi, tapi sering terkendala biaya tinggi, kurangnya pemahaman pemohon, dan sistem yang belum sepenuhnya digital (meski mulai wajib online via OSS-RBA sejak November 2025). Serangan siber masa lalu dan transisi regulasi (PP 28/2025) menambah kompleksitas. (Sumber: Laporan Tahunan PPVTPP 2023; Penguatan Tata Kelola Pelepasan Varietas 2025).
3. **Keanekaragaman Genetik yang Menurun dan Akses Teknologi:** Indonesia kehilangan hingga 75% keanekaragaman sumber daya genetik tanaman pertanian akibat pemanfaatan berlebih varietas tertentu dan minim konservasi. Tantangan lain: biaya pengujian substantif tinggi, serta kesulitan adopsi teknologi modern oleh pemulia kecil. Global: kompleksitas paten pada NGTs (New Genomic Techniques) berisiko monopoli dan infringement. (Sumber: BRIN & UGM 2018–2025 update; ALLEA Statement 2024 on NGTs IP).
4. **Sumber Daya dan Kapasitas:** Kurangnya pemulia kompeten, infrastruktur pengujian, dan integrasi data fenotip-genotip. Di Indonesia, fokus pada swasembada mendorong inovasi, tapi tantangan global seperti patent stacking menghambat difusi teknologi. (Sumber: BRIN Pemuliaan Tanaman 2025; Genomic Selection Challenges 2024).

Inovasi modern mempercepat proses dari 10–15 tahun menjadi lebih singkat, dengan akurasi tinggi:

1. **Seleksi Berbasis Marka Molekuler dan *Genomic Selection* (GS):** MAS (*Marker-Assisted Selection*) dan GS menggunakan marker DNA untuk seleksi dini tanpa menunggu fenotip dewasa. Di Indonesia, GS efisien biaya 26–65% dan mempercepat siklus hingga 35% (misalnya pada kelapa sawit dan padi). BRIN menerapkan seleksi multi-indeks untuk cabai tahan kekeringan dan mutagenesis in vitro untuk kentang tahan layu bakteri. Global: GS dipadukan AI untuk prediksi akurat. (Sumber: BRIN 2024–2025; Pendekatan Seleksi Genomik Kelapa Sawit 2024; *Genomic Selection* Wiley 2025).
2. ***Genome Editing* (CRISPR/Cas9 dan NGTs):** Teknologi penyuntingan gen untuk tahan penyakit, non-browning (misalnya pisang di Filipina), atau trait spesifik tanpa sisipan asing. Di Indonesia, dieksplorasi untuk kedelai unggul dan varietas tahan iklim. Global: Persetujuan wheat tahan penyakit di China 2024; integrasi dengan speed breeding untuk multiple siklus cepat. (Sumber: CRISPR in Agriculture 2024 Review; ISAAA 2025; BRIN Eksplorasi Bioteknologi Kedelai 2025).
3. ***High-Throughput Phenotyping* dan Integrasi Digital:** Penggunaan AI, drone, dan sensor untuk pengujian fenotip cepat. Di Eropa (InnoVar project), fokus pada resilience dan sustainability. Di Indonesia, transformasi layanan PPVTPP 2025 termasuk aplikasi online untuk pelepasan varietas dan Kortek diskusi GS/GE. (Sumber: CORDIS Innovations in Plant Variety Testing 2025; PPVTPP Transformasi Layanan 2025).
4. **Pendekatan Terintegrasi:** Kombinasi GS + CRISPR + speed breeding untuk varietas adaptif iklim. BRIN melepas varietas kakao/kentang unggul; PPVTPP dorong co-breeder nasional untuk inovasi tahan cekaman. (Sumber: BRIN Percepatan Industrialisasi Benih Kakao 2025; PPVTPP Wujudkan Swasembada 2025).

6.7 Kesimpulan

Seleksi dan pengujian varietas merupakan fondasi produksi benih unggul di Indonesia. Dengan menggabungkan metode konvensional, MAS, uji multilokasi, serta regulasi terkini PPVTPP, proses ini dapat menghasilkan varietas adaptif, produktif, dan berkelanjutan. Keberhasilan tahap ini menentukan ketersediaan benih berkualitas bagi petani dan pencapaian swasembada pangan.

DAFTAR PUSTAKA

- BRIN. 2024–2025. Berbagai berita pengembangan varietas (cabai, kentang, kedelai). <https://www.brin.go.id>. PPVTPP. 2023–2025.
- 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. *Jurnal Agrikultura*, 27(1). <https://doi.org/10.24198/agrikultura.v27i1.8471>.
- Direktorat Perbenihan Hortikultura, Kementerian Pertanian. 2019. Pedoman Pendaftaran dan Deskripsi Varietas Hortikultura. Jakarta: Kementerian Pertanian Republik Indonesia.
- Huehn, M. 1990. Nonparametric measures of phenotypic stability in crop trials. *Euphytica*, 47, 195–201. <https://doi.org/10.1007/BF00024241>.
- Keputusan Menteri Pertanian Republik Indonesia. 2019. Teknis Penyusunan Deskripsi dan Pengujian Kebenaran Varietas Tanaman Hortikultura. Jakarta: Kementerian Pertanian Republik Indonesia. Nomor 12/Kpts/SR.130/D/8/2019.
- Molecular breakthroughs in modern plant breeding. ScienceDirect. Innovative Genomics Institute. 2024. CRISPR in Agriculture
- Peraturan Menteri Pertanian Republik Indonesia. 2019. Pelepasan Varietas Tanaman. Jakarta: Kementerian Pertanian Republik Indonesia. Nomor 38 Tahun 2019.
- Peraturan Menteri Pertanian Republik Indonesia. 2021. Penamaan dan Pendaftaran Varietas Tanaman. Jakarta: Kementerian Pertanian Republik Indonesia. Nomor 29 Tahun 2021.
- Pusat Perlindungan Varietas Tanaman dan Perizinan Pertanian (PPVTPP). 2025. Prosedur Pelepasan Varietas PRG. Jakarta: Kementerian Pertanian Republik Indonesia. <https://ppvtp.psetjen.pertanian.go.id>.
- Pusat Perlindungan Varietas Tanaman dan Perizinan Pertanian (PPVTPP). 2025. Transformasi Layanan dan Teknologi Pemuliaan – Kortek Pelepasan Varietas 2025. Jakarta: Kementerian Pertanian Republik Indonesia.
- Review. <https://innovativegenomics.org>. ISAAA. 2025. Key Developments in New Plant Breeding Technologies.

Sitairesmi, T. dkk. Analisis Stabilitas Hasil Gabah Galur-galur Padi melalui Pendekatan Parametrik dan Nonparametrik. Jakarta: Repository Pertanian.go.id, Kementerian Pertanian Republik Indonesia.

Tasma, I.M. dkk. Seleksi dengan Bantuan Marka DNA untuk Perakitan Tanaman Pertanian Unggul. Jakarta: Repository Pertanian.go.id, Kementerian Pertanian Republik Indonesia.

BAB 7

TATACARA PELEPASAN VARIETAS UNGGUL

7.1 Pendahuluan

Benih adalah bagian penting dalam sistem produksi pertanian yang dapat menentukan keberhasilan suatu budidaya tanaman. Kualitas benih tidak hanya berpengaruh pada tingkat pertumbuhan dan hasil produksi, namun juga menentukan kemampuan tanaman dalam beradaptasi pada kondisi lingkungan serta ketahanan terhadap hama penyakit. Benih adalah produk pasca panen, yang penyediannya dilakukan dengan proses penyisaan hasil panen terbaik untuk kemudian ditanam di masa mendatang. Menurut pakar pertanian, proses penyediaan benih yang dilakukan dengan cara tradisional belum mampu memberikan jaminan kualitas benih yang konsisten. Kondisi ini dikarenakan perencanaan proses produksi benih tidak dilakukan sejak awal, melainkan baru diperhatikan setelah kegiatan panen selesai. Meskipun demikian proses pendekatan tradisional tersebut memiliki nilai positif, terutama dalam menjaga keberagaman varietas yang berkembang di kalangan petani, sehingga kekayaan genetik tanaman tetap terpelihara. Di sisi lain, dalam pertanian modern yang didukung oleh perkembangan industri, benih diperlakukan sebagai hasil inovasi teknologi yang direncanakan secara matang dan terstruktur sejak awal proses produksi. Karakter unggul benih telah ditentukan, dengan demikian hasil benih melalui sistem ini memiliki mutu yang seragam serta memberikan kepastian hasil pertumbuhan dan produksi di lapangan.

Benih tanaman yang dihasilkan dari sistem pertanian modern tidak hanya memiliki nilai tinggi sebagai komoditas ekonomi, namun juga memiliki aspek hukum yang melekat kuat (Dirkareshza, 2024). Varietas yang dikembangkan melalui pemuliaan dilindungi oleh ketentuan hak kekayaan intelektual sebagai bentuk penghargaan

terhadap pihak yang menghasilkan inovasi tersebut. Keberadaan perlindungan tersebut tidak lepas dari fakta bahwa benih merupakan hasil dari proses intelektual yang kompleks. Sifat-sifat unggul yang dimiliki suatu varietas seperti kemampuan adaptasi, ketahanan pada cekaman, dan potensi hasilnya diperoleh melalui serangkaian penelitian, seleksi dan pengujian yang membutuhkan keahlian khusus serta sumber daya besar. Sejalan dengan perkembangan sistem perlindungan varietas tanaman, dibutuhkan sebuah mekanisme yang dapat memastikan bahwa varietas yang dikeluarkan benar-benar mempunyai keunggulan yang dapat dipertanggungjawabkan.

Di Indonesia, perlindungan terhadap varietas tanaman diatur dalam Undang-Undang nomor 29 Tahun 2000 tentang Perlindungan Varietas Tanaman (UU PVT). Benih dan varietas tanaman diatur juga dalam Undang-Undang nomor 12 Tahun 1992 tentang Sistem Budidaya Tanaman (UU SBT). Undang-Undang SBT mengatur bagaimana kualitas benih yang didistribusikan oleh penangkar atau produsen dijamin, sedangkan Undang-Undang PVT mengatur bagaimana benih varietas tanaman yang diciptakan oleh penangkar memperoleh perlindungan hukum. Pemahaman mengenai tatacara pelepasan varietas unggul menjadi sangat penting dalam mendukung pengembangan sistem perbenihan yang efektif dan berkelanjutan. Oleh karena itu, bab ini akan membahas secara sistematis mengenai prosedur pelepasan varietas unggul, mulai dari persyaratan, tahapan pengujian, hingga mekanisme penetapan varietas secara resmi di Indonesia.

7.2 Dasar Hukum dan Regulasi Pelepasan Varietas

Proses pelepasan varietas unggul membutuhkan suatu kerangka hukum yang jelas sebagai pedoman pada setiap tahapannya. Aturan ini memiliki fungsi untuk memperjelas standar, prosedur dan kewenangan dari pihak-pihak yang terlibat sehingga pelepasan varietas dapat dilakukan secara terarah dan transparan.

7.2.1 Kebijakan Pemerintahan dalam Pelepasan Varietas

Komponen kunci dalam kebijakan pembangunan pertanian nasional, yang bertujuan untuk meningkatkan ketahanan pangan,

produktivitas dan efisiensi adalah pengenalan varietas unggul. Dalam struktur ini pemerintah memiliki peran sebagai regulator yang memastikan bahwa varietas yang beredar di masyarakat telah patuh terhadap standar kesesuaian dan kualitas tertentu. Kebijakan ini mendorong inovasi pemuliaan tanaman di samping bertindak sebagai mekanisme kontrol.

Kebijakan pelepasan varietas dapat dikonseptualisasikan sebagai jenis keterlibatan negara dalam sistem benih yang menurunkan kemungkinan kegagalan produksi yang disebabkan oleh pemanfaatan benih berkualitas rendah. Hukum yang jelas dan seragam akan meningkatkan kepercayaan perusahaan dan mendorong efisiensi dalam sistem produksi pertanian, oleh sebab itu, kebijakan pelepasan varietas memiliki dampak yang sangat luas pada aspek sosial dan ekonomi pertanian selain pada tingkat teknis. Pada kenyataannya strategi ini berupaya untuk mencapai sejumlah tujuan utama yaitu memastikan kualitas varietas yang dilepaskan, melindungi kepentingan petani yang kedudukannya sebagai pengguna benih, memberikan insentif terhadap pemulia tanaman dan mendukung proses pengembangan industri benih nasional (Anggraini, dkk. 2025).

7.2.2 Kerangka Hukum Nasional dan Internasional

Regulasi nasional yang tertuang dalam Undang-Undang nomor 29 Tahun 2000 tentang Perlindungan Varietas Tanaman (PVT) merupakan peraturan perundang-undangan utama yang mengatur varietas tanaman di Indonesia. Hak eksklusif untuk menciptakan, memperbanyak dan mendistribusikan varietas yang dikembangkan oleh para pemulia tanaman diatur secara jelas oleh undang-undang ini (Purwanto, dkk. 2024). Selain itu peraturan ini telah menetapkan bahwa varietas harus memenuhi persyaratan kebaruan, keunikan, keseragaman dan kestabilan agar memenuhi syarat untuk dilindungi. Beberapa peraturan turunan termasuk yang berikut ini, mempermudah penerapan peraturan ini:

1. Peraturan Pemerintah 13 Tahun 2004 tentang Penamaan, Pendaftaran, dan Penggunaan Varietas Tanaman
2. Peraturan Pemerintah Nomor 14 Tahun 2004 tentang Syarat dan Proses Pengalihan Hak PVT

Selain aspek perlindungan, pelepasan varietas juga berkaitan erat dengan sistem sertifikasi dan distribusi benih yang diatur dalam kebijakan perbenihan nasional. Hal ini menunjukkan bahwa pelepasan varietas tidak berdiri sendiri, tetapi merupakan bagian dari sistem agribisnis yang lebih luas.

Secara global, aspek perlindungan tanaman mengacu pada prinsip-prinsip yang dirumuskan dan dikembangkan oleh *International Union for the Protection of New Varieties of Plants* (UPOV). Guna mendorong inovasi dalam pemuliaan tanaman, konvensi UPOV menyoroti pentingnya membela hak-hak pemulia. Selain itu, perjanjian TRIPs (*Trade-Related Aspects of Intellectual Property Rights*) WTO mewajibkan negara-negara anggota untuk melindungi varietas tanaman menggunakan sistem sui generis atau paten. Hukum nasional Indonesia terkait erat dengan dinamika global, terutama dalam hal perdagangan dan perlindungan kekayaan intelektual, sebagaimana ditunjukkan oleh keterkaitan dengan sistem internasional ini (Fauzi, 2023).

7.2.3 Peran Kementerian Pertanian dalam Proses Pelepasan Varietas

Sebagai regulator dan fasilitator dalam sistem benih nasional, Kementerian Pertanian berperan penting dalam mengkoordinasikan pengenalan varietas unggul di Indonesia. Fungsi ini melampaui tugas administratif untuk mencakup penilaian teknis, pengendalian mutu, dan menjamin legalitas varietas yang tersedia untuk masyarakat umum. Semua fase pelepasan varietas dikoordinasikan oleh Kementerian Pertanian melalui lembaga khusus seperti Pusat Perlindungan Varietas Tanaman dan Perizinan Pertanian (PPVTTPP). Dengan bertindak sebagai penghubung antara instansi pemerintah, fasilitas penelitian, dan pemulia tanaman, organisasi ini memastikan bahwa varietas yang disarankan mematuhi peraturan.

Keterlibatan operasional Kementerian Pertanian dalam proses pelepasan varietas mencakup sejumlah elemen penting. Usulan varietas yang diajukan oleh para pemulia tanaman atau organisasi afiliasi pertama-tama diverifikasi secara administratif. Sebelum melanjutkan ke tahap pengujian lebih lanjut, tahap ini bertujuan untuk menjamin dokumentasi yang lengkap dan kepatuhan terhadap

persyaratan dasar. Kedua, hal ini memungkinkan dan mengelola pelaksanaan pengujian varietas, yang meliputi pengujian adaptasi dan pengujian di berbagai lokasi. Untuk menentukan stabilitas dan keunggulan suatu varietas dibandingkan varietas pembanding, pengujian ini sangat penting untuk mengevaluasi kinerja varietas dalam kondisi lingkungan yang berbeda. Ketiga, melakukan tinjauan teknis untuk memastikan kesesuaian varietas dalam hal karakteristik agronomis, produksi, dan ketahanan terhadap hama dan penyakit. Pilihan yang dibuat pada tahap ini berfungsi sebagai dasar untuk memilih jenis mana yang akan dilepas. Keempat, memberi rekomendasi dan penetapan pelepasan varietas melalui keputusan resmi Menteri Pertanian. Varietas yang telah disetujui akan memiliki status legal yang jelas, sehingga dapat diproduksi, diedarkan, dan dimanfaatkan secara luas oleh masyarakat.

Kementrian Pertanian juga bertanggung jawab dalam mengawasi distribusi benih dan menjamin bahwa varietas yang dilepas memenuhi kriteria kualitas. Peran ini sangat penting untuk menjaga kepercayaan petani terhadap sistem benih dan menghentikan peredaran benih berkualitas rendah (Saleh, dkk. 2023). Namun, masih ada sejumlah kendala dalam pelaksanaannya, termasuk kurangnya kapasitas pengujian, prosedur administrasi yang berbelarut-larut, dan koordinasi kelembagaan yang tidak memadai. Oleh karena itu, untuk menjamin bahwa proses pelepasan varietas lebih efisien dan peka terhadap kebutuhan pengguna, diperlukan penguatan kelembagaan dan penyederhanaan prosedur.

7.3 Tahapan Awal Pengembangan Varietas Unggul

Tahap awal pengembangan varietas unggul adalah fase krusial dalam pemuliaan tanaman yang bertujuan menghasilkan genotipe unggul sebelum masuk tahap uji lanjutan dan pelepasan varietas. Secara umum, proses ini meliputi pengumpulan keragaman genetik, pembentukan populasi pemuliaan, proses seleksi genotipe unggul, dan evaluasi awal adaptasi. Tahap ini menjadi penentu keberhasilan pengembangan varietas karena berkaitan langsung dengan kualitas bahan genetik dan efektivitas seleksi yang dilakukan.

7.3.1 Eksplorasi Plasma Nutfah

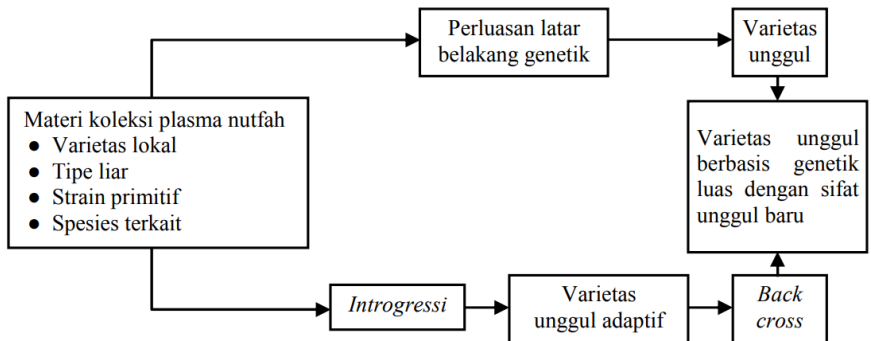
Ketersediaan plasma nutfah sangat penting untuk pemuliaan tanaman, sehingga mengintegrasikan genetika molekuler, program pemuliaan, dan manajemen plasma nutfah sangatlah penting (Cooper, dkk. 2001). Dalam suatu wilayah, kelimpahan plasma nutfah terdiri dari tipe liar, *land races*, subspecies, kerabat spesies dalam satu genus yang sama, segregat alam, bentuk allopoloid, mutan alamiah, transgenonik, bentuk autopoloid, tipe delisi kromosomal menunjukkan seberapa kaya plasma nutfah suatu spesies di suatu daerah, yang mencerminkan sejarah evolusi yang panjang dan adaptasi lingkungannya. Varietas dengan latar belakang sempit (*narrow germplasm based varieties*) rentan terhadap cekaman lingkungan dan hama penyakit karena terjadi *genetic buffering capacity* (Borlaug, 1981). Sehingga perlu pengembangan varietas baru dengan genetik berbeda yang berasal dari plasma nutfah yang beragam. Pustaka DNA, DNA *finger printing*, *gene-sequencing*, *molecular gene mapping*, dan pendekatan gen molekuler lainnya dapat diperoleh melalui penggalan informasi dan penciptaan genetik sifat pada tingkat molekuler DNA berkat perkembangan teknologi genetika molekuler (Zuraida, 2008).

Di Indonesia, merilis aksesori plasma nutfah tanaman sebagai donor gen dapat dilakukan dengan merujuk pada peraturan perundang-undangan yang berlaku yaitu ketentuan dan persyaratan untuk pelepasan materi plasma nutfah:

1. Gen pada aksesori plasma nutfah yang ditemukan bersifat baru, belum pernah digunakan dalam pemuliaan dan berfungsi sebagai gen donor yang diperlukan oleh program pemuliaan.
2. Aksesori plasma nutfah pembawa gen donor dapat disilangkan dengan genotipe atau varietas yang akan diperbaiki sifatnya (*germplasm with transferable gene*).
3. Plasma nutfah pembawa gen baru dapat dan telah dibuktikan keberadaan gennya mengikuti prosedur penelitian yang sesuai dengan kaidah ilmiah, termasuk usulan pemberian kode gennya.
4. Gen baru yang ditemukan telah diteliti karakter gen aksinya (*mode of gene action*) dan cara pewarisannya (*gene*

enheritance), menggunakan teknik segregasi Mendel atau teknik genetika molekuler.

5. Akses plasma nutfah pembawa gen yang bersangkutan belum pernah dilepas secara resmi, belum pernah dipublikasikan oleh instansi di dalam negeri, negara lain atau oleh Lembaga Penelitian Internasional
6. Plasma nutfah yang mengandung gen yang dimaksudkan, apabila diambil dari “kepemilikan” masyarakat, harus ada persetujuan masyarakat sesuai dengan prinsip *Prior Informed Consent* dari ketentuan CBD (1992).
7. Hak kepemilikan plasma nutfah oleh seseorang atau lembaga harus dapat dimanfaatkan bagi kemaslahatan masyarakat luas, melalui pemanfaatan gen dalam program pemuliaan tanaman.



Gambar 7.1. Pemanfaatan plasma nutfah liar untuk memperluas keragaman genetik dan memasukkan gen spesifik ke varietas unggul

(Sumber : Spoor dan Simmonds 2001)

Varietas unggul dihasilkan dari seleksi atau ekstraksi genotipe yang diidentifikasi dalam koleksi plasma nutfah, sehingga koleksi ini memainkan peran penting pada tahap awal pemuliaan tanaman. keberagaman genetik yang terkandung di dalamnya memungkinkan pemulia memperoleh sumber sifat-sifat unggul, seperti produktivitas tinggi, ketahanan hama dan penyakit, serta cekaman lingkungan.

7.3.2 Program Pemuliaan Tanaman

Program pemuliaan tanaman adalah serangkaian prosedur yang dirancang untuk mengelola variabilitas genetik, menciptakan populasi, dan memilih genotipe dengan sifat-sifat yang diinginkan untuk menghasilkan kultivar unggul. Karena menetapkan arah peningkatan genetik dan jumlah maksimum peningkatan genetik yang dapat dicapai, program ini merupakan fondasi pertumbuhan varietas (Sholikhah, dkk. 2025). Pemilihan tetua biasanya dilakukan berdasarkan sifat-sifat unggul, seperti hasil panen tinggi, ketahanan terhadap penyakit dan serangga, serta toleransi terhadap stres, adalah langkah pertama dalam program pemuliaan (Ashar, dkk. 2026). Tetua terpilih kemudian disilangkan untuk menghasilkan populasi segregasi yang memiliki kombinasi genetik baru. Populasi ini menjadi dasar bagi proses seleksi pada generasi berikutnya.

Contoh teknik pemuliaan yang umum digunakan adalah Persilangan konvensional (hibridisasi), seleksi galur murni (*pure line selection*), persilangan balik (*backcross*), dan metode percepatan seperti haploid ganda (*doubled haploid*). Pendekatan modern seperti *marker-assisted selection* (MAS), *genomic selection* (GS), dan pemanfaatan data genomik juga sudah banyak digunakan untuk meningkatkan efisiensi dan akurasi seleksi. Tiga faktor utama seperti variabilitas genetik, intensitas seleksi dan akurasi proses seleksi memiliki dampak yang signifikan terhadap kinerja pemuliaan tanaman. Selain itu, siklus pemuliaan dapat dipercepat dan kemungkinan memperoleh varietas unggul dalam waktu yang lebih singkat dapat ditingkatkan dengan memanfaatkan teknologi seperti *high-throughput phenotyping*, *speed breeding* dan bioinformatika. Untuk menghasilkan varietas unggul yang siap untuk diuji dan dirilis secara resmi, program pemuliaan tanaman merupakan proses terintegrasi yang menghubungkan sumber daya genetik dengan tahapan seleksi dan penilaian.

7.3.3 Seleksi Galur Unggul

Seleksi galur unggul dalam pemuliaan tanaman berfokus pada pemilihan genotipe terbaik dari populasi hasil persilangan, yang memiliki peningkatan kinerja, homogenitas, dan stabilitas genetik. Proses hingga memperoleh galur yang hampir homozigot, seleksi

dilakukan secara bertahap di beberapa generasi, terutama pada tanaman yang melakukan penyerbukan sendiri (misalnya, dari generasi F2 hingga F6). Hasil panen, konsistensi tanaman, waktu panen, ketahanan terhadap penyakit dan serangga, serta toleransi terhadap stres lingkungan termasuk di antara kriteria seleksi.

Terdapat dua jenis strategi seleksi yaitu molekuler dan fenotipik. Sementara metode genetik seperti MAS dan GS memungkinkan identifikasi genotipe unggul yang lebih cepat dan lebih tepat, terutama untuk fitur kuantitatif, seleksi fenotipik bergantung pada pengamatan langsung di lapangan (Hasanah dan Azizah, 2025). Karakteristik genetik seperti heritabilitas, variabilitas genetik, dan interaksi genotipe dan lingkungan memiliki dampak signifikan terhadap efektivitas seleksi. Hasil dari tahap seleksi ini adalah diperolehnya galur-galur harapan (*promising lines*) yang memiliki potensi tinggi untuk dikembangkan lebih lanjut pada tahap pengujian adaptasi.

7.3.4 Uji Adaptasi Awal

Sebelum melakukan percobaan di berbagai lokasi, pengujian adaptasi awal merupakan fase evaluasi terhadap galur unggul terpilih untuk memastikan kemampuan adaptasinya terhadap kondisi lingkungan tertentu. Fase ini berfungsi sebagai penyaringan tambahan untuk menjamin bahwa galur yang dipilih unggul secara genetik dan mampu beradaptasi di lapangan. Pertumbuhan tanaman, komponen hasil panen, produktivitas, dan ketahanan terhadap stresor biotik dan abiotik termasuk di antara faktor pengamatan yang digunakan dalam pengujian, yang biasanya dilakukan di satu atau lebih lokasi yang menunjukkan kondisi lingkungan target. Pada tahap ini, konsekuensi interaksi antara genotipe dan lingkungan ($G \times E$) mulai terlihat. Akibatnya, penilaian stabilitas menjadi faktor penting dalam menentukan apakah suatu galur cocok untuk pengembangan lebih lanjut. Varietas unggul memiliki kinerja yang andal dalam berbagai kondisi lingkungan selain hasil panen yang tinggi. Kemampuan adaptasi dan konsistensi hasil panen galur dinilai menggunakan analisis stabilitas seperti biplot GGE dan teknik AMMI (*Additive Main Effects and Multiplicative Interaction*) (Adi, dkk. 2023). Metode ini membantu dalam mengidentifikasi galur dengan

kemampuan adaptasi spesifik lokasi dan luas. Hasil uji adaptasi awal menjadi dasar dalam menentukan galur yang layak untuk dilanjutkan ke tahap uji multilokasi sebagai bagian dari proses pelepasan varietas unggul.

7.4 Uji Daya Hasil dan Adaptasi Varietas

Pemuliaan modern tidak terlepas dari evaluasi daya hasil dan analisis stabilitas serta adaptasi, karena genotipe yang memiliki potensi hasil tinggi belum tentu memiliki performa yang konsisten pada berbagai kondisi agroekosistem.

7.4.1 Uji Multilokasi

Proses uji multilokasi digunakan untuk menilai kinerja genotipe di berbagai kondisi lingkungan, termasuk iklim, jenis tanah, dan sistem produksi. Karena interaksi antara genotipe dan lingkungan dapat menghasilkan variasi dalam peringkat kinerja genotipe di berbagai lokasi. Evaluasi multilokasi sangat penting dalam pemuliaan tanaman modern karena penelitian menunjukkan bahwa hasil panen sangat dipengaruhi oleh genotipe, lingkungan, dan interaksi keduanya (Supriadi, dkk. 2026). Untuk meningkatkan akurasi data, studi multilokasi biasanya menggunakan desain eksperimental standar, seperti Rancangan Acak Kelompok (*Randomized Block Designs*/RBD) dengan banyak replikasi. Selain itu, uji coba multilokasi memungkinkan sebuah genotipe memiliki adaptasi luas, menemukan genotipe yang telah beradaptasi dengan tempat tertentu, dan penilaian stabilitas kinerja genotipe dalam berbagai konteks. Oleh karena itu, uji coba multilokasi memberikan landasan ilmiah untuk memutuskan apakah suatu galur sesuai untuk pengembangan umum atau hanya dalam keadaan tertentu.

7.4.2 Uji Daya Hasil Pendahuluan dan Lanjutan

Uji daya hasil merupakan proses evaluasi secara kuantitatif untuk membandingkan potensi produksi galur unggul dengan varietas pembanding. Tahap ini dilakukan secara bertingkat untuk meningkatkan efisiensi seleksi dan akurasi pengambilan keputusan. Karena banyak genotipe yang diuji pada tahap pertama, seleksi difokuskan pada penghapusan galur berkinerja rendah. Jumlah genotipe kemudian dikurangi dan pengujian dilakukan dengan

intensitas lebih tinggi dan pengamatan yang lebih menyeluruh pada pengujian hasil panen lanjutan. Karena produktivitas tanaman merupakan karakteristik kompleks yang dipengaruhi oleh banyak gen dan faktor lingkungan, strategi ini sangat penting. Akibatnya, hubungan antara hasil panen dan komponen-komponennya seperti jumlah biji, ukuran, dan efisiensi fisiologis tanaman harus diperhitungkan saat mengevaluasi hasil panen.

7.4.3 Parameter Agronomi

Parameter agronomi digunakan untuk menilai kinerja keseluruhan suatu genotipe dan mengevaluasi produktivitas serta untuk memahami proses morfologis dan fisiologis yang mendasari produksi tanaman (Mawaddah, dkk. 2025). Parameter agronomis termasuk dalam kategori berikut:

1. Karakter pertumbuhan: tinggi tanaman, jumlah daun, indeks luas daun
2. Karakter perkembangan: umur berbunga, umur panen
3. Komponen hasil: jumlah anakan produktif, jumlah biji, bobot biji
4. Karakter ketahanan: respons terhadap hama, penyakit, dan cekaman

Keragaman parameter ini mencerminkan variabilitas genetik yang menjadi dasar seleksi. Variabilitas yang luas memungkinkan pemulia untuk memilih genotipe dengan kombinasi sifat yang optimal.

7.4.4 Stabilitas dan Adaptabilitas Varietas

Interaksi antara genotipe dan lingkungan ($G \times E$) merupakan aspek penting dalam menentukan pola adaptasi galur yang akan dilepas sebagai varietas unggul baru sekaligus menjadi dasar dalam penyusunan rekomendasi pengembangannya (Sholikhah, dkk. 2025). Genotipe dengan performa yang stabil pada umumnya dilakukan identifikasi melalui evaluasi pada berbagai lokasi, musim dan lingkungan yang berbeda. Konsistensi kinerja agronomi suatu genotipe di berbagai lingkungan dikenal sebagai stabilitas genotipe. Genotipe yang stabil menunjukkan variasi hasil panen yang relatif

rendah bahkan ketika dibudidayakan dalam berbagai kondisi lingkungan (Chauhan, dkk. 2023). Di sisi lain, adaptabilitas mengacu pada kapasitas suatu genotipe untuk menghasilkan hasil terbaiknya baik dalam kondisi lingkungan ideal maupun tidak menguntungkan. Genotipe dengan adaptabilitas terbatas hanya dapat menunjukkan keunggulan dalam konteks tertentu, genotipe dengan adaptabilitas luas dapat menghasilkan hasil panen dalam berbagai kondisi.

Banyak teknik statistik yang digunakan untuk melakukan studi stabilitas dan adaptabilitas. Eberhart dan Russell (1966) menyatakan bahwa koefisien regresi (b) dan deviasi regresi dapat digunakan sebagai indikator dalam analisis regresi linier. Genotipe yang ideal memiliki nilai koefisien regresi mendekati satu ($b \approx 1$) dan deviasi yang rendah, yang menunjukkan respons stabil dan adaptif terhadap perubahan lingkungan (Adi, dkk. 2023). Karena dapat menilai interaksi $G \times E$ secara lebih menyeluruh dan visual dibandingkan metodologi regresi, pendekatan AMMI (*Additive Main Effects and Multiplicative Interaction*) dan GGE Biplot (*Genotype and Genotype $\times$ Environment Interaction Biplot*) juga sering digunakan (Demelash, 2024). Dengan tingkat akurasi yang setara dengan model regresi sebelumnya, model AMMI memiliki keuntungan dalam memecah efek interaksi dan dapat disesuaikan dengan berbagai jenis data.

Dalam berbagai penelitian pemuliaan tanaman, metode AMMI telah banyak digunakan untuk menilai stabilitas dan adaptasi genotipe. Pendekatan ini telah digunakan pada sejumlah komoditas, termasuk jagung (Andayani, dkk. 2014), kedelai (Krisnawati, dkk. 2016), dan padi (Widyastuti, dkk. 2013). Temuan analisis ini sangat penting untuk mengidentifikasi genotipe dengan adaptasi yang luas dan spesifik lokasi, yang menjadi dasar untuk pengenalan dan seleksi kultivar unggul.

7.5 Prosedur Pengajuan Pelepasan Varietas

Tahap terakhir dalam proses pemuliaan adalah pelepasan varietas tanaman, yang memberikan sertifikasi resmi pemerintah kepada varietas yang memenuhi persyaratan ilmiah dan layak untuk didistribusikan. Secara definisi, pelepasan varietas adalah pengakuan pemerintah terhadap varietas hasil pemuliaan dalam negeri maupun introduksi luar negeri yang dinyatakan layak untuk diedarkan.

Peraturan Menteri Pertanian Nomor 38 Tahun 2019 tentang Pelepasan Varietas Tanaman mengatur proses ini di Indonesia. Peraturan ini telah diubah oleh Peraturan Menteri Pertanian Nomor 23 Tahun 2023 dan, yang terbaru, oleh Peraturan Menteri Pertanian Nomor 05 Tahun 2026. Untuk menjamin kualitas dan keamanan varietas untuk penggunaan umum, peraturan ini menekankan bahwa pelepasan varietas tidak hanya bersifat administratif tetapi juga memerlukan prosedur peninjauan ilmiah yang menyeluruh.

7.5.1 Persyaratan Pengajuan Pelepasan Varietas

Pengaturan pelepasan varietas tanaman pada tahun 2026 merujuk pada Peraturan Menteri Pertanian Nomor 05 Tahun 2026 yang merupakan revisi lanjutan dari Permentan Nomor 38 Tahun 2019. Peraturan ini diarahkan untuk membuat proses menjadi lebih sederhana, terbuka, dan bertanggung jawab, sehingga varietas unggul yang dihasilkan dapat diakui dan disebarluaskan dengan mekanisme yang lebih efektif. Berikut adalah garis besar prosedur pelepasan varietas tanaman berdasarkan peraturan terbaru:

1. Tahap Persiapan dan Pendaftaran (Sipetasan)
 - a. Pendaftaran Rencana Pengujian: Pengusul mendaftarkan rencana pengujian calon varietas kepada ketua TP2V (Tim Penilai dan Pelepas Varietas) Hortikultura atau Tanaman Pangan.
 - b. Aplikasi *Online*: Pendaftaran dilakukan melalui aplikasi Sipetasan (Sistem Informasi Pelepasan Varietas Tanaman) untuk efektivitas dan responsivitas.
 - c. Proposal Pengujian: Pengusul melampirkan proposal pengujian berupa *hard copy* dan *soft copy*.
2. Tahap Pengujian
 - a. Uji BUSS/DUS: Pengujian Keberbedaan (*Distinctness*), Keseragaman (*Uniformity*), dan Kestabilan (*Stability*).
 - b. Uji Adaptasi: Varietas hasil pemuliaan dalam negeri atau introduksi wajib melalui uji adaptasi untuk mengetahui materi genetiknya (galur, hibrida, lokal, dll).
 - c. Supervisi TP2V: Pengujian calon varietas diawasi atau disupervisi oleh anggota TP2V.

3. Tahap Permohonan Pelepasan

- a. Penyusunan Berkas: Pengusul menyusun deskripsi varietas dan data pendukung hasil uji.
- b. Pengajuan ke Pusat PVTTP: Berkas diserahkan ke Pusat Perlindungan Varietas Tanaman dan Perizinan Pertanian (Pusat PVTTP).
- c. Sidang Pelepasan: Dilakukan sidang untuk menilai apakah varietas layak dilepas, terutama bagi benih bina

4. Penetapan

- Penerbitan Surat Keputusan: Setelah lolos sidang dan evaluasi, Menteri Pertanian akan menetapkan pelepasan varietas tersebut secara sah (Kementan, 2026).

7.5.2 Tantangan dalam Pelepasan Varietas

Sejumlah kendala teknis, administratif, hukum, dan sosioekonomi yang saling terkait memengaruhi proses pelepasan varietas tanaman dan berdampak pada seberapa baik varietas baru diimplementasikan di lapangan. Pengujian DUS hingga saat ini masih banyak bergantung pada pengamatan karakter morfologi fenotipik, sehingga hal tersebut menjadi salah satu tantangan teknis utama dalam pelaksanaannya. Sistem DUS konvensional ini memiliki ruang kombinasi sifat yang kecil, kurang sesuai untuk varietas kontemporer seperti hibrida atau yang berasal dari teknik pemuliaan molekuler, dan sering menunjukkan ketidakkonsistenan antara lingkungan pengujian dan lingkungan tanaman sebenarnya di lapangan, yang memperlambat proses registrasi varietas baru (Yang, dkk. 2021).

Periode pelepasan varietas semakin diperpanjang oleh waktu dan sumber daya yang dibutuhkan untuk pengujian DUS (*Disability-Universal Standard*) dan *Value for Culture and Use/VCU*, yang mencakup biaya tinggi untuk pengujian multilokasi, staf khusus, dan fasilitas penilaian. Dari sudut pandang regulasi, hanya sedikit varietas transgenik yang berhasil dilepaskan meskipun permintaan akan varietas unggul terus meningkat karena prosedur administratif dan pedoman teknis terutama untuk varietas hasil rekayasa genetika seringkali tidak memadai, meskipun kerangka hukum untuk pelepasan varietas

cukup komprehensif di beberapa negara, seperti Indonesia. Selain itu, sistem pelestarian varietas menghadapi kesulitan baru sebagai akibat dari kemajuan teknologi pemuliaan, seperti penerapan teknologi genomik dan metode pemuliaan modern (Lassoued, dkk. 2018). Hal ini disebabkan oleh fakta bahwa peraturan perundang-undangan yang berkaitan dengan varietas yang dihasilkan melalui prosedur pemuliaan terpadu (pendekatan genomik baru) masih belum jelas, dan peningkatan kualitas varietas baru tidak selalu mudah terlihat menggunakan metode penilaian standar (kekhasan).

Masalah hak kekayaan intelektual adalah masalah lain yang sering diabaikan. Hak pemulia dapat mendorong inovasi, tetapi jika kebijakan tidak menyeimbangkan antara perlindungan dan akses, kebijakan tersebut dapat membatasi akses pemulia kecil dan petani terhadap varietas baru (Smulders, dkk. 2021). Proses pelepasan varietas juga memakan waktu dan tidak efektif karena prosedur administrasi yang manual dan tidak transparan. Oleh karena itu, pengembangan sistem digitalisasi diperlukan untuk mempercepat pemeriksaan, pencatatan, dan evaluasi. Dengan begitu, pelepasan varietas tidak hanya soal memenuhi persyaratan teknis dan administratif, tetapi juga membutuhkan kebijakan yang tepat, pemanfaatan teknologi modern, dan keseimbangan antara perlindungan inovasi serta akses sumber daya genetik bagi semua pihak.

Berdasarkan uraian tersebut, disimpulkan bahwa pengelolaan HKI, kebijakan pelepasan varietas, serta pemanfaatan teknologi memiliki peran yang sangat penting dalam mendorong inovasi di bidang pemuliaan tanaman. Namun demikian, diperlukan keseimbangan antara perlindungan inovasi dan keterbukaan akses agar tidak menghambat pemulia kecil dan petani dalam memperoleh varietas unggul. Oleh karena itu, sinergi antara regulasi yang adaptif, sistem administrasi yang transparan, serta dukungan teknologi modern menjadi kunci dalam mewujudkan pengembangan varietas yang berkelanjutan dan berkeadilan bagi seluruh pihak.

DAFTAR PUSTAKA

- Adi, E.B.M. et al., 2023. Adaptabilitas dan stabilitas hasil empat belas genotip padi gogo pada tujuh lokasi menggunakan AMMI. *Al-Kauniyah: Jurnal Biologi*, 16(1), pp.183–189.
- Andayani, N. et al., 2014. Stabilitas hasil jagung hibrida silang tunggal. *Penelitian Pertanian Tanaman Pangan*, 33(3), pp.148–154.
- Ashar, J.R. et al., 2026. *Pemuliaan tanaman lanjutan*. Jakarta: PT Penerbit Qriset Indonesia.
- Borlaug, N.E., 1981. Increasing and stabilizing food production. In: K.J. Frey, ed. *Plant Breeding II*. Iowa: Iowa State University Press, pp.467–492.
- Chauhan, P. et al., 2023. Stability analysis in wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes under different environmental conditions. *International Journal of Plant & Soil Science*, 35(21), pp.1218–1223.
- Cooper, H.D., Spillane, C. & Hodgkin, T., 2001. Broadening the genetic base of crops: an overview. In: H.D. Cooper, C. Spillane & T. Hodgkin, eds. *Broadening the Genetic Base of Crop Production*. Wallingford: CABI Publishing, pp.1–24.
- Demelash, H., 2024. Genotype by environment interaction, AMMI, GGE biplot, and mega environment analysis of elite *Sorghum bicolor* (L.) Moench genotypes in humid lowland areas of Ethiopia. *Heliyon*, 10(5).
- Dirkareshza, R., 2024. Peran hukum dalam mengatur dan melindungi varietas tanaman lokal untuk ketahanan pangan dan lingkungan. *SANGAJI: Jurnal Pemikiran Syariah dan Hukum*, 8(2), pp.223–234.
- Eberhart, S.A. & Russell, W.A., 1966. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Science*, 6(1), pp.36–40.
- Fauzi, F., 2023. Perlindungan hukum bagi pemulia dan varietas tanaman dalam kerangka hukum perlindungan varietas tanaman di Indonesia. *Wijaya Putra Law Review*, 2(2), pp.95–116.
- Hasanah, N.H. & Azizah, M., 2025. Seleksi lima galur harapan tanaman jagung (*Zea mays* L.) melalui karakterisasi fenotipe. *AGRORADIX: Jurnal Ilmu Pertanian*, 9(1), pp.60–72.

- Kementerian Pertanian Republik Indonesia, 2026. *Peraturan Menteri Pertanian Nomor 05 Tahun 2026 tentang Perubahan Kedua atas Peraturan Menteri Pertanian Nomor 38 Tahun 2019 tentang Pelepasan Varietas Tanaman*. Jakarta: Pusat Perlindungan Varietas Tanaman dan Perizinan Pertanian.
- Krisnawati, A. et al., 2016. Analisis stabilitas hasil genotipe kedelai menggunakan metode additive main effect and multiplicative interaction (AMMI). *Informatika Pertanian*, 25(1), pp.41–50.
- Lassoued, R. et al., 2018. Regulatory uncertainty around new breeding techniques. *Frontiers in Plant Science*, 9, p.1291.
- Mawaddah, S. et al., 2025. Parameter genetik beberapa galur S5 jagung (*Zea mays* L.) dalam pengembangan varietas unggul tahan kekeringan. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Agrokomplek*, 4(3), pp.907–913.
- Purwanto, G.H. et al., 2024. Implementasi dan bentuk perlindungan hukum terhadap hak pemulia tanaman di Indonesia. *Jurnal Pembangunan Hukum Indonesia*, 6(3), pp.376–393.
- Saleh, S.H.M. et al., 2023. Pelaksanaan kewenangan UPT Pengawas dan Sertifikasi Benih Provinsi Nusa Tenggara Timur terhadap benih bina dan hortikultura ditinjau dari Peraturan Menteri Nomor 12 Tahun 2018 tentang Produksi, Sertifikasi dan Peredaran Benih Bina Tanaman. *Petitum Law Journal*, 1(1), pp.269–277.
- Sholikhah, U. et al., 2025. *Padi unggul: Ilmu pemuliaan menuju swasembada dan ketahanan pangan*. Malang: Inara Publisher.
- Sholikhah, U. et al., 2025. Agronomic and genetic characteristics of F1 black rice x white glutinous rice crosses. *Biodiversitas: Journal of Biological Diversity*, 26(2).
- Smulders, M.J. et al., 2021. The use of intellectual property systems in plant breeding for ensuring deployment of good agricultural practices. *Agronomy*, 11(6), p.1163.
- Spoor, W. & Simmonds, N.W., 2001. Base broadening: introgression and incorporation. In: H.D. Cooper, C. Spillane & T. Hodgkin, eds. *Broadening the Genetic Base of Crop Production*. Wallingford: CABI Publishing.
- Supriadi, D. et al., 2026. Associations and multi-traits selection for identifying superior and stable maize hybrids (*Zea mays* L.)

- under tropical regions. *Caraka Tani: Journal of Sustainable Agriculture*, 41(1), pp.17–31.
- Widyastuti, Y., Satoto & Rumanti, I.A., 2013. The application of regression analysis and AMMI to evaluate the stability of rice genotype and interaction effect between genotype and environment. *Informatika Pertanian*, 22(1), pp.21–28.
- Yang, C.J. et al., 2021. Overcoming barriers to the registration of new plant varieties under the DUS system. *Communications Biology*, 4, p.302.
- Zuraida, N., 2008. Pengelolaan plasma nutfah tanaman terintegrasi dengan program pemuliaan. *Buletin Plasma Nutfah*, 14(2), pp.57–67.

BAB 8

TEKNOLOGI PRODUKSI BENIH MELALUI HIBRIDISASI

8.1 Pendahuluan

Salah satu isu strategis yang terus menjadi kekhawatiran dalam pembangunan pertanian adalah meningkatnya kebutuhan pangan di seluruh dunia. Hal ini sejalan dengan proyeksi peningkatan populasi dunia, yang diperkirakan akan mencapai 9,7 miliar jiwa pada tahun 2050. Akibatnya, permintaan pangan diperkirakan akan meningkat sebesar 60% di atas tingkat saat ini (FAO, 2023). Di sisi lain, degradasi lahan, perubahan iklim, dan kelangkaan sumber daya alam juga menimbulkan tantangan signifikan bagi sektor pertanian, yang memengaruhi stabilitas produksi pangan (Purify, dkk. 2024). Dalam kondisi ini, sistem pertanian harus menjamin efisiensi, keberlanjutan, dan ketahanan hasil panen di samping peningkatan produktivitas.

Sistem pertanian modern menempatkan benih sebagai faktor awal yang menentukan keberhasilan produksi tanaman. Mutu benih memengaruhi vigor awal, proses pertumbuhan, hingga hasil akhir yang diperoleh. Perkembangan ilmu pengetahuan mendorong kajian perbenihan beralih dari konvensional menuju pendekatan berbasis genomik serta teknologi *omics*, sehingga memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai interaksi genetik dan fisiologis yang menentukan kualitas benih (Dwivedi, dkk. 2021). Kualitas benih merupakan hasil interaksi kompleks antara genetik, lingkungan, dan pengelolaan produksi. Oleh sebab itu, inovasi dalam teknologi benih memiliki peran strategis dalam meningkatkan produktivitas dan efisiensi sistem pertanian.

Salah satu inovasi dalam pengembangan benih unggul adalah teknologi hibridisasi, yaitu proses persilangan terkontrol antara dua induk yang berbeda secara genetik untuk menghasilkan keturunan yang lebih unggul. Keunggulan benih hibrida terutama terletak pada

fenomena heterosis atau vigor hibrida, di mana generasi pertama (F1) menunjukkan sifat agronomi yang lebih baik seperti vigor pertumbuhan, hasil panen, dan ketahanan terhadap stres biotik dan abiotik (Tester & Langridge, 2019).

Penggunaan benih hibrida telah meningkatkan produksi secara signifikan pada tanaman pangan. Di Cina dikembangkan padi *super hybrids* yang menunjukkan tingkat heterosis tinggi, dengan potensi hasil sekitar 25–40% melampaui padi inbrida (Barclay, 2010). Di Indonesia penggunaan padi hibrida meningkatkan hasil panen sebesar 15–20% dibandingkan dengan varietas inbrida pada kondisi pertumbuhan ideal (Krismawati, 2016). Penelitian sebelumnya juga menunjukkan adanya korelasi yang menguntungkan antara nilai heterosis tinggi dan komponen hasil panen yang lebih tinggi, termasuk biomassa tanaman, berat biji, dan jumlah butir per malai (Dwivedi, dkk. 2021). Hal ini menunjukkan bagaimana teknologi hibridisasi memainkan peran penting dalam meningkatkan ketahanan pangan nasional dan internasional.

Produksi benih hibrida menghadapi berbagai tantangan teknis dan ekonomis karena memerlukan pengelolaan intensif dan presisi, seperti pengendalian penyerbukan, sinkronisasi pembungaan, serta pemeliharaan kemurnian genetik. Adopsinya terhambat oleh sifatnya yang padat karya dan kebutuhan akan tenaga kerja terlatih, yang menyebabkan biaya produksi yang relatif tinggi, terutama di kalangan petani kecil (Gangashetty, dkk. 2024). Seiring kemajuan ilmu pengetahuan, hibridisasi tidak lagi dipandang sebagai metode tradisional tetapi sebagai sistem teknis terintegrasi yang mencakup pembuatan benih inovatif, metode penanaman, dan pengelolaan genetik. Penelitian terkini seperti *split planting* untuk sinkronisasi pembungaan, dapat meningkatkan efisiensi dan produktivitas benih hibrida secara signifikan (Luthfia, dkk. 2025). Oleh karena itu, pemahaman menyeluruh tentang teknologi produksi benih hibrida sangat penting, terutama berkaitan dengan ide-ide dasar, metode, dan aplikasi lapangan.

8.2 Konsep Hibridisasi

Perbaikan tanaman (*crop improvement*) pada dasarnya diarahkan agar varietas yang dihasilkan tidak hanya mewarisi

kelebihan tetua, tetapi juga memiliki karakter yang berbeda secara nyata. Setelah sifat yang diinginkan ditetapkan, tahap penting berikutnya adalah menentukan sumber gen yang tepat sebagai bahan dasar dalam proses perakitan varietas. (Arruun, 2021). Pada tanaman berbunga, metode konvensional dalam pemindahan atau penggabungan gen adalah melalui persilangan atau hibridisasi seksual. Proses ini menyebabkan gen dari kedua tetua tersusun dalam suatu matriks genetik baru. Oleh karena itu, jika kedua tetua tidak kompatibel secara genetik, maka pemindahan gen melalui cara seksual tidak dapat terjadi atau akan mengalami berbagai kendala. Hasil dari proses hibridisasi disebut sebagai hibrida.

Hibridisasi dapat berlangsung secara alami dengan bantuan agen penyerbuk, tetapi dalam kegiatan pemuliaan lebih sering dilakukan secara buatan untuk tujuan tertentu. Istilah hibridisasi sendiri umumnya digunakan untuk persilangan antarindividu yang memiliki perbedaan genetik. Teknik ini banyak dimanfaatkan untuk menghasilkan populasi yang bersegregasi sebagai dasar seleksi dalam pemuliaan tanaman. Dalam praktiknya, hibrida generasi pertama (F1) pada beberapa komoditas langsung dimanfaatkan karena menunjukkan keunggulan tertentu. Namun, pada sebagian besar program pemuliaan, F1 akan diselfing untuk menghasilkan generasi F2 yang memiliki keragaman genetik lebih luas akibat rekombinasi, sehingga memungkinkan proses seleksi yang lebih efektif. Pada tanaman yang diperbanyak secara vegetatif, variasi pada F1 sering kali sudah mencukupi, sehingga dapat langsung dipilih tanpa perlu tahapan persilangan lanjutan.

8.2.1 Aplikasi Hibridisasi dalam Pemuliaan Tanaman

Hibridisasi merupakan salah satu teknik utama dalam pemuliaan tanaman yang digunakan untuk menghasilkan keragaman genetik sebagai dasar seleksi. Melalui proses ini, gen-gen dari dua tetua yang berbeda dikombinasikan sehingga terbentuk variasi baru yang memungkinkan diperolehnya individu dengan sifat unggul. Oleh karena itu, hibridisasi umumnya menjadi tahap awal dalam berbagai metode pemuliaan, khususnya pada tanaman menyerbuk sendiri maupun menyerbuk silang (Acquaah, 2009).

Salah satu aplikasi utama hibridisasi adalah transfer gen, yaitu memasukkan satu atau beberapa gen tertentu ke dalam kultivar yang telah beradaptasi dengan baik. Proses ini biasanya dilanjutkan dengan persilangan balik (*backcrossing*) secara terarah untuk mempertahankan sebagian besar sifat unggul dari tetua adaptif, sambil tetap membawa gen target yang diinginkan. Teknik ini banyak digunakan, misalnya, dalam perakitan varietas tahan penyakit atau toleran terhadap cekaman lingkungan. Selain itu, hibridisasi berperan dalam rekombinasi genetik, yaitu menggabungkan sifat-sifat unggul dari tetua yang memiliki latar belakang genetik berbeda. Proses rekombinasi memungkinkan terbentuknya kombinasi gen baru yang lebih menguntungkan dibandingkan tetua asalnya (Ujianto, 2013). Dalam konteks ini, pemulia tanaman berupaya memperoleh susunan gen yang optimal, termasuk membentuk keterpautan gen (*linkage*) yang mengandung sifat-sifat yang diharapkan. Hibridisasi juga dimanfaatkan untuk memutus keterkaitan gen yang tidak diinginkan. Pada beberapa kasus, gen yang menguntungkan dapat terpaut dengan gen yang merugikan dalam satu kromosom. Melalui persilangan dan seleksi berulang, keterkaitan tersebut dapat dipisahkan sehingga dihasilkan genotipe dengan kombinasi sifat yang lebih ideal.

Pemanfaatan heterosis (*hybrid vigor*) merupakan aplikasi penting lainnya. Hibridisasi antara tetua tertentu dapat menghasilkan keturunan dengan performa yang lebih tinggi, seperti peningkatan hasil, pertumbuhan lebih cepat, atau ketahanan yang lebih baik dibandingkan kedua tetuanya (Oktakia, dkk. 2025). Fenomena ini menjadi dasar dalam pengembangan benih hibrida yang banyak digunakan pada berbagai komoditas pertanian. Dalam sistem produksi benih hibrida, hibridisasi juga berperan dalam pemeliharaan galur tetua, seperti galur mandul jantan sitoplasmik (*cytoplasmic male sterility/CMS*) dan galur pemelihara (*maintainer lines*). Keberlanjutan galur-galur tersebut sangat penting untuk menjamin konsistensi produksi benih hibrida yang berkualitas. Lebih lanjut, hibridisasi digunakan dalam pemeliharaan dan pengayaan keragaman genetik dalam *gene pool* melalui proses introgresi. Teknik ini dilakukan dengan menyilangkan genotipe yang memiliki sifat unggul ke dalam populasi yang telah beradaptasi, kemudian diikuti

dengan *backcrossing* dan seleksi. Pendekatan ini memungkinkan terbentuknya sumber daya genetik yang dinamis dan kaya variasi untuk mendukung program pemuliaan jangka panjang. Hibridisasi juga dimanfaatkan untuk evaluasi galur tetua, terutama dalam mengukur daya gabung (*combining ability*) pada galur inbrida. Informasi ini sangat penting untuk menentukan kombinasi tetua yang paling potensial dalam menghasilkan hibrida unggul. Selain sebagai alat perakitan varietas, hibridisasi memiliki peran dalam analisis genetik, yaitu untuk mempelajari pola pewarisan sifat dan interaksi gen. Melalui persilangan terencana, pemulia dan ahli genetika dapat memahami mekanisme dasar yang mengendalikan ekspresi sifat tertentu, sehingga mendukung pengembangan varietas yang lebih terarah dan efisien.

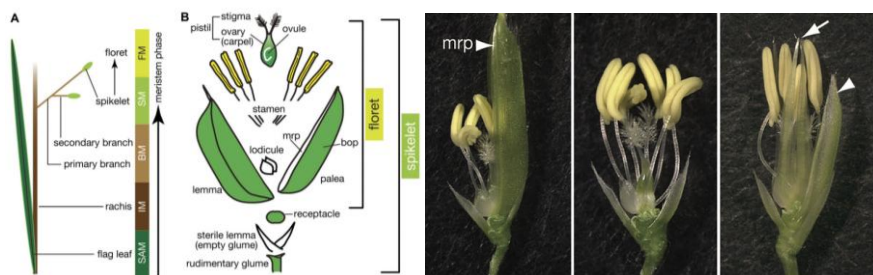
8.2.2 Teknik Hibridisasi Buatan pada Tanaman

Proses persilangan yang disengaja antara induk terpilih melalui penyerbukan yang diatur dikenal sebagai hibridisasi buatan. Tergantung pada spesies tanaman, beberapa teknik persilangan digunakan, yang dipengaruhi oleh hal-hal seperti bentuk bunga, biologi reproduksi, kemungkinan hambatan genetik, dan kondisi lingkungan (Mishra, 2025). Tetua yang digunakan harus memiliki hubungan kekerabatan yang dekat atau termasuk dalam spesies yang sama. Dalam praktiknya, pemulia tanaman biasanya mengidentifikasi satu induk sebagai betina dan lainnya sebagai jantan, sementara klasifikasi ini tidak selalu diperlukan dalam beberapa teknik pemuliaan, terutama pada tanaman yang melakukan penyerbukan sendiri. Tetua betina biasanya dipilih berdasarkan karakteristik morfologi resesif jika indikator genetik, seperti warna bunga atau biji, tersedia. Pada bunga sempurna yang memiliki organ jantan dan betina, persiapan tetua betina dilakukan dengan menghilangkan benang sari melalui proses emaskulasi. Tahap ini membutuhkan ketelitian agar tidak merusak organ betina. Pada beberapa program pemuliaan tanaman, proses emaskulasi dapat dihindari dengan memanfaatkan *male sterility* atau dengan pengendalian kimia yang disebut gametosida jantan, sterilan jantan, polifenolida atau androsida. Beberapa contoh zat yang digunakan adalah Ethephon, Hybrex, Dalapon, Estrone, dan Generis (Acquaah,

2009). Pemindahan serbuk sari dari tetua jantan umumnya dilakukan manual dengan menempatkan serbuk sari langsung ke stigma tetua betina. Teknik ini efektif untuk skala penelitian atau jumlah terbatas. Namun, pada produksi benih hibrida dalam skala besar, metode penyerbukan manual kurang efisien.

8.3 Biologi Bunga dan Pembungaan

Bunga adalah komponen kunci dalam pelaksanaan hibridisasi. Keberhasilan persilangan dipengaruhi oleh kondisi bunga, seperti kesehatan, tingkat kematangan, serta kesiapan stigma dalam menerima serbuk sari. Metode persilangan yang diterapkan sangat bergantung pada karakteristik biologis bunga, antara lain waktu dehisensi serbuk sari, tipe bunga (sempurna atau tidak sempurna), sistem penyerbukan (autogami atau alogami), serta ukuran, bentuk, dan struktur perbungaan (*inflorescence*).



Gambar 8.1. Contoh Representasi skematis struktur perbungaan dan spikelet serta tahapan pembungaan pada tanaman padi (Sumber: Yoshida & Nagato, 2011).

Faktor lingkungan yang perlu dikendalikan meliputi pencahayaan, suhu, ketersediaan air, nutrisi, dan pertahanan terhadap penyakit dan hama. Untuk pertumbuhan vegetatif dan perkembangan bunga berkualitas tinggi, unsur-unsur penting termasuk kalium, fosfor, dan nitrogen harus seimbang (Asie, dkk. 2025). Pengendalian durasi dan intensitas cahaya sangat penting, terutama untuk tanaman yang sensitif terhadap fotoperiode. Faktor suhu dan kelembapan berpengaruh terhadap produksi dan pelepasan serbuk sari, sehingga apabila kondisi ekstrem dapat

menurunkan kualitas maupun kuantitas polen. Karakteristik pembungaan termasuk waktu berbunga, durasi fase berbunga, serta mekanisme pelepasan serbuk sari, perlu dipahami agar penyerbukan dapat dilakukan pada saat yang tepat, terutama pada fase anthesis (Zulfahmi, dkk. 2022). Menyelaraskan waktu berbunga antara induk dapat dicapai melalui penanaman bertahap, menyesuaikan fotoperiod, suhu, kepadatan tanam, memangkas bunga tua, atau memotong tunas untuk merangsang pertumbuhan bunga baru. Usia bunga secara fisiologis penting untuk keberhasilan penyerbukan, biasanya emaskulasi dilakukan pada tahap kuncup sebelum penyerbukan alami. Bunga dengan lokasi tertentu, seperti di tengah atau bagian bawah, seringkali menghasilkan hasil yang lebih baik daripada yang di bagian atas. Sehingga bunga yang dipilih harus ditandai untuk memudahkan identifikasi selama proses pemuliaan.

8.4 Teknik Hibridisasi (Emaskulasi dan Polinasi)

Emaskulasi adalah proses penghilangan organ jantan (anther) pada bunga. Namun, emaskulasi tidak selalu diperlukan dalam persilangan buatan, terutama pada tanaman yang secara alami mengatur fertilitas melalui protogini, sterilitas jantan, inkompatibilitas sendiri, *monoecy*, atau *dioecy*. Keberhasilan emaskulasi ditentukan oleh kesesuaian waktu antara kesiapan stigma (reseptivitas) dan daya hidup serbuk sari (viabilitas polen). Penghilangan antera umumnya dilakukan sebelum mencapai kematangan, sehingga pada saat tersebut stigma belum berada dalam kondisi optimal untuk menerima polen (Mirnawati, dkk. 2022). Interval ini perlu dikelola, karena semakin lama jarak antara emaskulasi dan penyerbukan, semakin tinggi kemungkinan terjadinya kontaminasi oleh polen asing. Teknik emaskulasi dapat diklasifikasikan menjadi dua yaitu secara mekanis (langsung) dan nonmekanis (tidak langsung). Pada pendekatan langsung, benang sari diambil menggunakan alat seperti pinset. Tindakan ini biasanya diawali dengan pengurangan jumlah bunga dan disesuaikan dengan bentuk serta susunan organ bunga, misalnya dengan membuka bagian pelindung bunga atau memotong bagian tertentu seperti floret. Sebaliknya, pendekatan tidak langsung dilakukan melalui perlakuan suhu, alkohol, maupun gametosida.

Usia dan kualitas serbuk sari, serta waktu penyerbukan, berpengaruh pada keberhasilan polinasi dalam persilangan tanaman. Tanaman tertentu, seperti kedelai, tidak memerlukan penyimpanan serbuk sari karena polinasi terjadi segera setelah emaskulasi. Dalam penelitian lain, serbuk sari dapat dikumpulkan dan disimpan pada suhu dan tingkat kelembapan tertentu dalam wadah seperti cawan petri untuk menjaga vitalitasnya. Biasanya, serbuk sari diaplikasikan langsung ke stigma menggunakan kuas kecil atau alat sederhana seperti kapas atau tusuk gigi. Namun, pada bunga tertentu, serbuk sari dapat disebar dengan menggoyangkan kantong tertutup.

Beberapa ratus kombinasi per tanaman setiap tahun biasanya sudah cukup untuk spesies yang F1-nya tidak layak secara komersial, tetapi spesies hibrida atau tanaman dengan produksi biji yang tinggi, seperti tomat atau tembakau, mungkin memerlukan lebih banyak persilangan untuk menemukan kombinasi heterosis yang ideal. Jumlah persilangan F1 yang dilakukan bergantung pada kemudahan teknik persilangan, sumber daya, dan tujuan pemuliaan.

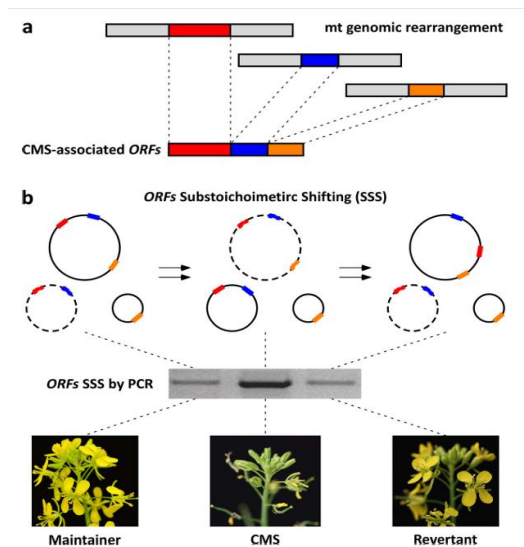
8.5 Teknologi Pendukung Produksi Benih Hibrida

Keturunan generasi pertama (F1) dari persilangan antara dua induk yang berbeda memiliki perkembangan, kekuatan, dan potensi hasil yang lebih baik daripada salah satu atau kedua induk karena fenomena genetik yang disebut vigor hibrida. Hipotesis dominan dan over dominansi memberikan penjelasan ilmiah untuk asal mula heterosis pada hibrida. Hipotesis over dominansi menggambarkan heterosis sebagai superioritas heterozigositas atas homozigositas, yang berarti bahwa orang dengan jumlah alel heterozigot terbanyak berkinerja lebih baik. Sebaliknya, hipotesis dominan menyatakan bahwa kekuatan hibrida dihasilkan dari akumulasi gen dominan dalam satu genotipe.

8.5.1 Cytoplasmic Male Sterile (CMS).

Penemuan galur *wild abortive* (WA) menggunakan pendekatan tiga galur membuat heterosis dapat dieksploitasi secara komersial. Tiga galur ini adalah Pelestari (B), Pemulih (R), dan galur *Cytoplasmic Male Sterile* (CMS). Galur CMS memungkinkan produksi benih hibrida tanpa emaskulasi, yang meningkatkan efektivitas biaya. Gen

pemulih kesuburan (Rf) memulihkan infertilitas jantan, yang diwarisi dari ibu (Widyastuti, dkk. 2022). Penciptaan teknologi padi hibrida didasarkan pada interaksi antara genom inti dan mitokondria dalam sistem CMS/Rf (Hanson & Bentolila, 2004). Sitoplasma normal (N) adalah sitoplasma yang tidak mengandung gen penyebab kemandulan, sedangkan sitoplasma steril (S), atau CMS, adalah sitoplasma yang menyebabkan kemandulan jantan.



Gambar 8.2. Pembentukan ORF yang berkaitan dengan CMS serta pergeseran substoikiometri pada galur CMS, pemelihara, dan revertan (a) ORF terkait CMS terbentuk akibat penataan ulang pada genom mitokondria (b) Rekombinasi homolog antarmolekul mengakibatkan pergeseran substoikiometri ORF terkait CMS, yang berdampak pada perubahan kondisi steril dan fertil (sumber: Xu, dkk. 2022).

CMS telah diterapkan pada berbagai tanaman seperti sorghum, jagung, lobak, kubis, sawi, wortel serta bermanfaat dalam pemuliaan tanaman hias karena keturunan bersifat mandul jantan sehingga tidak menghasilkan buah. Akibatnya, tanaman tetap segar, berbunga lebih lama, meningkatkan nilai estetika dan masa berbunga. Pada sayuran yang bagian vegetatifnya menjadi hasil utama, pembentukan hibrida (F1)

dapat dilakukan dengan menyilangkan galur CMS dengan galur pemelihara yang bersifat heterotik dan tidak memiliki gen pemulih kesuburan (Romero, dkk. 2024). Proses ini tidak memerlukan sistem pemulih kesuburan, akibatnya pengembangan galur pemulih dalam program pemuliaan hibrida pada tanaman tersebut relatif terbatas. Famili *Brassicaceae* termasuk kelompok tanaman yang paling banyak dimanfaatkan dalam pengembangan CMS. Sitoplasma (*Ogura*) pertama kali diidentifikasi pada lobak namun, pemanfaatannya berkembang luas setelah dipindahkan ke dalam *Brassica napus* melalui hibridisasi interspesifik dilanjutkan dengan persilangan balik secara berulang (Xu, dkk. 2022).

Tabel 8.1. Contoh CMS, ORF, dan gen Rf pada tanaman sayuran

Spesies	Tipe CMS	ORF terkait	Rf	Referensi
Radish (<i>Raphanus sativus</i>)	Ogura ^a	ORF138	Rfo	(Brown, dkk. 2003)
Mustard (<i>Brassica juncea</i>)	ORF220	ORF220	-	(Yang, dkk. 2005)
Common bean (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	Sprite	ORF239	-	(Abbad, dkk. 1995)
Faba bean (<i>Vicia faba</i>)	CMS199/CMS297	-	-	(Link, dkk. 1997)
Pepper (<i>Capsicum annuum</i>)	Peterson ^a	ORF456/ORF507	CaPPR6	(Kim, dkk. 2007)
Carrot (<i>Daucus carota</i>)	Petaloid	ORFB	-	(Nakajima, 2001)
Eggplant (<i>Solanum melongena</i>)	Anther indehiscent	ORF132	-	(Kim, dkk. 2006)
Sugar beet (<i>Beta vulgaris</i>)	Owen	preSatp6	Rf1, Rf2	(Matsuhira, 2012)
Onion (<i>Allium cepa</i>)	S ^a	ORF725	Ms	(Kim, dkk. 2009)
Welsh onion (<i>Allium fistulosum</i>)	S	atpA	-	(Liu, dkk. 2019)
Chives (<i>Allium schoenoprasum</i>)	S	ORFA501	-	(Engelke, dkk. 2000)

8.5.2 Environment-Sensitive Genetic Male Sterility (EGMS)

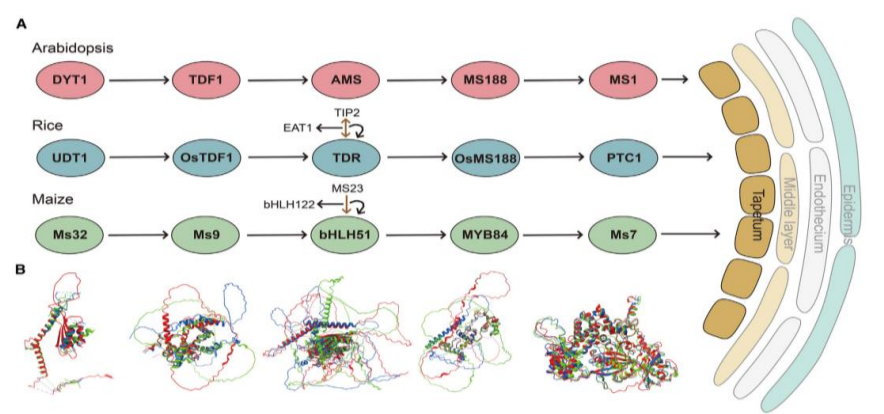
Pengembangan padi hibrida tidak terbatas pada sistem tiga galur; dapat juga dilakukan dengan metode dua galur yang dikenal dengan nama *Environment-Sensitive Genetic Male Sterility* (EGMS). Metode ini memanfaatkan galur yang tingkat kesuburannya dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, sehingga dalam praktiknya tidak diperlukan pemulih kesuburan maupun keberadaan galur pemelihara. Faktor utama yang berperan adalah panjang hari dan suhu, yang memengaruhi pembentukan serta viabilitas serbuk sari. Berdasarkan respons tersebut, dikenal dua tipe utama, yaitu *photo-sensitive genetic male sterility* (PGMS) yang dipengaruhi oleh fotoperiode, serta *thermo-sensitive genetic male sterility* (TGMS) yang dikendalikan oleh suhu (Liu, dkk. 2023).

Tabel 8.2. Contoh Gen EGMS pada Tanaman

Species	Gene Name	Gene Product	Type of EGMS	Pathway	Reference
Rice	UGP1	UDP-glucose pyrophosphorylase 1	TGMS	RNA processing	(Chen, dkk. 2007)
Maize	TMS5	RNase ZS1	TGMS	mRNA decay	(Li, dkk. 2017)
Brassica	BnChimer a	mtHSP70-like protein	rTGMS	Fatty acid synthesis	(Xu, dkk. 2023)
Barley	HvMS1	PHD finger protein	rTGMS	Transcription regulation	(Fernandez, 2020)
Soybean	MS3	PHD finger protein	rPGMS	Transcription regulation	(Hou, dkk. 2022)

Pembentukan pollen fungsional merupakan proses kritis dalam sistem P/TGMS, karena kualitas dan viabilitas pollen sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan. Pollen berkembang di dalam antera, yang tersusun dari empat lapisan utama: epidermis, endothecium, lapisan tengah (*middle layer*), dan tapetum. Keempat lapisan ini membentuk struktur pelindung dan nutrisi bagi sel-sel

reproduktif yang terdapat di dalamnya (Goldberg, dkk. 1993). Lapisan tapetum, yang terletak paling dalam, memainkan peran sentral dalam pembentukan pollen. Tapetum menyediakan nutrisi, berkontribusi pada sintesis dinding pollen, dan membantu pelepasan mikrospora yang matang. Proses degradasi tapetum melalui *programmed cell death* (PCD) yang tepat waktu sangat penting untuk memastikan perkembangan mikrospora berjalan normal. Jika degradasi tapetum terjadi terlalu cepat atau terlambat, pollen dapat mengalami malformasi atau kehilangan fertilitas (Wang, dkk. 2025). Regulasi fungsi tapetum dikendalikan oleh jaringan gen yang bekerja secara berurutan (*temporal cascade*), dan pola ekspresinya menunjukkan kesamaan pada berbagai spesies model tanaman, seperti *Arabidopsis*, padi, dan jagung. Pemahaman mendalam tentang mekanisme ini menjadi kunci bagi pengembangan varietas sterilisasi genetik atau sistem P/TGMS, karena mempengaruhi stabilitas pembungaan dan keberhasilan reproduksi tanaman di bawah berbagai kondisi lingkungan.



Gambar 8.3. Mekanisme pengaturan perkembangan tapetum pada *arabidopsis*, padi, dan jagung serta konservasi faktor transkripsi (Sumber: Wang, dkk. 2025).

Jalur regulasi perkembangan tapetum pada *Arabidopsis*, padi, dan jagung yang dikendalikan oleh rangkaian gen yang bekerja secara berurutan (kaskade gen) untuk mendukung pembentukan polen. Meskipun ketiga tanaman memiliki jalur

yang serupa, padi dan jagung memiliki tambahan gen spesifik seperti TIP2 dan EAT1 pada padi serta MS23 dan bHLH122 pada jagung yang memperkuat proses tersebut (gambar 10.3). Selain itu, kesamaan struktur protein antar gen pada ketiga spesies menunjukkan bahwa mekanisme dasar pengaturan tapetum bersifat konservatif, meskipun terdapat perbedaan adaptasi pada masing-masing tanaman.

8.6 Interaksi Genetik dalam Hibridisasi

Hibridisasi menimbulkan berbagai perubahan genetik karena menggabungkan dua set gen dari tetua yang berbeda menjadi susunan genetik baru melalui meiosis. Variasi ini menjadi dasar bagi munculnya sifat-sifat unggul. Hibridisasi bukan hanya sekadar penggabungan gen, tetapi juga proses strategis untuk menciptakan kombinasi genetik yang optimal bagi peningkatan kualitas tanaman.

8.6.1 Efek Langsung dalam Hibridisasi

Perkawinan silang antar tetua tentunya memicu proses genetik yang berbeda sejak generasi pertama. Dalam satu sistem, kombinasi gen yang sebelumnya berbeda mulai berinteraksi, menghasilkan berbagai konsekuensi pada perkembangan tanaman. Tergantung pada seberapa baik kedua gen tersebut bekerja bersama, konsekuensi ini dapat menguntungkan atau merugikan. Di antara dampak yang muncul menurut Acquaaah (2009) adalah:

1. **Ekspresi gen letal resesif**

Persilangan memungkinkan gen letal resesif (sebelumnya heterozigot) menjadi homozigot, sehingga dapat terekspresi. Akibatnya hibrida tersebut dapat mati atau menjadi kurang kuat. Dalam kondisi heterozigot, hibridisasi berpotensi menyembunyikan ekspresi alel resesif. Setiap individu memiliki beban genetik tersembunyi berupa gen resesif mematikan yang dapat muncul melalui penyerbukan sendiri.

2. **Segregasi transgresif**

Individu hasil hibridisasi tidak selalu mencerminkan rata-rata sifat kedua tetua. Beberapa dapat menyerupai salah satu induk, sementara yang lain justru menampilkan karakter baru yang lebih ekstrem dibandingkan keduanya, yang dikenal sebagai segregasi transgresif.

3. Heterosis (vigor hibrida)

Heterosis merupakan fenomena kebalikan dari *inbreeding depression*, dimana persilangan menghasilkan performa atau peningkatan daya hidup yang ditunjukkan melalui peningkatan pertumbuhan dan hasil. Heterosis tidak selalu menunjukkan arah yang sama, karena dapat memberikan efek menguntungkan maupun sebaliknya. Pengukurannya meliputi perbandingan dengan rata-rata tetua, tetua terbaik, dan varietas standar, dengan yang terakhir paling penting karena langsung dibandingkan dengan varietas unggul di lapangan.

4. Nekrosis hibrida

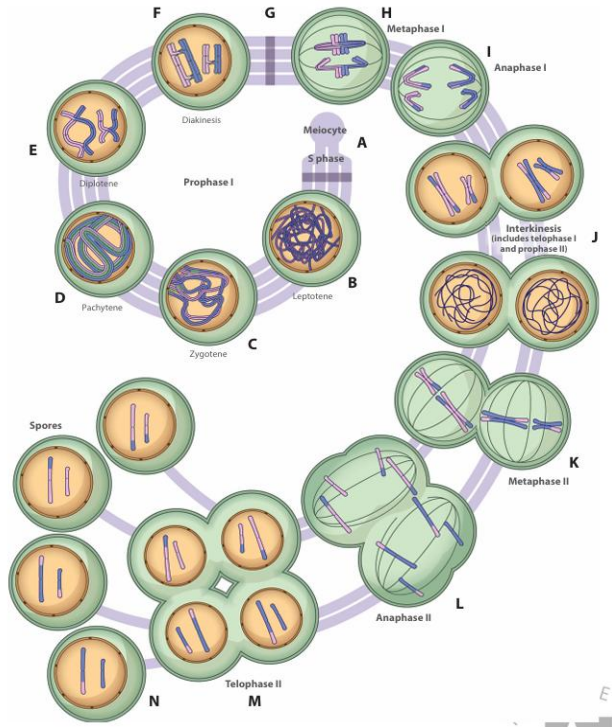
Dapat terjadi akibat persilangan antara tanaman berkerabat jauh. Interaksi gen yang tidak kompatibel menyebabkan kondisi ini dan yang mengganggu fisiologis tanaman.

5. Ketidakcocokan genom-plastom

Mirip dengan kloroplas, plastida memiliki materi genetiknya sendiri yang biasanya mendukung fungsi fisiologis dan metabolik dengan bekerja sama dengan genom inti tumbuhan. Namun, genom inti dan plastom tidak selalu kompatibel dalam beberapa persilangan. hanya kombinasi yang tepat yang mampu mempertahankan fungsi yang benar, yang menyebabkan ketidakkompatibilitas ini. Tumbuhan dapat terjadi masalah fisiologis atau pertumbuhan abnormal ketika kombinasi ini tidak kompatibel.

8.6.2 Efek Lanjutan dalam Hibridisasi

Pada generasi F₂ dan seterusnya, keragaman genetik yang dihasilkan dari persilangan biasanya menjadi lebih terlihat. Hal ini terjadi sebagai hasil dari kemampuan generasi F₁ untuk menggabungkan kembali gen dari kedua induk melalui penyerbukan sendiri. Mekanisme utama yang mendasari proses ini adalah meiosis, yakni pembelahan sel reproduksi yang menghasilkan gamet dengan jumlah kromosom setengah dari induknya.



Gambar 8.4. Gambaran umum meiosis dimana segregasi alel dan rekombinasi genetik melalui *crossing over* pada tahap pachytene (Sumber: Mercier, dkk. 2025).

Selama meiosis, alel-alel dipisahkan dan kromosom homolog dapat bertukar segmen melalui *crossing over*, sehingga menimbulkan kombinasi genetik baru yang lebih beragam. Dengan demikian, interaksi antara segregasi alel dan pertukaran kromosom pada meiosis menjadi faktor penting dalam memperluas keragaman genetik keturunan.

8.6.3 Persilangan Divergen

Persilangan divergen dilakukan dengan menyilangkan induk yang berbeda secara genetik. Induk dipilih yang memiliki sifat positif terbanyak dan sifat buruk paling sedikit, tanpa sifat negatif yang sama, untuk hasil terbaik. Metode ini memastikan bahwa rekombinan yang memiliki kedua set sifat yang diinginkan akan muncul dalam jumlah signifikan di F₂, sedangkan F₁ mengandung

jumlah maksimum gen yang diinginkan dari kedua induk. Diantara teknik untuk persilangan divergen adalah:

1. *Single cross*: Dalam kasus dua garis elite yang sudah memiliki semua sifat unggulan, satu persilangan sederhana ($A \times B$) biasanya cukup untuk memenuhi kebutuhan program pemuliaan.
2. *Double cross*: Metode ini menggabungkan dua *single cross* $\{[(A \times B) \times (C \times D)]\}$, sehingga menghasilkan hibrida dengan keragaman genetik lebih besar. Namun, prosesnya lebih memakan waktu dan peluang munculnya rekombinan F2 dengan gen yang diinginkan rendah.
3. *Three-way cross*: Contohnya, persilangan bertingkat $[(A \times B) \times C]$, di mana induk ketiga (C) dipilih agar sesuai dengan lingkungan target.
4. *Diallel cross*: Tiap induk disilangkan dengan semua induk lain dalam kelompok (*complete diallel*), sehingga tercipta $n(n - 1)/2$ kombinasi gen. Versi *partial diallel* hanya membuat sebagian kombinasi. Karena membutuhkan banyak persilangan, metode ini kurang efisien untuk tanaman yang menyerbuki sendiri dan lebih digunakan untuk tujuan penelitian genetika daripada membentuk populasi pemuliaan.

8.6.4 Persilangan Konvergen

Persilangan konvergen adalah strategi pemuliaan konservatif yang berfokus pada peningkatan kultivar yang sudah ada dengan kualitas spesifik tanpa menghilangkan sifat unggulnya. Teknik ini, yang biasanya hanya digunakan sekali selama prosedur persilangan awal, menggunakan satu atau lebih induk sebagai donor gen spesifik (Nur, dkk. 2017). Untuk memastikan bahwa semua kualitas unggul dipertahankan dan sifat-sifat baru dari donor berhasil diturunkan kepada keturunan, langkah selanjutnya melibatkan persilangan berulang dengan induk terpilih (*reccurent parent*). Persilangan balik (*backcrossing*), yang memperkenalkan sifat-sifat spesifik dari induk donor ke dalam populasi yang sudah ada sambil mempertahankan sifat-sifat unggul keseluruhan dari *reccurent parent*, adalah salah satu strategi persilangan konvergen yang paling populer.

8.7 Produksi Benih Hibrida Di Lapangan

Produksi benih hibrida di lapangan melibatkan variabel lingkungan, metode budidaya, dan pengelolaan yang lebih rumit daripada tahap hibridisasi terkontrol pada skala penelitian. Pada tanaman padi yang secara alami menyerbuk sendiri, proses hibridisasi menjadi lebih menantang karena diperlukan intervensi untuk menghindari terjadinya penyerbukan sendiri. Proses hibridisasi dimulai dengan seleksi tetua, diikuti dengan persilangan terkontrol, dan diakhiri dengan seleksi galur-galur yang dihasilkan.

Hibridisasi pada padi bertujuan untuk meningkatkan kualitas biji, termasuk kandungan amilosa, tekstur, dan daya tahan simpan, di samping meningkatkan produktivitas. Selain itu, berbagai fitur adaptif tertentu, termasuk ketahanan terhadap kekeringan, kemampuan beradaptasi terhadap pasang surut, dan toleransi terhadap salinitas, dapat dikombinasikan melalui hibridisasi. Untuk menghasilkan varietas unggul, seleksi tetua merupakan fase penting dalam hibridisasi padi. Oleh karena itu, untuk menjamin kinerja agronomi terbaik bagi keturunan selanjutnya, seleksi tetua tidak dapat dilakukan secara acak, melainkan membutuhkan strategi yang metodis dan berbasis data.



Gambar 8.5. Alur teknik perakitan varietas padi
(Sumber: Singh, 2001).

Pemilihan tetua tidak hanya didasarkan pada pengamatan fenotipik, tetapi juga memerlukan evaluasi yang lebih mendalam melalui pendekatan agronomi, fisiologis, dan molekuler. Evaluasi

agronomi dilakukan dengan mengamati karakter morfologi dan komponen hasil, seperti tinggi tanaman, umur panen, jumlah anakan produktif, dan ketahanan terhadap rebah. Sementara itu, evaluasi fisiologis mencakup efisiensi fotosintesis, ketahanan terhadap cekaman abiotik, serta efisiensi penggunaan air. Selain itu, pendekatan molekuler melalui *marker-assisted selection* (MAS) digunakan untuk mengidentifikasi gen-gen unggul yang berperan dalam ketahanan, produktivitas, dan adaptasi lingkungan, sehingga proses seleksi menjadi lebih cepat dan akurat (Sasaki, dkk. 2018).

Selain karakter unggul, kompatibilitas genetik antar tetua juga menjadi faktor penting dalam keberhasilan hibridisasi. Tetua yang memiliki latar belakang genetik berbeda cenderung menghasilkan keturunan dengan vigor hibrida (heterosis) yang lebih tinggi. Untuk memastikan hal tersebut, dilakukan analisis silsilah guna menghindari kekerabatan yang terlalu dekat, analisis heterosis untuk mengidentifikasi kombinasi tetua terbaik, serta penggunaan marker molekuler untuk mengonfirmasi perbedaan genetik yang signifikan. Selanjutnya, dalam proses hibridisasi dilakukan prosedur seleksi secara bertahap untuk mendapatkan galur terbaik. Tahap awal dilakukan melalui seleksi fenotipik pada generasi awal (F2–F4) berdasarkan penampilan morfologi. Galur terpilih kemudian diuji melalui uji lapangan untuk mengevaluasi produktivitas dan ketahanan dalam kondisi nyata. Tahap berikutnya adalah uji multilokasi (F6–F8) untuk menilai stabilitas dan adaptabilitas pada berbagai lingkungan (Sholikhah, dkk. 2025). Selain itu, seleksi genotipe menggunakan teknologi molekuler dilakukan untuk mempercepat identifikasi galur unggul yang memiliki sifat-sifat yang diinginkan. Dalam praktiknya, pemilihan tetua sering menjadi titik kritis yang menentukan keberhasilan atau kegagalan program pemuliaan. Tidak jarang tetua dengan performa tinggi secara individu justru menghasilkan keturunan dengan performa yang tidak sesuai harapan akibat interaksi genetik yang kompleks. Oleh karena itu, pengalaman empiris dan pemahaman mendalam terhadap karakter genetik menjadi sama pentingnya dengan data hasil evaluasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Abad, A.R., Mehrtens, B.J. & Mackenzie, S.A., 1995. Specific expression in reproductive tissues and fate of a mitochondrial sterility associated protein in cytoplasmic male-sterile bean. *Plant Cell*, 7, pp.271–285.
- Acquaah, G., 2009. *Principles of plant genetics and breeding*. Hoboken: John Wiley & Sons.
- Arruum, Z.S., 2021. *Kompatibilitas penyerbukan sendiri dan persilangan interspesifik pada ciplukan (Genus Physalis) berbeda spesies*. Doctoral dissertation, Universitas Brawijaya.
- Asie, E.R. et al., 2025. *Nutrisi tanaman dan pemupukan*. Malang: Azzia Karya Bersama.
- Barclay, A., 2010. Hybridizing the world. *Rice Today*, 9(4), pp.32–34.
- Brown, G.G. et al., 2003. The radish Rfo restorer gene of Ogura cytoplasmic male sterility encodes a protein with multiple pentatricopeptide repeats. *Plant Journal*, 35, pp.262–272.
- Chen, R. et al., 2007. Rice UDP-Glucose Pyrophosphorylase1 is essential for pollen callose deposition and its cosuppression results in a new type of thermosensitive genic male sterility. *Plant Cell*, 19, pp.847–861.
- Dwivedi, S.L. et al., 2021. First the seed: Genomic advances in seed science for improved crop productivity and food security. *Crop Science*, 61(3), pp.1501–1526.
- Engelke, T. & Tatlioglu, T., 2000. Genetic analyses supported by molecular methods provide evidence of a new genic (st1) and a new cytoplasmic (st2) male sterility in *Allium schoenoprasum* L. *Theoretical and Applied Genetics*, 101, pp.478–486.
- FAO, 2023. *The state of food and agriculture 2023*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Fernández-Gómez, J., Talle, B. & Wilson, Z.A., 2020. Increased expression of the MALE STERILITY1 transcription factor gene results in temperature-sensitive male sterility in barley. *Journal of Experimental Botany*, 71, pp.6328–6349.
- Gangashetty, P.I. et al., 2024. Challenges and opportunities of pearl millet hybrid development and seed production in West

- Africa. In: *Pearl Millet: A Resilient Cereal Crop for Food, Nutrition, and Climate Security*. pp.207–224.
- Goldberg, R.B., Beals, T.P. & Sanders, P.M., 1993. Anther development: Basic principles and practical applications. *Plant Cell*, 5, pp.1217–1229.
- Hanson, M.R. & Bentolila, S., 2004. Interaction of mitochondrial and nuclear genes that affect male gametophyte development. *Plant Cell*, 164, pp.154–169.
- Hou, J. et al., 2022. MALE STERILITY 3 encodes a plant homeodomain-finger protein for male fertility in soybean. *Journal of Integrative Plant Biology*, 64, pp.1076–1086.
- Kim, D.H. & Kim, B.D., 2006. The organization of mitochondrial atp6 gene region in male fertile and CMS lines of pepper (*Capsicum annuum* L.). *Current Genetics*, 49, pp.59–67.
- Kim, D.H., Kang, J.G. & Kim, B.D., 2007. Isolation and characterization of the cytoplasmic male sterility-associated orf456 gene of chili pepper (*Capsicum annuum* L.). *Plant Molecular Biology*, 63, pp.519–532.
- Kim, S. et al., 2009. Identification of a novel chimeric gene, orf725, and its use in development of a molecular marker for distinguishing among three cytoplasm types in onion (*Allium cepa* L.). *Theoretical and Applied Genetics*, 118, pp.433–441.
- Krismawati, A., 2016. Potensi hasil galur-galur harapan padi hibrida di lahan sawah Kabupaten Malang, Provinsi Jawa Timur. *Buletin Plasma Nutfah*, 22(1), pp.21–30.
- Li, J. et al., 2017. Generation of thermosensitive male-sterile maize by targeted knockout of the ZmTMS5 gene. *Journal of Genetics and Genomics*, 44, pp.465–468.
- Link, W. et al., 1997. Detection and characterization of two new CMS systems in faba bean (*Vicia faba*). *Plant Breeding*, 116, pp.158–162.
- Liu, D., Shi, J., Liang, W. & Zhang, D., 2023. Molecular mechanisms underlying plant environment-sensitive genic male sterility and fertility restoration. *Seed Biology*, 2(1).
- Liu, Q.C. et al., 2019. Comparative analysis of male sterility associated ATPase isoenzymes and atpA genes in a Welsh onion (*Allium*

- fistulosum* L.) cytoplasmic male sterility line and its maintainer line. *Scientia Horticulturae*, 243, pp.101–106.
- Luthfia, J.L.J., Suharno, S. & Wijayanto, B.W.B., 2025. Peningkatan produktivitas benih jagung (*Zea mays* L.) hibrida varietas MZ dengan pengaturan split planting: Penelitian. *Jurnal Pengabdian Masyarakat dan Riset Pendidikan*, 3(4), pp.2868–2875.
- Matsuhira, H. et al., 2012. Unusual and typical features of a novel restorer-of-fertility gene of sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *Genetics*, 192, pp.1347–1359.
- Mercier, R. et al., 2015. The molecular biology of meiosis in plants. *Annual Review of Plant Biology*, 66, pp.297–327.
- Mirawati, M. et al., 2022. Pengaruh waktu emaskulasi terhadap keberhasilan persilangan beras hitam × beras putih dan evaluasi karakter agronomi tetua persilangan. *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, 8(1), pp.209–221.
- Mishra, D.K., 2025. *Principles of genetics and plant breeding*. New Delhi: Addition Publishing House.
- Nakajima, Y. et al., 2001. A novel orfB related gene of carrot mitochondrial genomes that is associated with homeotic cytoplasmic male sterility (CMS). *Plant Molecular Biology*, 46, pp.99–107.
- Nur, A., Syahrudin, K. & Pabendon, M.B., 2017. Keragaman genetik populasi gandum hasil persilangan konvergen. *Penelitian Pertanian Tanaman Pangan*, 1(2), pp.143–152.
- Oktakia, M.D., Hayati, P.D. & Harnas, H., 2025. Combining ability of inbred lines, performance, and heterosis of single-cross maize (*Zea mays* L.) hybrids. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Pertanian*, 9(2), pp.56–67.
- Purify, A. et al., 2024. Perubahan iklim dan risiko keamanan nasional: Kajian mengenai kesiapsiagaan pertahanan Indonesia. *Jurnal Elektrosista*, 12(1), pp.1–11.
- Romero-Munoz, M. & Perez-Jimenez, M., 2024. Optimizing *Brassica oleracea* L. breeding through somatic hybridization using cytoplasmic male sterility (CMS) lines: from protoplast isolation to plantlet regeneration. *Plants*, 13(22), 3247.

- Sasaki, T., Ashikari, M. & Springerlink, 2018. *Rice genomics, genetics and breeding*. Singapore: Springer.
- Sholikhah, U. et al., 2025. *Padi unggul: Ilmu pemuliaan menuju swasembada dan ketahanan pangan*. Malang: Inara Publisher.
- Singh, B.D., 2001. *Plant breeding: Principles and methods*. New Delhi: Kalyani Publishers.
- Tester, M. & Langridge, P., 2010. Breeding technologies to increase crop production in a changing world. *Science*, 327(5967), pp.818–822.
- Ujiyanto, L., 2013. *Pemuliaan tanaman kacang-kacangan melalui hibridisasi antar spesies*. Malang: Universitas Brawijaya.
- Wang, N. et al., 2025. Molecular and cellular mechanisms of photoperiod- and thermo-sensitive genic male sterility in plants. *Molecular Plant*, 18(1), 26–41.
- Widyastuti, Y. et al., 2022. Produksi benih padi hibrida: Kemajuan, tantangan, dan peluang pengembangan di Indonesia. *Jurnal Penelitian dan Pengembangan Pertanian*, 41(1), pp.12–20.
- Xu, L. et al., 2023. Microspore-expressed SCULP1 is required for p-coumaroylation of sporopollenin, exine integrity, and pollen development in wheat. *New Phytologist*, 239, pp.102–115.
- Xu, F. et al., 2022. Exploiting sterility and fertility variation in cytoplasmic male sterile vegetable crops. *Horticulture Research*, 9, uhab039.
- Yang, J.H. et al., 2005. Identification of alloplasmic cytoplasmic male-sterile line of leaf mustard synthesized by intra-specific hybridization. *Plant Science*, 168, pp.865–871.
- Yoshida, H. & Nagato, Y., 2011. Flower development in rice. *Journal of Experimental Botany*, 62(14), pp.4719–4730.
- Zulfahmi, Z., Batubara, R.S. & Rosmaina, R., 2022. Viability of pollen and success of crosses between Montong and Sitokong durian at three different times. *Agrotechnology Research Journal*, 6(2), pp.103–109.

BAB 9

TEKNOLOGI PRODUKSI BENIH MELALUI REKAYASA GENETIKA

9.1 Konsep Dasar Rekayasa Genetika dalam Produksi Benih

Demi mewujudkan ketahanan pangan nasional di Indonesia maka ketersediaan benih yang bermutu menjadi suatu kewajiban yang harus dipenuhi. Untuk itu varietas unggul sangat diperlukan dalam rangka peningkatan produksi dan produktivitas pertanian. Pemuliaan konvensional merupakan cara yang dapat dipilih untuk menghasilkan varietas unggul tanaman pangan. Benih varietas unggul sendiri menyumbangkan kontribusi yang sangat besar untuk ketahanan pangan nasional. Tetapi, teknik pemuliaan konvensional memiliki beberapa kekurangan, seperti mengalami keterbatasan dalam proses penyilangan untuk memperoleh karakter tertentu yang diinginkan sehingga inovasi teknologi melalui rekayasa genetik (bioteknologi) menjadi alternatif untuk mengatasi kekurangan tersebut (Hendriyanto, 2021).

Rekayasa genetika memungkinkan transfer gen dari berbagai sumber hidup untuk pengembangan varietas tanaman unggul. Ini merupakan terobosan penting, karena karakteristik yang diinginkan tidak selalu ada pada spesies terkait dan oleh karena itu tidak dapat ditransfer menggunakan teknik pemuliaan konvensional. Pengenalan gen yang bermanfaat dari berbagai organisme dimungkinkan karena kode genetik bersifat universal, yaitu DNA dari semua organisme terdiri dari blok pembangun yang sama dan dikodekan dengan cara yang persis sama. Salinan urutan DNA (atau gen) yang mengkodekan karakteristik tertentu dapat ditransfer ke dalam sel organisme yang berbeda (Rifka Alkhilyatul Ma'rifat, I Made Suraharta, 2024).

Benih dan tanaman hasil rekayasa genetika (*Genetically Modified*) dikembangkan dengan penerapan bioteknologi modern, di mana materi genetik dasar (DNA) telah diubah menggunakan teknik rekayasa genetika (*Genetically Engineering*). Pada umumnya tujuannya adalah untuk memperkenalkan sifat baru pada tanaman seperti ketahanan terhadap hama, ketahanan terhadap penyakit, toleransi herbisida, peningkatan kualitas produk, dll. Rekayasa genetika merupakan rangkaian teknik yang mutakhir secara keseluruhan tetapi prinsipnya cenderung sederhana sehingga memungkinkan untuk dilakukan isolasi gen atau sekelompok gen dari sebuah sel dan memindahkannya ke sel lain (sel penerima). Gen atau sekelompok gen yang dipindahkan tersebut mampu menyatu dan menjalankan reaksi biokimia dengan gen atau sekelompok gen pada sel penerima tersebut (Sutrisno and Wardani, 2023).

Rekayasa genetika sebenarnya sudah dilakukan sejak dahulu kala oleh petani dengan cara yang sangat sederhana lewat kegiatan penyilangan tanaman untuk memperbaiki sifat tanaman agar menjadi sifat yang dimiliki lebih baik lebih misalnya lebih tahan terhadap hama dan penyakit. Bahkan di jaman dahulu, para petani dan para pemulia tanaman telah berhasil menyilangan tanaman seperti jagung, tebu dan padi sehingga mempunyai daya hasil tinggi dan kualitas panen yang lebih baik (Sutrisno and Wardani, 2023)

Praktik pemuliaan tanaman secara tradisional telah dimulai sejak 10.000 tahun silam dan telah mengalami banyak penyempurnaan substansial pada abad terakhir ini yang melibatkan pemilihan tanaman induk dengan sifat-sifat yang menguntungkan untuk menghasilkan keturunan yang lebih baik (Kaiser *et al.*, 2020). Pemuliaan ini mengembangkan tanaman dengan sifat-sifat yang diinginkan melalui metode seperti seleksi galur murni dan hibridisasi, meskipun merupakan proses yang panjang dan sangat bergantung pada fenotipe tanaman. Karena sifat-sifat fenotipe dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, pendekatan ini memiliki presisi yang terbatas (Lamichhane *et al.*, 2022).

Di sisi lain, rekayasa genetika menggunakan metode yang sangat berbeda untuk menghasilkan tanaman yang lebih baik. Alih-alih mengandalkan rekombinasi seksual untuk mencampur gen induk secara menyeluruh seperti pada pemuliaan tanaman konvensional, rekayasa genetika mempertahankan integritas genotipe induk dengan hanya menyisipkan sedikit informasi tambahan yang mengontrol sifat tertentu. Hal ini dilakukan dengan menyambungkan potongan DNA asing yang telah dikarakterisasi dengan baik yang mengandung gen yang diketahui ke dalam kromosom spesies inang menggunakan enzim "restriksi". Enzim restriksi memotong untai DNA panjang yang membentuk kromosom pada tempat yang sangat spesifik dan dengan cara yang sangat berulang, sehingga fragmen DNA asing, yang dipotong dengan enzim restriksi yang sama, dapat dimasukkan dan diintegrasikan ke dalam kromosom tanaman inang pada situs restriksi (Manshardt, 1985).

9.2 Teknik-Teknik Rekayasa Genetika pada Tanaman

Percepatan pengembangan varietas tanaman dapat dilakukan melalui teknik-teknik rekayasa genetika. Ribuan publikasi telah mengevaluasi keamanan tanaman hasil rekayasa genetika dan sebagian besar menunjukkan bahwa dampak bagi makanan dan keamanan lingkungan tidak jauh berbeda dengan tanaman yang dibudidayakan secara tradisional (Andayani et al, 2023). Terdapat beberapa teknik atau metode dalam menghasilkan produk rekayasa genetika seperti tanaman dan benih. Teknik-teknik tersebut antara lain melalui transformasi genetik, RNA Interference (RNAi) dan hingga pengeditan genom dengan menggunakan CRISPR Cas9.

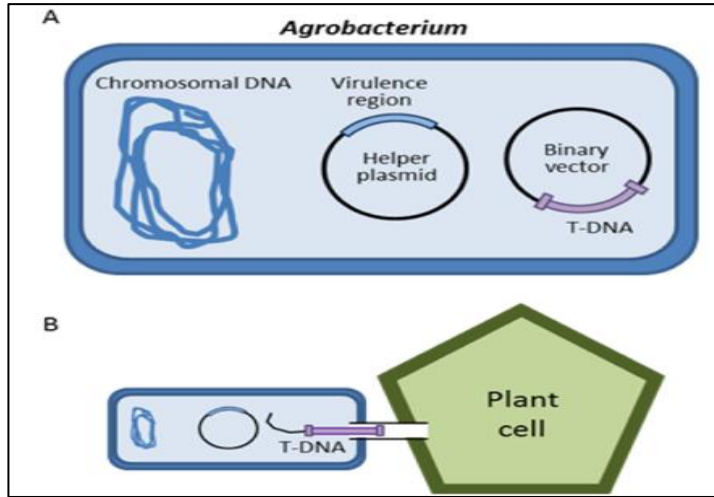
9.2.1 Transformasi Genetik

Transformasi genetik pada tanaman adalah teknik memindahkan gen asing (gen yang berasal dari tanaman atau organisme lain) yang diinginkan ke genom tanaman target. Salah satu teknik rekayasa genetika yang digunakan untuk mendapatkan tanaman yang lebih unggul dan baik kualitasnya

dibandingkan tipe liarnya. Karakteristik-karakteristik unggul pada tanaman seperti tahan terhadap penyakit, hama, herbisida, cekaman abiotik, percepatan pembungaan bahkan modifikasi metabolisme tanaman untuk kebutuhan pangan dan industri farmasi. Melalui transformasi genetik juga peneliti mampu mempelajari terkait fungsi dan regulasi gen pada tanaman. Transformasi genetik dapat dilakukan secara langsung dengan partikel bombardment dan secara tidak langsung menggunakan *Agrobacterium tumefaciens* (Irsyadi *et al.*, 2022).

1. Metode Tidak Langsung

Agrobacterium tumefaciens merupakan bakteri yang umum hidup di tanah dan secara alami mampu membentuk empedu pada berbagai spesies tumbuhan dikotil dan beberapa spesies tumbuhan monokotil (Van Larebeke *et al.*, 1974). *A. tumefaciens* mampu menyebabkan tumor (*crown gall*) pada tumbuhan melalui bagian tumbuhan yang terbuka untuk mengkolonisasi sel tumbuhan (Silalahi *et al.*, 2021). *A. tumefaciens* mempunyai material genetik (DNA) yang berada di dalam kromosom dan DNA plasmid yang berbentuk sirkular yang berada di luar kromosom. DNA asing yang disisipkan pada plasmid akan terintegrasi kedalam genom tanaman ketika bakteri ini menginfeksi tanaman. DNA asing yang terintegrasi pada tumbuhan disebut T-DNA atau Transferred DNA, sedangkan plasmid yang disisipkan T-DNA disebut Ti-plasmid atau Ti – tumor inducing.



Gambar 9.1. (A) Transformasi genetik yang dimediasi oleh *Agrobacterium tumefaciens* (DNA sirkular). Vektor biner yang telah yang membawa T-DNA yang akan ditransfer ke sel tanaman. (B) Perpindahan T-DNA kedalam sel tanaman.

Isolasi plasmid dilakukan terlebih dahulu. Plasmid yang berukuran cenderung besar (± 200 kbp) diubah ukurannya menjadi lebih kecil dengan cara menyingkirkan bagian DNA yang tidak dibutuhkan. Setelah itu gen dimodifikasi yaitu gen yang berfungsi untuk membentuk auksin dan sitokinin dihilangkan dengan tujuan agar tidak terbentuk tumor selanjutnya gen yang berfungsi membentuk opine juga dihilangkan karena opine yang dihasilkan oleh sel tumbuhan dapat mengganggu pertumbuhan sel tumbuhan karena hasil fotosintesis akan digunakan untuk sintesis opine. Ori (*Origin of replication*) untuk *E.coli* ditambahkan supaya plasmid dapat diperbanyak dalam *E.coli*. Dalam rekayasa genetik, bakteri *E.coli* dimanfaatkan karena sifat replikasinya yang cepat sehingga digunakan untuk cloning.

Kemudian Ti-Plasmid disisipkan konstruksi gen (DNA) yang diinginkan. Ti-Plasmid yang telah disisipkan T-DNA ditransformasi ke dalam dalam *A. tumefaciens* kembali dan dipakai untuk memindahkan gen ke genom tanaman. Saat sel bakteri *A. tumefaciens* di infeksi pada tanaman, maka T-

DNA akan ikut diintegrasikan ke dalam genom tanaman. Selama proses infeksi, hanya sebagian dari plasmid Ti yang dikenal sebagai DNA Transfer (T-DNA) yang ditransfer ke tumbuhan. Proses alami ini telah digunakan untuk memfasilitasi modifikasi genetik tanaman.

2. Metode Langsung

Transformasi genetik secara langsung (*direct gene transfer*) mengandalkan kekuatan fisik atau kimiawi untuk menembus dinding sel dan membran plasma tanaman sehingga materi genetik dapat masuk ke dalam sitoplasma bahkan hingga ke nukleus sel target. Menurut (Su *et al.*, 2023) berbagai metode transformasi langsung meliputi penembakan partikel (*particle bombardment*), elektroporasi, transformasi berbantuan polietilen glikol (PEG), injeksi mikro (*microinjection*), dan transformasi berbantuan *silicon carbide whisker*, sebagai pendekatan yang dimediasi oleh kekuatan eksternal dan tidak bergantung pada organisme perantara biologis. Keunggulan mendasar dari transformasi langsung adalah sifatnya yang tidak dibatasi oleh kisaran inang (*host range*) sebagaimana yang menjadi keterbatasan utama metode berbasis *Agrobacterium*, sehingga metode ini dapat diterapkan pada hampir semua spesies tanaman termasuk spesies yang bersifat rekalsitran terhadap transformasi berbasis organisme biologis (Anjanappa dan Gruissem, 2021). Oleh karena itu, transformasi langsung memegang peranan strategis dalam program pemuliaan tanaman modern, khususnya untuk spesies-spesies tanaman yang belum memiliki protokol transformasi berbasis *Agrobacterium* yang terstandarisasi.

Di antara berbagai metode transformasi langsung, penembakan partikel atau *biolistics* merupakan teknik yang paling banyak digunakan dan telah menjadi tulang punggung program transformasi tanaman transgenik secara global. Pada metode ini, materi genetik berupa DNA dilapiskan pada partikel mikro dari emas atau tungsten berukuran 0,6–1,6 μm , kemudian ditembakkan ke dalam jaringan tanaman

menggunakan tekanan gas helium bertekanan tinggi sehingga partikel-partikel tersebut mampu menembus dinding sel dan membran plasma untuk mengantarkan DNA langsung ke sitoplasma maupun nukleus sel target (Dadlani dan Yadava, 2023).

9.2.2 RNA Interference (RNAi)

RNA Interference merupakan mekanisme menonaktifkan gen (*gene silencing*) yang diperantarai oleh molekul RNA untai ganda (*double-stranded* RNA/dsRNA). Mekanisme RNAi dimulai ketika dsRNA diproses oleh enzim endonuklease yang disebut Dicer menjadi fragmen-fragmen pendek berukuran 21–23 nukleotida yang dikenal sebagai small interfering RNA (siRNA). Fragmen siRNA tersebut kemudian bergabung dengan kompleks protein bernama *RNA-induced silencing complex* (RISC). Di dalam kompleks RISC, untai siRNA yang bersifat antisense akan memandu kompleks untuk mengenali dan mendegradasi mRNA target yang memiliki sekuens komplementer, sehingga mengakibatkan penurunan ekspresi protein yang dikode oleh gen target secara signifikan (Baulcombe, 2015)

Dalam konteks produksi benih dan pemuliaan tanaman, RNAi diaplikasikan untuk berbagai tujuan strategis. Pertama, teknologi ini digunakan untuk meningkatkan resistensi tanaman terhadap patogen, khususnya virus tumbuhan. Dengan mengekspresikan dsRNA yang komplementer terhadap gen esensial virus, tanaman transgenik yang membawa konstruk RNAi mampu mendegradasi RNA virus sebelum replikasi masif terjadi, sehingga memberikan perlindungan yang efektif dan tahan lama. Kedua, RNAi digunakan untuk memodifikasi jalur biosintesis metabolit sekunder, seperti penghambatan biosintesis toksin aflatoxin pada biji tanaman atau pengurangan kandungan zat antinutrisi pada komoditas pangan tertentu (Rajam, 2020).

Aplikasi RNAi dalam pemuliaan tanaman juga mencakup rekayasa ketahanan terhadap serangga hama melalui pendekatan yang dikenal sebagai host-induced gene silencing (HIGS). Pada pendekatan ini, tanaman transgenik mengekspresikan dsRNA yang menarget gen esensial serangga hama. Ketika serangga memakan

jaringan tanaman tersebut, dsRNA akan terserap ke dalam sistem pencernaannya dan memicu mekanisme RNAi endogen serangga, yang pada akhirnya menyebabkan kematian atau gangguan perkembangan pada hama tersebut. (Mao *et al.*, 2007) menunjukkan bahwa pendekatan HIGS menggunakan dsRNA yang menarget gen P450 pada *Helicoverpa armigera* secara signifikan menghambat pertumbuhan larva dan meningkatkan mortalitas hama tersebut pada tanaman kapas.

Keunggulan teknologi RNAi dibandingkan pendekatan rekayasa genetika konvensional terletak pada spesifisitasnya yang tinggi dan kemampuannya untuk membungkam gen tanpa harus menghilangkan gen tersebut secara permanen dari genom. Namun demikian, tantangan utama yang masih dihadapi antara lain stabilitas dsRNA di lingkungan lapangan, efisiensi pengiriman ke dalam sel target, serta potensi terjadinya off-target silencing akibat homologi sekuens parsial antara dsRNA dengan mRNA non-target (Huvenne dan Smagghe, 2010). Optimasi desain konstruk RNAi melalui pemilihan sekuens yang sangat spesifik terhadap gen target menjadi langkah krusial untuk meminimalkan risiko efek samping yang tidak diinginkan.

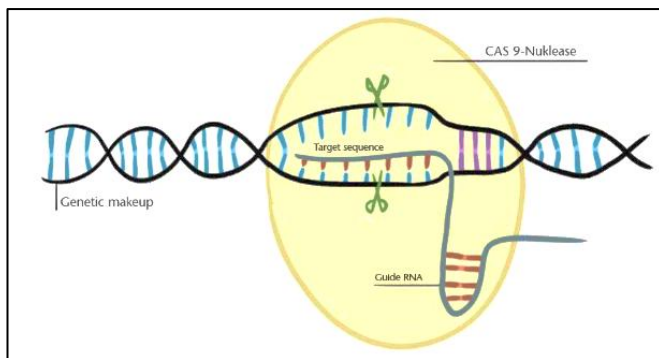
9.2.3 CRISPR-Cas9 (*Genome Editing*)

CRISPR-Cas9 (*Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats* - CRISPR associated protein 9) merupakan sistem pengeditan genom yang merevolusi biologi molekuler dan pemuliaan tanaman sejak diperkenalkan sebagai alat rekayasa genetika pada awal dekade 2010-an. Sistem ini diadaptasi dari mekanisme imunitas adaptif pada bakteri dan archaea, di mana sekuens CRISPR berfungsi sebagai memori molekuler terhadap infeksi virus yang pernah terjadi sebelumnya (Horvath dan Barrangou, 2010). Selanjutnya Doudna dan Charpentier (2014) kemudian berhasil mendemonstrasikan bahwa sistem CRISPR-Cas9 dapat direkayasa menjadi alat pengeditan DNA yang presisi dan dapat diprogram, sebuah pencapaian yang mengantarkan keduanya meraih Nobel Prize dalam Kimia pada tahun 2020.

Komponen utama sistem CRISPR-Cas9 terdiri atas dua elemen fungsional: (1) protein Cas9 yang berfungsi sebagai

endonuklease pemotong DNA untai ganda (double-strand break/DSB), dan (2) single guide RNA (sgRNA) yang berperan sebagai molekul pemandu untuk mengarahkan protein Cas9 ke lokasi genomik target yang spesifik. Setelah DSB terbentuk, sel akan memperbaikinya melalui dua mekanisme utama: non-homologous end joining (NHEJ) yang menghasilkan insersi atau delesi acak yang berpotensi menonaktifkan gen target, atau homology-directed repair (HDR) yang memungkinkan insersi sekuens DNA baru yang presisi apabila template donor tersedia (Cong *et al.*, 2013). Kemampuan untuk memilih antara kedua mekanisme perbaikan ini memberikan fleksibilitas tinggi dalam desain strategi pengeditan genom.

Dalam pemuliaan tanaman, CRISPR-Cas9 telah berhasil diaplikasikan untuk berbagai tujuan inovatif. Pengeditan gen OsERF922 pada padi menggunakan CRISPR-Cas9 terbukti meningkatkan resistensi terhadap penyakit blast yang disebabkan oleh *Magnaporthe oryzae*, salah satu penyakit paling destruktif pada tanaman padi di seluruh dunia (Wang *et al.*, 2016). Dalam konteks Indonesia, Bahagiawati *et al* (2019) menegaskan bahwa tanaman hasil genome editing merepresentasikan tantangan regulasi tersendiri yang perlu ditangani secara komprehensif, mengingat perbedaan mendasarnya dengan tanaman transgenik konvensional yang menyisipkan DNA asing ke dalam genom.



Gambar 9.2. CRISPR Cas9

Keunggulan CRISPR-Cas9 dibandingkan teknologi pengeditan genom generasi sebelumnya seperti *zinc finger nucleases* (ZFN) dan *transcription activator-like effector nucleases* (TALEN)

terletak pada tiga hal utama: kemudahan desain sgRNA melalui pendekatan komputasional, efisiensi pengeditan yang lebih tinggi, serta biaya yang jauh lebih terjangkau. Kemampuan multiplex editing—menarget beberapa gen secara simultan dalam satu transformasi—menjadikan CRISPR-Cas9 sangat efektif untuk merekayasa sifat-sifat kompleks yang dikontrol oleh banyak gen, sehingga secara substansial mempercepat proses pemuliaan tanaman (Cong *et al.*, 2013). Salah satu contoh aplikasi multiplex yang berhasil adalah rekayasa simultan tiga gen yang berperan dalam jalur biosintesis pati pada kentang untuk menghasilkan profil pati yang diinginkan.

Meskipun menawarkan potensi yang luar biasa, CRISPR-Cas9 tidak lepas dari keterbatasan dan kekhawatiran yang perlu ditangani secara serius. *Off-target editing*, yaitu pemotongan pada lokasi genomik yang tidak diinginkan akibat kemiripan sekuens, masih menjadi perhatian utama karena berpotensi menimbulkan efek samping yang tidak terduga. Selain itu, pertimbangan etika dan regulasi terkait pelepasan organisme hasil genome editing ke lingkungan juga masih menjadi perdebatan intensif di tingkat internasional. Di Indonesia, pengembangan kerangka regulasi yang responsif dan berbasis ilmu pengetahuan untuk tanaman hasil genome editing menjadi kebutuhan mendesak, sebagaimana diidentifikasi oleh (Bahagiawati *et al.*, 2019) dalam kajian mereka mengenai tantangan pengaturan keamanan hayati produk rekayasa genetika pertanian.

9.2.4 Marker-Assisted Selection (MAS)

Marker-Assisted Selection (MAS) atau seleksi yang dibantu penanda molekuler merupakan pendekatan modern dalam pemuliaan tanaman yang memanfaatkan penanda DNA (DNA markers) sebagai alat bantu dalam proses seleksi genotipe tanaman. Berbeda dengan seleksi fenotipik konvensional yang mengandalkan pengamatan karakter morfologis dan fisiologis tanaman di lapangan yang sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan MAS memungkinkan identifikasi genotipe unggul pada level molekuler bahkan sebelum tanaman mengekspresikan fenotipe yang diinginkan. Pendekatan ini

secara signifikan meningkatkan efisiensi, ketepatan, dan kecepatan program pemuliaan tanaman (Ribaut dan Hoisington, 1998)

Berbagai jenis penanda molekuler digunakan dalam MAS, antara lain *Restriction Fragment Length Polymorphisms* (RFLP), *Random Amplified Polymorphic DNAs* (RAPD), *Simple Sequence Repeats* (SSR) atau microsatellites, dan *Single Nucleotide Polymorphisms* (SNP). Di antara berbagai jenis penanda tersebut, SNP merupakan yang paling banyak digunakan saat ini karena kelimpahannya yang sangat tinggi di seluruh genom dan kemudahan genotipisasi secara high-throughput melalui teknologi sekuensing generasi berikutnya (next-generation sequencing/NGS). Platform *genotyping-by-sequencing* (GBS) berbasis NGS telah memungkinkan karakterisasi ribuan SNP secara simultan pada populasi tanaman yang besar, sehingga memberikan gambaran yang jauh lebih komprehensif mengenai keragaman genetik populasi pemuliaan (Varshney *et al.*, 2014)

Dalam konteks produksi benih transgenik, MAS memainkan peran yang sangat penting dalam dua aspek utama. Pertama, MAS digunakan untuk mengkonfirmasi integrasi transgene pada posisi genomik yang diinginkan dan dalam keadaan hemizigot atau homozigot sesuai kebutuhan, menggunakan penanda yang terpaut erat dengan lokus insersi transgene. Kedua, MAS diaplikasikan dalam proses backcrossing untuk memulihkan latar belakang genetik varietas resipien secara efisien (background genome recovery). Proses *backcrossing* konvensional memerlukan 6–7 generasi untuk memulihkan sekitar 99% latar belakang genetik varietas resipien. Dengan bantuan MAS melalui *background selection*, proses ini dapat dipercepat menjadi hanya 2–3 generasi, sehingga menghemat waktu dan sumber daya pemuliaan secara signifikan.

Aplikasi MAS dalam program pemuliaan tanaman pangan di Indonesia telah menunjukkan hasil yang menjanjikan. Penelitian introgesi gen ketahanan terhadap penyakit hawar daun bakteri (*Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae*) pada padi menggunakan penanda SSR yang terpaut dengan gen-gen Xa telah berhasil menghasilkan galur-galur padi dengan ketahanan yang lebih baik tanpa mengorbankan keunggulan agronomis varietas adaptif yang telah ada. Kemajuan dalam bidang genomika padi yang menjadi salah satu

tanaman model tumbuhan, serta kelengkapan peta genetik dan sekuens genomnya, menjadikan padi sebagai target utama aplikasi MAS di Asia Tenggara (Sundaram et al., 2009). Dengan demikian, MAS berkontribusi langsung terhadap upaya peningkatan ketahanan pangan nasional melalui akselerasi program pemuliaan varietas unggul baru.

Perkembangan terkini dari MAS mengarah pada pendekatan yang lebih komprehensif yang dikenal sebagai *Genomic Selection* (GS). Berbeda dengan MAS tradisional yang hanya memanfaatkan penanda yang terpaut dengan *quantitative trait loci* (QTL) tertentu yang telah diidentifikasi sebelumnya, GS menggunakan seluruh informasi penanda yang tersebar di seluruh genom untuk memprediksi nilai pemuliaan (breeding value) suatu individu tanaman menggunakan model statistik yang canggih. Pendekatan GS ini sangat efektif untuk karakter-karakter kuantitatif yang dikontrol oleh banyak gen dengan efek kecil (polygenic traits), seperti hasil panen, kualitas biji, dan toleransi terhadap cekaman kekeringan. Implementasi GS pada program pemuliaan tanaman pangan berpotensi mempercepat laju kemajuan genetik per satuan waktu secara substansial dibandingkan pendekatan konvensional maupun MAS tradisional (Meuwissen et al., 2001)

9.3 Tahapan Produksi Benih Transgenik

Produksi benih transgenik merupakan proses yang kompleks, membutuhkan keahlian multidisiplin dari bidang biologi molekuler, kultur jaringan, dan agronomi, serta harus mengikuti regulasi *biosafety* yang ketat di setiap tahapannya. Rekayasa genetika berbeda secara fundamental dari pemuliaan konvensional karena tidak mengandalkan rekombinasi seksual yang menyeluruh, melainkan menyisipkan hanya satu atau beberapa gen spesifik yang telah dikarakterisasi dengan baik ke dalam genom tanaman inang. Secara umum, proses produksi benih transgenik dapat dibagi menjadi beberapa tahapan berurutan yang saling berkaitan (Manshardt, 1985).

Tahap pertama adalah identifikasi dan isolasi gen target. Pada tahap ini, gen yang membawa sifat yang diinginkan misalnya gen cry dari *Bacillus thuringiensis* untuk ketahanan terhadap serangga hama,

gen EPSPS yang toleran terhadap herbisida glifosat, atau gen yang mengkode protein bernilai nutrisi tinggi diidentifikasi melalui penelitian dasar dan kajian literatur. Gen target kemudian diisolasi dari organisme sumber menggunakan teknik PCR (Polymerase Chain Reaction) atau pendekatan genomik lalu diklon ke dalam vektor kloning untuk diperbanyak di dalam sel bakteri *Escherichia coli*. Karakterisasi sekuens gen target secara lengkap menjadi prasyarat mutlak sebelum melanjutkan ke tahap berikutnya (Herman, 2002).

Tahap kedua adalah rekayasa konstruk ekspresi (*expression vector construction*). Gen target yang telah diisolasi perlu dirangkai dengan elemen-elemen regulasi yang tepat agar dapat diekspresikan secara efisien di dalam sel tanaman. Elemen-elemen regulasi ini mencakup promotor yang mengontrol kapan dan di mana gen akan diekspresikan (misalnya promotor konstitutif CaMV 35S yang aktif di seluruh jaringan tanaman, atau promotor yang bersifat tissue-specific maupun inducible), intron untuk meningkatkan efisiensi ekspresi, dan terminator yang mengakhiri proses transkripsi. Selain gen target, konstruk ekspresi juga mengandung *selectable marker gene* biasanya gen resistensi antibiotik atau herbisida yang digunakan untuk mengidentifikasi sel-sel tanaman yang berhasil ditransformasi (Estiati dan Herman, 2015).

Tahap ketiga adalah transformasi tanaman, yaitu proses pengiriman dan integrasi konstruk ekspresi ke dalam genom tanaman inang. Menurut Manshardt (1985) dua metode utama transformasi tanaman: (1) metode berbasis *Agrobacterium tumefaciens*, di mana bakteri patogen tanaman ini dimodifikasi untuk mengantarkan DNA rekombinan ke dalam sel tanaman melalui proses infeksi alami yang telah dimodifikasi, dan (2) metode penembakan partikel (biolistic/gene gun), di mana konstruk DNA yang dilapisi pada partikel mikro tungsten atau emas ditembakkan ke dalam sel tanaman menggunakan tekanan tinggi. Metode *Agrobacterium* lebih sederhana dan menghasilkan pola insersi transgene yang lebih terkontrol pada tanaman dikotil, sementara metode *biolistic* lebih serbaguna dan efektif untuk tanaman monokotil seperti serealia yang umumnya sulit ditransformasi dengan *Agrobacterium*.

Tahap keempat adalah regenerasi dan seleksi tanaman transgenik. Sel-sel tanaman yang telah ditransformasi dikultivasi dalam medium selektif yang mengandung antibiotik atau herbisida sesuai dengan *selectable marker* yang digunakan dalam konstruk. Hanya sel-sel yang berhasil mengintegrasikan transgene yang akan mampu bertahan dan berkembang pada medium selektif ini. Sel-sel transgenik yang terseleksi kemudian diregenerasikan menjadi tanaman utuh melalui protokol kultur jaringan yang spesifik untuk setiap spesies tanaman. Konfirmasi integrasi dan ekspresi transgene dilakukan melalui serangkaian analisis molekuler meliputi PCR, *Southern blot hybridization*, dan analisis *Western blot* atau ELISA untuk memverifikasi bahwa transgene terintegrasikan dan diekspresikan pada level yang diinginkan (Estiati dan Herman, 2015)

Tahap kelima dan keenam mencakup pengujian keamanan hayati dan pelepasan varietas. Sebelum dapat diedarkan secara komersial, tanaman transgenik harus melalui serangkaian pengujian keamanan hayati yang mencakup evaluasi keamanan lingkungan, keamanan pangan, dan keamanan pakan. Di Indonesia, pengujian ini diatur dalam Peraturan Pemerintah Nomor 21 Tahun 2005 tentang Keamanan Hayati Produk Rekayasa Genetik dan dilaksanakan oleh Komisi Keamanan Hayati PRG (Hendriyanto, 2021). Setelah memperoleh sertifikat keamanan hayati, benih tanaman transgenik masih harus melewati prosedur pelepasan varietas oleh Kementerian Pertanian sebagaimana diatur dalam Undang-Undang Nomor 22 Tahun 2019 tentang Sistem Budi Daya Pertanian Berkelanjutan, sebelum akhirnya dapat diproduksi, diedarkan, dan dimanfaatkan oleh petani.

9.4 Aplikasi Rekayasa Genetika dalam Produksi Benih Unggul

Rekayasa genetika telah memberikan kontribusi nyata dalam pengembangan berbagai varietas tanaman unggul yang menjawab tantangan pertanian kontemporer. Menurut Hendriyanto (2021) aplikasi rekayasa genetika di bidang pertanian mencakup peningkatan ketahanan terhadap bahaya biotik dan abiotik, peningkatan kandungan nutrisi, serta perpanjangan masa simpan hasil panen. Keberhasilan aplikasi-aplikasi ini telah mendorong

adopsi tanaman transgenik secara global, meskipun penerimaan masyarakat dan regulasi antarnegara masih beragam.

Salah satu aplikasi rekayasa genetika yang paling sukses adalah pengembangan tanaman tahan serangga hama melalui ekspresi gen cry dari *Bacillus thuringiensis* (tanaman Bt). Herman (2002) menjelaskan bahwa teknik rekayasa genetika memungkinkan produksi tanaman yang tahan terhadap serangan berbagai serangga hama secara permanen tanpa perlu aplikasi insektisida berulang. Tanaman Bt yang telah berhasil dikembangkan dan dikomersialkan secara global antara lain kapas Bt, jagung Bt, kedelai Bt, dan terung Bt. Kapas transgenik Bt DP 5690B bahkan sempat dilepas secara terbatas di Indonesia melalui Keputusan Menteri Pertanian Nomor 107/Kpts/KB.430/2/2001, meskipun kemudian menghadapi berbagai penolakan dari masyarakat (Hendriyanto, 2021).

Rekayasa genetika juga diaplikasikan untuk meningkatkan kualitas nutrisi produk pangan, suatu bidang yang dikenal sebagai nutritional biofortification. Contoh paling ikonik dari aplikasi ini adalah pengembangan Golden Rice, yaitu varietas padi transgenik yang direkayasa untuk menghasilkan beta-karoten (provitamin A) di dalam endosperma biji sesuatu yang tidak terjadi secara alami. Golden Rice dikembangkan sebagai solusi terhadap defisiensi vitamin A yang masih menjadi masalah gizi serius di banyak negara berkembang, termasuk di kawasan Asia Tenggara. Selain Golden Rice, pengembangan kedelai dengan profil asam lemak yang dimodifikasi untuk meningkatkan kandungan asam oleat dan mengurangi asam linoleat, serta jagung dengan kandungan lisin dan triptofan yang lebih tinggi, merupakan contoh-contoh nyata dari aplikasi rekayasa genetika untuk peningkatan nilai nutrisi pangan (Ye *et al.*, 2000).

Bidang lain yang sangat potensial adalah pengembangan benih tanaman yang tahan terhadap penyakit virus melalui pendekatan pathogen-derived resistance (PDR). Pada pendekatan ini, gen atau fragmen gen dari virus patogen itu sendiri diekspresikan di dalam tanaman untuk memicu ketahanan terhadap infeksi virus yang bersangkutan. Contoh yang paling berhasil dari pendekatan ini adalah pengembangan pepaya transgenik tahan virus papaya ringspot (PRSV) di Hawaii, yang berhasil menyelamatkan industri

pepaya Hawaii dari kehancuran akibat epidemi PRSV pada akhir tahun 1990-an. Keberhasilan pepaya transgenik tahan PRSV ini kemudian menjadi referensi penting bagi pengembangan tanaman transgenik tahan penyakit di berbagai negara tropis, termasuk Indonesia yang juga menghadapi ancaman serius dari berbagai penyakit virus pada komoditas hortikultura (Gonsalves, 1998).

9.5 Kelebihan dan Kekurangan Teknologi Rekayasa Genetika

Teknologi rekayasa genetika menawarkan sejumlah keunggulan mendasar yang tidak dapat dicapai melalui pendekatan pemuliaan konvensional. Menurut Manshardt (1985) keunggulan utama rekayasa genetika terletak pada kemampuannya untuk melampaui batasan spesies dalam transfer gen, sehingga genepool yang dapat dimanfaatkan menjadi tidak terbatas. Hal ini memungkinkan introduksi sifat-sifat yang sama sekali tidak tersedia dalam kerabat liar tanaman budidaya, seperti ketahanan terhadap herbisida tertentu atau kemampuan memproduksi protein vaksin di dalam jaringan tanaman. Selain itu, rekayasa genetika hanya memodifikasi satu atau beberapa gen target tanpa mengganggu keseluruhan susunan gen yang ada, sehingga meminimalkan efek segregasi yang menjadi kendala utama pemuliaan konvensional.

Kecepatan pengembangan varietas merupakan keunggulan kompetitif lain dari rekayasa genetika. Pemuliaan konvensional untuk sifat kompleks seperti ketahanan terhadap penyakit poligenik atau toleransi terhadap cekaman abiotik dapat memerlukan waktu 10–15 tahun hingga menghasilkan varietas komersial baru. Rekayasa genetika, yang dikombinasikan dengan teknologi kultur jaringan dan MAS, berpotensi mempersingkat waktu tersebut secara signifikan karena modifikasi genetik dapat dilakukan secara langsung dan tepat sasaran tanpa harus menunggu banyak siklus persilangan dan seleksi (Manshardt, 1985). Efisiensi waktu ini memiliki nilai strategis yang besar dalam menghadapi ancaman hama dan penyakit baru yang muncul atau berevolusi dengan cepat.

Di sisi lain, rekayasa genetika menghadapi berbagai keterbatasan yang perlu dipertimbangkan secara serius. Pertama, rekayasa genetika efektif terutama untuk sifat-sifat sederhana yang

dikontrol oleh satu atau sedikit gen. Untuk sifat-sifat kuantitatif kompleks yang dikontrol oleh banyak gen dengan efek kecil seperti hasil panen dan adaptasi terhadap lingkungan beragam, pemuliaan konvensional yang dikombinasikan dengan MAS atau GS seringkali lebih efektif dan efisien. Kedua, biaya penelitian dan pengembangan tanaman transgenik sangat tinggi, mencakup investasi dalam fasilitas laboratorium berteknologi tinggi, pengujian keamanan hayati yang ekstensif, dan proses regulasi yang panjang. Hal ini menyebabkan teknologi rekayasa genetika seringkali didominasi oleh perusahaan multinasional besar, sehingga menimbulkan kekhawatiran mengenai monopoli dan aksesibilitas oleh petani kecil di negara berkembang (Chrispeels dan Mandoli, 2003).

Dari aspek keamanan dan risiko, Manshardt (1985) menegaskan bahwa bukti-bukti ilmiah yang ada menunjukkan metodologi rekayasa genetika sendiri tidak menimbulkan bahaya unik bagi kesehatan manusia, namun regulasi ketat tetap diperlukan karena adanya potensi risiko yang timbul dari pilihan gen target yang tidak tepat. Tanaman transgenik yang mengekspresikan protein asing berpotensi memicu respons alergi pada konsumen yang sensitif, sebagaimana dicontohkan oleh kasus gen Brazil nut yang mengkode protein alergen pada kedelai transgenik yang tidak dilanjutkan ke tahap komersialisasi setelah terdeteksi dalam uji prakomersial (Manshardt, 1985). Risiko ekologis seperti aliran gen (*gene flow*) dari tanaman transgenik ke kerabat liarnya yang dapat menciptakan gulma "superweeds" juga menjadi perhatian penting yang memerlukan kajian kasus per kasus (Prakash *et al.*, 2011).

Keterbatasan lain yang tidak kalah penting adalah aspek penerimaan sosial dan regulasi. Prianto *et al.* (2020) mencatat bahwa pengaturan dan perlindungan terhadap pangan hasil rekayasa genetika masih menghadapi berbagai kompleksitas di berbagai negara, termasuk Indonesia. Persepsi masyarakat yang belum sepenuhnya positif terhadap produk rekayasa genetika, sebagian besar dipengaruhi oleh kurangnya literasi ilmiah dan informasi yang tidak akurat yang beredar di masyarakat, menjadi hambatan sosial yang signifikan bagi adopsi teknologi ini secara luas. Hendriyanto (2021) menekankan pentingnya pertimbangan kaidah agama, etika, sosial budaya, dan estetika dalam proses pengaturan dan pelepasan

benih tanaman PRG untuk meningkatkan penerimaan di masyarakat Indonesia.

9.6 Implementasi di Indonesia dan Potensi Pengembangan

Indonesia sebagai negara megadiversitas dengan sektor pertanian yang menjadi tulang punggung perekonomian dan ketahanan pangan nasional memiliki kebutuhan mendesak untuk mengadopsi teknologi rekayasa genetika secara bijaksana dan terstruktur. Swastika dan Hardiansyah (2008) mengidentifikasi bahwa ketergantungan Indonesia pada impor komoditas pertanian strategis seperti jagung dan kedelai yang sebagian besar merupakan produk rekayasa genetika dari negara eksportir menuntut adanya inovasi dan terobosan untuk meningkatkan produksi dalam negeri demi ketahanan pangan yang berkelanjutan.

Kerangka regulasi Indonesia untuk PRG bidang pertanian berpusat pada Peraturan Pemerintah Nomor 21 Tahun 2005 tentang Keamanan Hayati Produk Rekayasa Genetik, yang mengatur mekanisme pengkajian keamanan hayati meliputi keamanan lingkungan, keamanan pangan, dan keamanan pakan. Menurut Hendriyanto (2021) sistem regulasi ini telah menghasilkan berbagai produk yang memperoleh sertifikat keamanan hayati, dengan 27 PRG telah memperoleh sertifikat keamanan pangan, 17 PRG memperoleh sertifikat keamanan lingkungan, dan 6 PRG memperoleh sertifikat keamanan pakan hingga saat penelitian mereka disusun. Namun demikian, proses pelepasan komersial benih tanaman PRG masih sangat terbatas, dengan hanya dua varietas yang pernah dilepas oleh Kementerian Pertanian (Hendriyanto, 2021). Kapasitas penelitian rekayasa genetika tanaman di Indonesia sesungguhnya telah berkembang cukup signifikan. Pada penelitian Ambarwati *et al* (2018) keberhasilan pemuliaan kentang produk rekayasa genetik yang tahan terhadap penyakit busuk daun (*Phytophthora infestans*) melalui kolaborasi antara lembaga penelitian nasional. Selain itu, penelitian pengembangan padi transgenik tahan wereng coklat, tebu tahan kekeringan, dan kedelai dengan kandungan nutrisi yang dimodifikasi juga telah dilakukan oleh berbagai lembaga penelitian seperti Badan Penelitian dan

Pengembangan Pertanian (Balitbangtan). Ketersediaan kapasitas penelitian ini merupakan modal penting yang perlu didayagunakan secara optimal dalam kerangka kebijakan yang mendukung.

Potensi pengembangan rekayasa genetika dalam produksi benih di Indonesia sangat besar, terutama untuk komoditas strategis seperti padi, jagung, kedelai, tebu, dan berbagai komoditas hortikultura. Pengembangan benih tanaman PRG kedelai, misalnya, memiliki potensi untuk mengurangi ketergantungan Indonesia pada impor kedelai yang pada tahun 2019 mencapai 2,67 juta ton senilai miliaran rupiah. Pengembangan varietas kedelai transgenik dengan produktivitas lebih tinggi, ketahanan terhadap hama dan penyakit, serta toleransi terhadap cekaman lingkungan dapat secara signifikan meningkatkan daya saing kedelai lokal. Selain itu, dalam konteks perubahan iklim, pengembangan varietas padi transgenik yang toleran terhadap genangan (banjir) dan kekeringan menjadi prioritas strategis untuk menjamin ketahanan pangan nasional dalam jangka panjang (Hendriyanto, 2021).

DAFTAR PUSTAKA

- Ambarwati, A.D. *et al.* (2018) 'Pemuliaan Kentang Produk Rekayasa Genetik Tahan terhadap Penyakit Busuk Daun (*Phytophthora infestans*) dan Aman Pangan di Indonesia', *Jurnal AgroBiogen*, 13(1), p. 67. Available at: <https://doi.org/10.21082/jbio.v13n1.2017.p67-74>.
- Anjanappa, R.B. and Gruissem, W. (2021) 'Current progress and challenges in crop genetic transformation', *Journal of Plant Physiology*, 261, p. 153411. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2021.153411>.
- Bahagiawati, H.A., Satyawan, D. and Santoso, T.J. (2019) 'Genome-Edited Plants and the Challenges of Regulating Their Biosafety in Indonesia', *Jurnal AgroBiogen*, 15(2), p. 93. Available at: <https://doi.org/10.21082/jbio.v15n2.2019.p93-106>.
- Baulcombe, D. (2015) 'RNA silencing in plants', *Biochemist*, 37(2), pp. 10–13. Available at: <https://doi.org/10.1042/bio03702010>.
- Cong, L. *et al.* (2013) 'HHS Public Access', 339(6121), pp. 819–823. Available at: <https://doi.org/10.1126/science.1231143.Multiplex>.
- Dadlani, M. and Yadava, D. (2023) *Science and technology, The Encyclopedia of Politics and Religion: 2-volume set*.
- Doudna, J.A. and Charpentier, E. (2014) 'The new frontier of genome engineering with CRISPR-Cas9', *Science*, 346(6213). Available at: <https://doi.org/10.1126/science.1258096>.
- Estiati, A. and Herman, M. (2015) 'REGULASI KEAMANAN HAYATI PRODUK REKAYASA GENETIK DI INDONESIA REGULASI KEAMANAN HAYATI PRODUK REKAYASA GENETIK DI INDONESIA Biosafety Regulation of Genetically Modified Products in Indonesia', *Analisis Kebijakan Pertanian*, (21), pp. 129–146.
- Gonsalves, D. (1998) 'Control of papaya ringspot virus in papaya: A case study', *Annual Review of Phytopathology*, 36, pp. 415–437. Available at: <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.36.1.415>.
- Hendriyanto, K. (2021) 'Urgensi Reformulasi Pengaturan Benih Tanaman Produk Rekayasa Genetik', *Jurnal Ilmu Hukum*,

- 10(2), p. 209. Available at: <https://doi.org/10.30652/jih.v10i2.7994>.
- Horvath, P. and Barrangou, R. (2010) 'CRISPR/Cas, the immune system of Bacteria and Archaea', *Science*, 327(5962), pp. 167–170. Available at: <https://doi.org/10.1126/science.1179555>.
- Irsyadi, M.B. *et al.* (2022) 'Transformasi Genetik in Planta: Metode Cepat Memperoleh Produk Rekayasa Genetika', *Prosiding Seminar Nasional Penelitian dan Pengabdian Masyarakat*, 7(1), pp. 243–252. Available at: https://www.researchgate.net/publication/368510764_TRANSFORMASI_GENETIK_IN_PLANTA_METODE CEPAT MEMPEROLEH_PRODUK_REKAYASA_GENETIKA.
- Kaiser, N. *et al.* (2020) 'The role of conventional plant breeding in ensuring safe levels of naturally occurring toxins in food crops', *Trends in Food Science and Technology*, 100(December 2019), pp. 51–66. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.03.042>.
- Lamichhane, B. *et al.* (2022) 'Feminization of Agriculture in Nepal and its implications: Addressing Gender in Workload and Decision Making', *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 10(12), pp. 2484–2494. Available at: <https://doi.org/10.24925/turjaf.v10i12.2484-2494.5486>.
- Manshardt, R. (1985) 'Genetic "engineering"? [3]', *Science*, 230(4723), pp. 237–238. Available at: <https://doi.org/10.1126/science.230.4723.237-b>.
- Mao, Y.B. *et al.* (2007) 'Silencing a cotton bollworm P450 monooxygenase gene by plant-mediated RNAi impairs larval tolerance of gossypol', *Nature Biotechnology*, 25(11), pp. 1307–1313. Available at: <https://doi.org/10.1038/nbt1352>.
- Meuwissen, T.H.E., Hayes, B.J. and Goddard, M.E. (2001) 'Prediction of total genetic value using genome-wide dense marker maps', *Genetics*, 157(4), pp. 1819–1829. Available at: <https://doi.org/10.1093/genetics/157.4.1819>.
- Prakash, D. *et al.* (2011) 'Risks and Precautions of Genetically Modified Organisms', *ISRN Ecology*, 2011, pp. 1–13. Available at: <https://doi.org/10.5402/2011/369573>.
- Rajam, M. V. (2020) 'RNA silencing technology: A boon for crop

- improvement', *Journal of Biosciences*, 45(1). Available at: <https://doi.org/10.1007/s12038-020-00082-x>.
- Retno Dwi Andayani, Rahmatika, W. and Fitriyah, N. (2023) 'Transfomasi Genetik : Peluang dan Tantangan', *Jurnal Ilmiah Agrineca*, 23(1), pp. 80–91. Available at: <https://doi.org/10.36728/afp.v23i1.2350>.
- Ribaut, J.M. and Hoisington, D. (1998) 'Marker-assisted selection: New tools and strategies', *Trends in Plant Science*, 3(6), pp. 236–239. Available at: [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(98\)01240-0](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(98)01240-0).
- Rifka Alkhilyatul Ma'rifat, I Made Suraharta, I.I.J. (2024) 'No Title 濟無No Title No Title No Title', 2, pp. 306–312.
- SILALAHI, D., WIRAWAN, I.G.P. and SRITAMIN, M. (2021) 'Transformasi Genetik Tanaman Kentang (*Solanum tuberosum* L.) dengan Gen *acvB* Menggunakan Vektor *Agrobacterium tumefaciens*', *Agrotrop : Journal on Agriculture Science*, 11(1), p. 63. Available at: <https://doi.org/10.24843/ajoas.2021.v11.i01.p07>.
- Su, W. *et al.* (2023) 'Technological Development and Application of Plant Genetic Transformation', *International Journal of Molecular Sciences*, 24(13). Available at: <https://doi.org/10.3390/ijms241310646>.
- Sutrisno, A. and Wardani, A.K. (2023) 'Pengantar Rekayasa Genetika', *Pengantar Rekayasa Genetika* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.11594/ubpress9786232968837>.
- Varshney, R.K., Terauchi, R. and McCouch, S.R. (2014) 'Harvesting the Promising Fruits of Genomics: Applying Genome Sequencing Technologies to Crop Breeding', *PLoS Biology*, 12(6), pp. 1–8. Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001883>.
- Wang, F. *et al.* (2016) 'Enhanced rice blast resistance by CRISPR/Cas9-Targeted mutagenesis of the ERF transcription factor gene *OsERF922*', *PLoS ONE*, 11(4), pp. 1–18. Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154027>.
- Ye, X. *et al.* (2000) 'Engineering the provitamin A beta-carotene biosynthetic pathway into carot ...', *Science*, 287(January), pp. 303–306.

BAB 10

PRODUKSI DAN SERTIFIKASI BENIH UNGGUL

10.1 Pendahuluan

Benih tanaman merupakan faktor penting dalam kegiatan budidaya karena keberadaannya sangat memengaruhi tingkat produksi dan kualitas hasil pertanian. Penggunaan benih bermutu mampu mendukung peningkatan hasil panen, yang pada akhirnya berdampak pada meningkatnya pendapatan petani serta kesejahteraan masyarakat. Oleh sebab itu, sistem perbenihan harus dapat menjamin ketersediaan benih berkualitas secara berkelanjutan dan dalam jumlah yang memadai. Upaya pengembangan perbenihan di Indonesia telah dilakukan sejak tahun 1958 melalui berbagai program intensifikasi, khususnya pada tanaman padi, seperti KOGM, SSBM, dan BIMAS. Selanjutnya, pada tahun 1970 pemerintah membentuk Badan Benih Nasional yang bertugas membantu Menteri Pertanian dalam penyusunan kebijakan dan perencanaan di bidang perbenihan (Kartasapoetra et al., 1992). Kemudian, pemerintah menerbitkan Peraturan Pemerintah Nomor 44 Tahun 1995 tentang pembenihan tanaman yang bertujuan menjamin ketersediaan benih bermutu secara berkesinambungan sekaligus menjaga kelestarian plasma nutfah beserta pemanfaatannya.

Sistem perbenihan di Indonesia mencakup tiga kegiatan utama, yaitu pemuliaan tanaman, produksi benih, dan distribusi benih. Benih unggul diperoleh melalui proses pemuliaan tanaman yang melibatkan eksplorasi, pengumpulan, dan pemanfaatan plasma nutfah dalam perakitan genetik untuk menghasilkan varietas yang memiliki sifat unggul. Proses pemuliaan dapat dilakukan dengan metode konvensional, seperti persilangan dan mutasi, maupun melalui pendekatan modern seperti rekayasa genetik. Varietas unggul yang telah dihasilkan kemudian diperbanyak melalui

kegiatan produksi benih agar dapat disalurkan kepada petani dalam jumlah yang mencukupi. Selama proses produksi berlangsung, benih harus melalui pengawasan dan sertifikasi guna memastikan bahwa standar mutu yang telah ditetapkan dapat terpenuhi. Beberapa aspek penting dalam produksi benih meliputi ketepatan varietas, jumlah produksi, waktu distribusi, lokasi produksi, serta harga yang sesuai. Pengawasan terhadap pengadaan dan peredaran benih juga dilakukan untuk memberikan perlindungan kepada produsen maupun konsumen. Dengan adanya pengaturan tersebut, diharapkan sistem perbenihan nasional dapat berkembang secara optimal sesuai dengan tujuan pembangunan pertanian. Oleh karena itu, pemerintah menetapkan berbagai regulasi yang mengatur pelaku usaha perbenihan, perizinan, persyaratan produksi, hingga mekanisme sertifikasi benih. Bab ini membahas berbagai aspek yang berkaitan dengan kegiatan perbenihan di Indonesia. Bab ini membahas lebih banyak tentang kegiatan perbenihan di Indonesia

10.2 Pengertian dan Karakteristik Benih Unggul

Benih merupakan tanaman atau bagian tanaman yang dimanfaatkan sebagai bahan untuk memperbanyak maupun mengembangbiakkan tanaman. Dalam praktik budidaya, benih tidak hanya berbentuk biji, tetapi juga dapat berupa bagian vegetatif seperti batang, daun, dan akar yang mampu menghasilkan individu tanaman baru. Selain itu, beberapa bagian tanaman lain yang dapat digunakan sebagai bahan tanam meliputi tunas, rhizoma, umbi lapis, umbi batang, stolon atau geragih, umbi akar, tunas adventif, serta spora (Amrullah et al., 2023).

Benih unggul harus memenuhi beberapa kriteria mutu, yaitu mutu genetik, mutu fisik, mutu fisiologis, dan kesehatan benih. Benih bermutu adalah benih dari varietas yang telah terdaftar untuk diedarkan serta diperbanyak melalui sistem sertifikasi sehingga memenuhi standar mutu yang telah ditetapkan. Mutu genetik berkaitan dengan kemurnian varietas, sedangkan mutu fisik dapat diamati melalui keseragaman ukuran, bentuk, warna, tekstur, dan kilap permukaan benih sesuai karakter varietasnya.

Mutu fisiologis benih ditentukan oleh tingkat viabilitas dan vigor benih. Viabilitas menunjukkan kemampuan benih untuk

berkecambah dan tumbuh secara normal, sedangkan vigor menggambarkan kekuatan tumbuh benih dalam berbagai kondisi lingkungan. Menurut Kartasapoetra (2003), benih dikatakan memiliki viabilitas tinggi apabila persentase perkecambahannya melebihi 90%. Sebagai contoh, apabila 100 benih ditanam, maka sedikitnya 90 benih mampu tumbuh normal, sedangkan sisanya tidak berkecambah atau mengalami pertumbuhan abnormal sehingga tidak dapat berkembang menjadi tanaman dewasa.

Produksi Benih

1. Produksi Benih Bina

Sistem produksi benih di Indonesia diatur melalui berbagai regulasi pemerintah, di antaranya Peraturan Menteri Pertanian Republik Indonesia Nomor 12/Permentan/TP.020/4/2018 mengenai Produksi, Sertifikasi, dan Peredaran Benih Tanaman, Peraturan Menteri Pertanian Republik Indonesia Nomor 21 Tahun 2021 tentang Pembenihan Hortikultura, serta Keputusan Menteri Pertanian Republik Indonesia Nomor 990/HK.150/C/05/2018 mengenai Petunjuk Teknis Produksi Benih Tanaman Pangan. Dalam pelaksanaannya, seluruh tahapan produksi benih berada di bawah pengawasan pemerintah. Benih yang diproduksi melalui sistem pengawasan tersebut dikenal sebagai benih bina. Benih bina merupakan benih dari varietas unggul yang telah dilepas secara resmi dan diawasi proses produksi maupun distribusinya guna mempertahankan kemurnian genetik hingga digunakan oleh produsen maupun petani.

Perkembangan industri benih hortikultura yang semakin luas mendorong pemerintah untuk memperbarui regulasi di bidang perbenihan. Melalui Peraturan Menteri Pertanian Nomor 4 Tahun 2026, pemerintah kembali menata sistem pembenihan hortikultura, termasuk pengaturan mengenai sertifikasi kompetensi bagi produsen dan pengedar benih, penerapan sertifikasi berdasarkan skala usaha, serta kewajiban penerapan sistem manajemen mutu bagi perusahaan benih berskala besar.

Produksi benih unggul dapat dilakukan melalui dua metode utama, yaitu perbanyakan generatif dan vegetatif. Perbanyakan generatif dilakukan menggunakan biji dan dibedakan menjadi benih bersari bebas serta benih hibrida. Pada benih bersari bebas, hasil produksi dikelompokkan ke dalam empat kelas, yaitu benih penjenis, benih dasar, benih pokok, dan benih sebar. Benih penjenis diproduksi langsung oleh pemulia tanaman dan pengawasannya dilakukan oleh lembaga pemuliaan, sedangkan benih dasar, benih pokok, dan benih sebar diperbanyak oleh produsen benih.

Pada perbanyakan generatif melalui kultur biji maupun produksi benih hibrida, hasil benih yang diperoleh disetarakan dengan kelas benih sebar. Sementara itu, perbanyakan vegetatif dapat dilaksanakan melalui metode konvensional maupun teknik kultur jaringan. Teknik vegetatif konvensional meliputi penggunaan entres, tunas pucuk, stek akar, stek batang, okulasi, sambung pucuk, cangkok, pembelahan bonggol, anakan, umbi, stolon, sulur, biji apomiksis, stek daun, dan rimpang. Bahan tanaman yang digunakan dapat berasal dari tanaman semusim, perdu, terna, maupun tanaman tahunan.

Pada tanaman tahunan, pohon induk terpilih dikategorikan sebagai benih penjenis atau *breeder seed* (BS). Hasil perbanyakan dari pohon induk tersebut diklasifikasikan sebagai benih dasar, kemudian diperbanyak kembali menjadi benih pokok dan selanjutnya menjadi benih sebar. Khusus pada tanaman aneka kacang dan umbi, sistem produksi benih dilakukan melalui pola perbanyakan ganda, yaitu pada kelas benih penjenis (BP, BP1, dan BP2) serta kelas benih sebar (BR, BR1, BR2, BR3, dan BR4) sesuai ketentuan Peraturan Menteri Pertanian Nomor 12/Permentan/TP.020/4/2018.

Hasil perbanyakan benih secara vegetatif melalui metode konvensional selanjutnya dikelompokkan ke dalam lima kelas benih.

- a. G0 diklasifikasikan sebagai benih penjenis
- b. G1 diklasifikasikan sebagai benih dasar-1

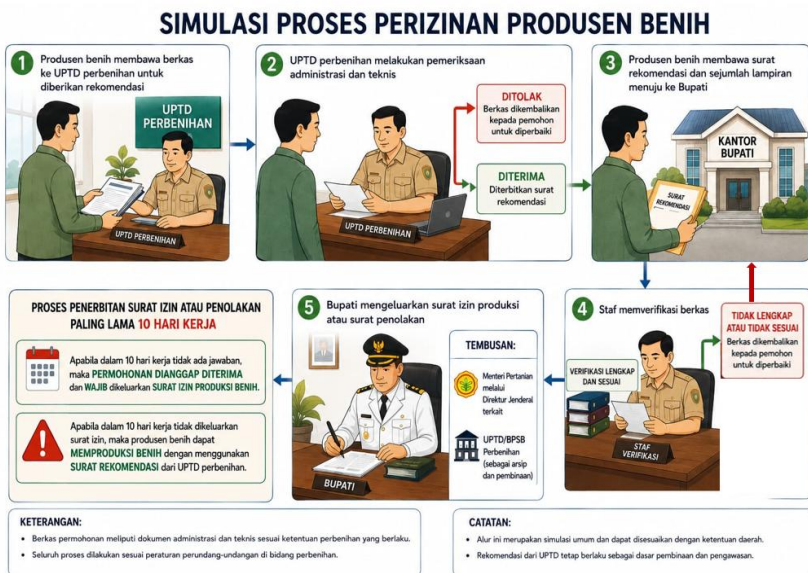
- c. G2 diklasifikasikan sebagai benih dasar-2
- d. G3 diklasifikasikan sebagai benih pokok
- e. G4 diklasifikasikan sebagai benih sebar

Produksi benih di Indonesia dibedakan menjadi dua jenis, yaitu produksi benih bina dan produksi benih varietas lokal. Pada produksi benih bina, terdapat beberapa persyaratan utama yang harus dipenuhi, terutama berkaitan dengan kesesuaian lokasi dan lahan produksi serta pihak pelaksana produksi benih. Sementara itu, produksi benih varietas lokal tidak hanya memperhatikan lokasi, lahan, dan pelaksana produksi, tetapi juga mempertimbangkan kejelasan varietas lokal yang akan diperbanyak.

2. Persyaratan dan Perizinan Produsen Benih Bina

Produsen benih adalah individu, kelompok tani, badan usaha, maupun badan hukum yang menjalankan kegiatan usaha di bidang produksi benih tanaman. Dalam menjalankan usahanya, produsen benih wajib memenuhi ketentuan perizinan sesuai regulasi yang berlaku. Mekanisme perizinan produksi benih diatur dalam Peraturan Menteri Pertanian Republik Indonesia Nomor 12/PERMENTAN/TP.020/4/2018.

Berdasarkan peraturan tersebut, produsen benih harus memenuhi beberapa persyaratan pokok, antara lain memiliki atau menguasai lahan produksi, sarana pengolahan benih, serta tenaga kerja yang memiliki kompetensi di bidang perbenihan. Selain itu, produsen diwajibkan mempekerjakan sekurang-kurangnya 30 tenaga kerja tetap. Dari sisi kemampuan usaha, produsen juga harus memiliki aset di luar tanah dan bangunan dengan nilai minimal Rp5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah) atau memenuhi ketentuan lain yang ditetapkan dalam regulasi terkait, serta Hasil penjualan Benih Bina selama satu tahun paling sedikit Rp15.000.000.000,00 (lima belas milyar rupiah).



Gambar 10.1. Proses Perizinan Produsen Benih

Apabila produsen benih tidak mempunyai tenaga kerja tetap 30 orang, aset lima milyar dan penjualan per tahun mencapai lima miliar, maka produsen dapat mengajukan pendaftaran kepada UPTD yang membidangi perbenihan untuk dilakukan penilaian dan memperoleh rekomendasi sebagai produsen benih. Dalam proses pengajuan rekomendasi tersebut, produsen diwajibkan melengkapi persyaratan lainnya serta mencantumkan informasi mengenai jenis benih yang akan diproduksi.

Selain memperoleh rekomendasi dari UPTD, produsen benih juga harus mendapatkan izin produksi dari bupati setempat. Permohonan izin produksi diajukan kepada pemerintah daerah dengan melampirkan sejumlah dokumen pendukung, antara lain:

1. Fotokopi akta pendirian perusahaan beserta perubahannya, kecuali untuk produsen perseorangan;
2. Fotokopi Kartu Tanda Penduduk (KTP) pemilik usaha atau penanggung jawab perusahaan;
3. Fotokopi Nomor Pokok Wajib Pajak (NPWP);
4. Fotokopi surat keterangan terkait pelaksanaan pengelolaan lingkungan;

5. Dokumen Upaya Pengelolaan Lingkungan dan Upaya Pemantauan Lingkungan (UKL/UPL);
6. Fotokopi bukti kepemilikan atau penguasaan lahan; dan
7. Surat rekomendasi dari UPTD bidang perbenihan.

Surat izin bupati paling sedikit memuat data:

1. Identitas dan domisili pemilik
2. Data lahan
3. Lokasi lahan
4. Status kepemilikan lahan
5. Jenis tanaman
6. Rencana produksi

Surat izin produksi benih yang diterbitkan oleh bupati selanjutnya disampaikan kepada Menteri Pertanian melalui Direktur Jenderal serta UPTD terkait. Permohonan izin produksi benih harus mendapatkan keputusan diterima atau ditolak paling lambat dalam waktu 10 hari kerja sejak pengajuan dilakukan. Apabila permohonan disetujui, pemerintah daerah akan menerbitkan surat izin produksi benih. Sebaliknya, jika permohonan ditolak, pemohon akan menerima surat penolakan tertulis yang memuat alasan penolakan tersebut.

Dalam hal tidak terdapat keputusan penerimaan maupun penolakan hingga batas waktu 10 hari kerja, maka permohonan dianggap disetujui dan surat izin produksi benih wajib diterbitkan. Jika izin tersebut belum diterbitkan, produsen tetap dapat melaksanakan kegiatan produksi benih dengan menggunakan surat rekomendasi yang dikeluarkan oleh UPTD bidang perbenihan. Izin produksi tersebut berlaku selama produsen benih masih menjalankan kegiatan usahanya secara aktif.

Produsen benih yang telah memperoleh rekomendasi dari UPTD maupun izin resmi dari bupati berkewajiban menjaga mutu benih yang dihasilkan. Selain itu, produsen juga harus melakukan pencatatan dan dokumentasi seluruh kegiatan produksi benih serta memberikan informasi yang diperlukan kepada petugas pengawas benih.

10.3 Produksi Benih Varietas Lokal

Benih yang berasal dari varietas lokal digolongkan sebagai benih sebar. Kegiatan produksi benih varietas lokal dapat dilakukan oleh petani, kelompok tani, maupun gabungan kelompok tani setelah memperoleh rekomendasi dari UPTD yang membidangi perbenihan. Untuk mendapatkan rekomendasi tersebut, produsen benih varietas lokal diwajibkan memiliki bukti kepemilikan atau penguasaan lahan serta sarana pengolahan benih yang memadai.

Regulasi Internasional Produksi dan Sertifikasi Benih

1. OECD Seed Schemes

Merupakan sistem sertifikasi benih internasional yang dibentuk pada tahun 1958 dan diikuti oleh sekitar 64 negara. Sistem ini mengatur tentang standar produksi benih, sertifikasi benih, inspeksi lapangan dan pengujian benih. Adapun tujuan dari regulasi ini yaitu menjaga harmonisasi standar mutu benih secara internasional (OECD, 2025)

2. *Federal Seed Act*

Bertujuan mengatur perdagangan benih antar negara bagian, berpusat di Amerika. Fokus utama yaitu labeling untuk uji daya kecambah, kemurnian, varietas. Melakukan pengendalian benih gulma atau invasif. Proses sertifikasi dilakukan melalui lembaga seperti AOSCA dengan sistem pengawasan kolaboratif federal-state. Prinsip dasar yang menjadi ciri khusus dari sistem ini yaitu kejujuran informasi benih (*truth in labeling*) (AOSCA, 2023)

3. Directive 2002/55/EC dan Directive 92/33/EEC

Mengatur pemasaran dan sertifikasi benih di seluruh Eropa. Persyaratan yang harus dipenuhi meliputi registrasi varietas, kemurnian varietas, sertifikasi sebelum pemasaran dan standar kesehatan tanaman. Benih yang akan diedarkan harus disampling, diuji dan disertifikasi melalui serangkaian kegiatan (European Union, 2002).

4. Kenya. Mengatur kegiatan sertifikasi yang diwajibkan pada varietas-varietas tertentu. Mengatur kelas benih, inspeksi lapangan, dan pengujian lab.

Pola umum regulasi benih Internasional yaitu :

1. Produksi benih. Dimulai dengan benih penjenis (*breeder seed*)-benih dasar-sertifikasi benih
2. Sertifikasi
3. Labeling
4. Kelembagaan
5. Regulasi varietas

Sistem global dalam produksi dan sertifikasi benih terbagi menjadi 3 model yaitu:

1. Model liberal (Amerika), yang berfokus di labeling
2. Model ketat (Eropa dan Cina), sistem varietas terdaftar
3. Model campuran (Indonesia, Kenya, India), sertifikasi dan regulasi varietas

Tabel 10.1. Perbandingan regulasi produksi dan sertifikasi benih berbagai negara

No	Negara/Sistem	Regulasi Utama
1	Internasional	OECD Seed Shemes
2	Uni Eropa	Directive 2002/55/EC
3	Cina	Seed Law of the PRC
4	Amerika Serikat	Federal Seed Act
5	India	Seed Act 1966
6	Kenya	Seed and Plant Varietas Regulation 2016
7	Afghanistan	Seed Law 2006
8	Indonesia	PPR1 no.44 tahun 1195, Permentan Nomor 12 tahun 2018, Kepmentan no 966 tahun 2022

SERTIFIKASI BENIH

Definisi dan Ketentuan Sertifikasi Benih

Sertifikasi benih merupakan rangkaian kegiatan pemeriksaan dan/atau pengujian yang dilakukan untuk menerbitkan sertifikat benih. Sertifikat benih adalah dokumen resmi yang menyatakan bahwa suatu kelompok benih telah memenuhi standar mutu yang ditetapkan oleh lembaga sertifikasi sesuai ketentuan yang berlaku (PERMENTAN RI Nomor 12/PERMENTAN/TP.020/4/2018). Benih bina yang akan diproduksi wajib mengikuti proses sertifikasi benih atau memenuhi sistem standardisasi nasional guna menjamin kualitas benih yang dihasilkan.

Pelaksanaan sertifikasi benih dapat dilakukan oleh UPTD, produsen benih bina yang telah memperoleh sertifikat sistem mutu, maupun unit pelaksana pusat yang memiliki kewenangan dalam bidang pengawasan dan sertifikasi benih. Pengajuan sertifikasi dilakukan oleh produsen atau pemohon benih. Adapun sertifikasi sistem manajemen mutu dilaksanakan oleh Lembaga Sertifikasi Sistem Mutu (LSSM), baik berbentuk perseorangan, badan usaha, badan hukum, maupun instansi pemerintah yang telah memperoleh akreditasi dari Komite Akreditasi Nasional (KAN) sesuai ruang lingkup komoditasnya.

Produsen benih berkewajiban menyampaikan laporan produksi kepada LSSM yang menerbitkan sertifikat sistem manajemen mutu. Selanjutnya, LSSM juga wajib melaporkan pelaksanaan kegiatan sertifikasi kepada KAN dengan tembusan kepada Direktur Jenderal dan instansi yang berwenang dalam pengawasan serta sertifikasi benih sekurang-kurangnya satu kali setiap tahun. Apabila kewajiban pelaporan tersebut tidak dilaksanakan, maka KAN dapat mencabut akreditasi LSSM yang bersangkutan.

Kegiatan sertifikasi benih bina mencakup tiga tahapan utama, yaitu pemeriksaan lapangan, pengujian laboratorium, dan pengawasan pemasangan label benih. Pemeriksaan dilakukan terhadap kebenaran sumber benih, kondisi pertanaman, isolasi tanaman untuk mencegah terjadinya persilangan tidak terkendali, alat panen dan pengolahan, serta kemungkinan tercampurnya benih dengan varietas lain. Dalam sertifikasi benih tanaman pangan, ruang lingkup kegiatan meliputi sertifikasi benih baku, sertifikasi melalui

pemurnian varietas, serta sertifikasi benih varietas lokal (KEPMENTAN RI Nomor 966/TP.010/C/04/2022).

Benih yang dihasilkan melalui penyerbukan bebas maupun yang diperbanyak menggunakan umbi dan rimpang perlu melalui proses pemurnian agar dapat memenuhi standar sebagai benih bermutu. Pemurnian benih bertujuan mempertahankan kemurnian genetik sesuai kelas benihnya, mencegah penumpukan penyakit yang terbawa benih, serta menjamin ketersediaan benih berkualitas bagi produsen dan petani pengguna. Proses pemurnian tersebut dilaksanakan melalui tahapan sertifikasi benih sebagaimana diatur dalam PERMENTAN RI Nomor 23 Tahun 2021.

SERTIFIKASI BENIH TANAMAN PANGAN

Pelaksanaan sertifikasi benih tanaman pangan di Indonesia berpedoman pada Keputusan Menteri Pertanian Republik Indonesia Nomor 966/TP.010/C/04/2022 tentang Petunjuk Teknis Sertifikasi Benih Tanaman Pangan. Dalam ketentuan tersebut, kegiatan sertifikasi mencakup tiga jenis utama, yaitu sertifikasi benih baku, sertifikasi benih melalui pemurnian varietas, dan sertifikasi benih varietas lokal.

1. Sertifikasi Benih Baku

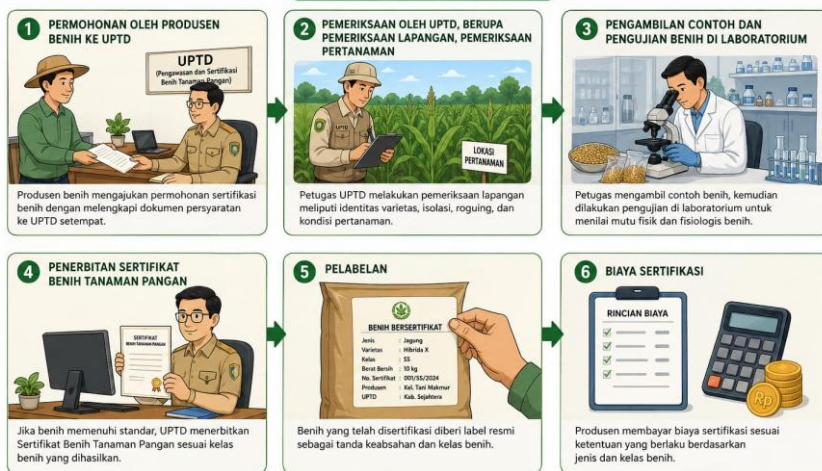
Sertifikasi benih baku diterapkan pada produksi benih unggul tanaman pangan, seperti padi, jagung, sereal lainya, aneka kacang, serta tanaman umbi. Pelaksanaan sertifikasi dilakukan berdasarkan permohonan yang diajukan oleh produsen benih yang telah dinyatakan layak sebagai produsen benih, namun belum menerapkan sistem manajemen mutu dalam kegiatan produksinya.

Prosedur sertifikasi benih tanaman pangan terdiri dari 6 tahapan yaitu:

- a. Permohonan oleh produsen benih ke UPTD
- b. Pemeriksaan oleh UPTD, berupa pemeriksaan lapangan, pemeriksaan pertanaman
- c. Pengambilan contoh dan pengujian benih di laboratorium
- d. Penerbitan sertifikat benih tanaman pangan
- e. Pelabelan
- f. Biaya sertifikasi

SIMULASI PROSEDUR SERTIFIKASI BENIH TANAMAN PANGAN

6 TAHAPAN PROSES



✓ Tujuan: Menjamin ketersediaan benih bermutu, meningkatkan produktivitas tanaman, dan melindungi kepentingan produsen serta konsumen.

Gambar 10.2. Simulasi Prosedur Sertifikasi Benih Tanaman Pangan

Permohonan Sertifikasi

Pengajuan sertifikasi benih dilakukan paling lambat sebelum kegiatan persemaian atau penanaman dimulai. Dalam pengajuan tersebut, produsen benih wajib melampirkan label benih sumber yang masih berlaku masa edarnya. Selanjutnya, dilakukan pemeriksaan dokumen untuk memastikan kesesuaian data pemohon, label benih, serta jumlah benih sumber dengan kondisi yang terdapat di lapangan (Gambar 10.2).

Pemeriksaan Lapangan

Pemeriksaan lapangan dilakukan untuk menilai kesesuaian kondisi lahan produksi benih. Aspek yang diperiksa meliputi isolasi jarak dan isolasi waktu guna mencegah terjadinya persilangan dengan tanaman lain, riwayat penggunaan lahan, kebenaran varietas yang ditanam, batas areal pertanaman, serta rencana penanaman yang diajukan. Data rencana penanaman mencakup nama varietas, waktu penyebaran benih, tanggal tanam, kelas benih, dan luas areal produksi.

Dalam pelaksanaan sertifikasi, luas maksimum untuk satu unit sertifikasi adalah 1 hektar. Areal sertifikasi dapat berbentuk hamparan maupun petakan, dengan ketentuan jarak antarpetakan tidak melebihi 10 meter. Selain itu, perbedaan waktu tanam dalam satu unit sertifikasi dibatasi maksimal lima hari.

Pemeriksaan Pertanaman

Pemeriksaan pertanaman dilaksanakan pada beberapa tahap pertumbuhan tanaman, yaitu fase vegetatif, fase pembungaan, dan menjelang panen. Kegiatan pemeriksaan diawali dengan penelaahan dokumen hasil pemeriksaan sebelumnya, kemudian dilanjutkan dengan verifikasi lokasi, luas areal, dan tanggal tanam pertanaman yang akan diperiksa.

Pengamatan dilakukan pada sejumlah titik sampel yang telah ditentukan untuk mengetahui keberadaan varietas lain maupun tipe simpang dalam pertanaman. Pada areal pertanaman seluas hingga 2 hektar diperlukan sedikitnya empat titik contoh pemeriksaan. Ketentuan OECD juga menyebutkan bahwa lahan dengan luas kurang dari 1 hektar tetap memerlukan minimal empat sampel pemeriksaan. Selain pertanaman, pemeriksaan juga dilakukan terhadap alat panen, fasilitas pengolahan, tempat pengolahan benih, dan ruang penyimpanan. Pengawasan tersebut bertujuan mencegah terjadinya pencampuran benih dengan varietas lain sehingga kemurnian benih tetap terjaga.

Pengambilan contoh benih untuk pengujian laboratorium

Pengambilan sampel benih untuk keperluan pengujian laboratorium dilakukan oleh petugas pengambil contoh benih yang memiliki kompetensi di bidangnya. Sampel diambil dari kelompok benih yang telah dinyatakan lulus pemeriksaan lapangan akhir, selesai melalui proses pengolahan, serta memiliki identitas yang jelas. Pengujian mutu benih meliputi analisis kadar air, pengujian kemurnian fisik, dan pengujian daya kecambah. Prosedur pengambilan contoh benih dilakukan sesuai dengan ketentuan ISTA Rules.

Jika hasil uji daya berkecambah belum memenuhi standar mutu akibat kondisi dormansi benih, maka pengujian dapat dilakukan kembali.

Benih yang telah memenuhi seluruh persyaratan sertifikasi dan dinyatakan lulus akan memperoleh sertifikat benih yang diterbitkan oleh UPTD. Sertifikat tersebut memuat informasi mengenai identitas produsen, alamat produsen, data kelompok benih, tingkat kemurnian varietas, tanggal penyelesaian pengujian, serta masa edar benih.

Pelabelan

Pelabelan dilakukan setelah produsen memperoleh sertifikat benih. Dalam tahap ini, produsen mengajukan permohonan legalisasi label yang dilengkapi dengan nomor seri label. Label benih dapat berbentuk kode QR, stempel, hologram, maupun segel yang ditempatkan pada bagian kemasan yang mudah terlihat. Warna label menunjukkan kelas benih, yaitu kuning untuk benih penjenis, putih untuk benih dasar, dan biru untuk benih sebar. Label pada benih yang diperbanyak melalui biji memuat beberapa informasi penting, antara lain:

- a. Nama dan alamat produsen;
- b. Nomor induk sertifikasi yang terdiri atas kode jenis tanaman, varietas, kelas benih, wilayah administrasi, identitas produsen nasional, dan nomor urut permohonan;
- c. Nomor seri label;
- d. Nama varietas;
- e. Kelas benih;
- f. Nomor lot benih;
- g. Persentase campuran varietas lain;
- h. Tingkat kemurnian benih;
- i. Kandungan kotoran benih;
- j. Daya berkecambah;
- k. Kadar air benih;
- l. Berat atau isi kemasan;
- m. Tanggal panen;
- n. Tanggal selesai pengujian; dan

- o. Batas akhir masa edar benih.

Sementara itu, label pada benih yang diperbanyak menggunakan bahan tanam selain biji memuat informasi berupa:

- a. Nama dan alamat produsen benih;
- b. Nomor induk sertifikasi;
- c. Jenis tanaman dan nama varietas;
- d. Kelas benih;
- e. Jumlah benih atau bahan tanam;
- f. Tanggal panen;
- g. Tanggal mulai edar; dan
- h. Tanggal berakhirnya masa edar benih.

2. Sertifikasi Benih melalui Pemurnian Varietas

Sertifikasi benih melalui pemurnian varietas diterapkan khusus pada benih unggul tanaman aneka kacang dan umbi. Kelas benih yang dapat disertifikasi dalam sistem ini hanya benih sebar (BR) dan tidak dapat diperbanyak kembali menjadi kelas BR1, BR2, BR3, maupun BR4. Permohonan sertifikasi diajukan oleh produsen benih yang telah memenuhi syarat sebagai produsen benih, tetapi belum menerapkan sistem manajemen mutu dalam kegiatan produksinya.

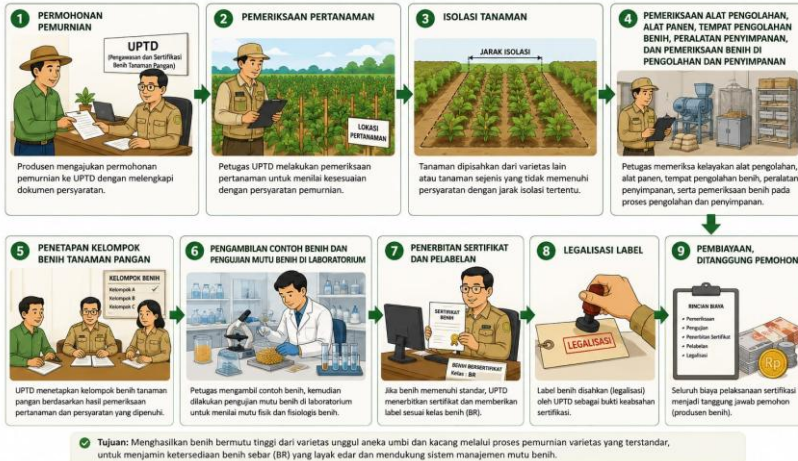
Proses sertifikasi melalui pemurnian varietas meliputi beberapa tahapan, yaitu:

- a. Pengajuan permohonan pemurnian;
- b. Pemeriksaan pertanaman;
- c. Pelaksanaan isolasi tanaman;
- d. Pemeriksaan alat panen, alat pengolahan, fasilitas pengolahan, tempat penyimpanan, serta kondisi benih pada saat pengolahan dan penyimpanan;
- e. Penetapan kelompok benih tanaman pangan;
- f. Pengambilan contoh benih dan pengujian mutu di laboratorium;
- g. Penerbitan sertifikat dan pelabelan benih;
- h. Legalisasi label; dan

- i. Pembiayaan kegiatan yang menjadi tanggung jawab pemohon.

SIMULASI SERTIFIKASI BENIH MELALUI PEMURNIAN VARIETAS

Sertifikasi benih melalui pemurnian varietas dilakukan hanya pada benih unggul aneka umbi dan kacang.
Kelas benih yang disertifikasi hanya untuk kelas benih sebar (BR) dan tidak dapat diperbanyak menjadi BR1, BR2, BR3 dan BR4.



Gambar 10.3. Simulasi Sertifikasi Benih Melalui Pemurnian Varietas

Pemohon terlebih dahulu mengajukan permohonan pemeriksaan kebenaran varietas kepada UPTD setempat untuk dilakukan identifikasi dan verifikasi varietas yang akan dimurnikan. Setelah identitas varietas dinyatakan benar oleh UPTD, produsen benih dapat melaksanakan kegiatan pemurnian varietas. Proses pemurnian hanya berlaku untuk satu varietas pada satu lokasi dengan luas maksimum areal pemurnian sebesar 1 hektar.

Tahap berikutnya adalah pemeriksaan pertanian yang dilakukan oleh petugas untuk memastikan kesesuaian varietas serta memastikan tidak terjadi pencampuran dengan varietas lain. Pemeriksaan dilakukan pada beberapa fase pertumbuhan tanaman, yaitu fase vegetatif, fase pembungaan, dan menjelang panen. Pengamatan dilakukan menggunakan titik sampel yang jumlah dan lokasinya telah ditentukan sebelumnya untuk

mendeteksi adanya varietas lain maupun tipe simpang dalam pertanaman.

Selain pemeriksaan pertanaman, dilakukan pula evaluasi terhadap kondisi isolasi tanaman guna mencegah terjadinya pencampuran gen akibat penyerbukan silang maupun perpindahan organisme pengganggu tanaman (OPT). Pemeriksaan juga mencakup alat dan fasilitas yang digunakan selama kegiatan penanaman, panen, pascapanen, serta ruang penyimpanan benih untuk memastikan tidak terjadi kontaminasi benih dengan varietas lain.

Setelah seluruh tahapan pemeriksaan selesai, dilakukan pengambilan contoh benih untuk pengujian mutu di laboratorium. Apabila hasil pemeriksaan lapangan dan pengujian laboratorium menunjukkan bahwa benih memenuhi persyaratan yang ditetapkan, maka proses dilanjutkan dengan penerbitan label dan legalisasi benih.

3. Sertifikasi Benih Varietas Lokal

Sertifikasi benih varietas lokal tanaman pangan diajukan oleh produsen benih yang telah memenuhi syarat sebagai produsen benih, namun belum menerapkan sistem manajemen mutu dalam kegiatan produksinya. Benih yang disertifikasi merupakan benih lokal yang berasal dari daerah setempat.

Tahapan sertifikasi benih varietas lokal meliputi:

- a. Pemeriksaan awal terhadap dokumen administrasi dan kondisi lahan;
- b. Pemeriksaan pertanaman;
- c. Pemeriksaan benih di tempat penyimpanan;
- d. Pengambilan sampel dan pengujian mutu benih di laboratorium;
- e. Penerbitan sertifikat benih;
- f. Pelabelan benih; dan
- g. Pembiayaan kegiatan sertifikasi.

SIMULASI SERTIFIKASI BENIH VARIETAS LOKAL

Sertifikasi benih lokal tanaman pangan diajukan oleh produsen benih yang sudah layak menjadi produsen benih namun belum menerapkan sistem manajemen mutu. Benih yang disertifikasi adalah benih lokal setempat. Prosedur sertifikasi benih varietas lokal meliputi:



Pemeriksaan pendahuluan dilakukan setelah produsen mengajukan permohonan sertifikasi benih lokal kepada UPTD setempat. Permohonan berlaku untuk satu unit sertifikasi yang terdiri dari 1 varietas dalam 1 lokasi. Pemeriksaan pertanaman dilakukan oleh Pengawas Benih Tanaman (PBT) dengan memastikan adanya tanaman yang disertifikasi pada lokasi yang ditetapkan. Selanjutnya dilakukan pemeriksaan pada benih di penyimpanan.

Pengambilan contoh benih dilakukan oleh petugas kompeten pengambil contoh benih. Benih yang telah diambil selanjutnya dilakukan pengujian mutu benih berupa pengujian kadar air, analisis kemurnian fisik dan pengujian daya berkecambah.



TUJUAN: Menghasilkan benih bermutu dari varietas lokal setempat melalui proses sertifikasi yang terstandar, mendukung sistem manajemen mutu benih, serta meningkatkan kepercayaan konsumen.



Gambar 10.4. Simulasi Sertifikasi Benih Varietas Lokal

Permohonan sertifikasi benih lokal diajukan kepada UPTD setempat dan hanya berlaku untuk satu unit sertifikasi yang terdiri atas satu varietas pada satu lokasi produksi (Gambar 4). Pemeriksaan pertanaman dilakukan oleh Pengawas Benih Tanaman (PBT) dengan memastikan bahwa tanaman yang diajukan benar-benar terdapat pada lokasi yang telah ditetapkan. Setelah itu, dilakukan pemeriksaan terhadap benih yang berada di tempat penyimpanan.

Pengambilan contoh benih dilakukan oleh petugas yang memiliki kompetensi sebagai pengambil sampel benih. Sampel yang telah diambil kemudian diuji di laboratorium untuk mengetahui mutu benih melalui pengujian kadar air, analisis kemurnian fisik, dan pengujian daya berkecambah.

SERTIFIKASI BENIH TANAMAN HORTIKULTURA

Ketentuan Sertifikasi Benih Tanaman Hortikultura

Pelaksanaan sertifikasi benih hortikultura di Indonesia mengacu pada Peraturan Menteri Pertanian Republik Indonesia Nomor 4 Tahun 2026 tentang Produksi, Sertifikasi, dan Pengawasan Peredaran Benih Hortikultura yang menggantikan Peraturan

Menteri Pertanian Nomor 48/Permentan/SR.120/8/2012. Sistem sertifikasi dilakukan melalui pengawasan pertanaman dan pascapanen, penerapan sistem manajemen mutu, maupun sertifikasi produk. Namun, pada kebanyakan benih secara *in vitro*, florikultura, dan jamur, sertifikasi tidak dilakukan melalui pengawasan pertanaman dan pascapanen.

Seluruh produsen benih bermutu, baik perseorangan, badan usaha, badan hukum, maupun instansi pemerintah dengan skala usaha kecil, menengah, dan besar diwajibkan memiliki sertifikat kompetensi. Khusus produsen benih berskala besar, diwajibkan pula memiliki sertifikat sistem manajemen mutu. Sertifikat kompetensi tersebut terdiri atas sertifikat kompetensi produsen benih dan sertifikat kompetensi peredaran benih. Proses penerbitan sertifikat kompetensi dimulai dari pengajuan permohonan oleh produsen benih kepada instansi pengawasan dan sertifikasi benih. Selanjutnya dilakukan pemeriksaan terhadap persyaratan administrasi dan teknis, kemudian dilanjutkan dengan validasi lapangan apabila seluruh persyaratan telah dipenuhi.

Sertifikasi sistem manajemen mutu dilaksanakan oleh Lembaga Sertifikasi Sistem Mutu (LSSM) yang telah terakreditasi oleh Komite Akreditasi Nasional (KAN). Dalam pelaksanaannya, produsen benih wajib menerapkan sistem manajemen mutu yang mengacu pada standar ISO 9001. Persyaratan administratif yang harus dipenuhi untuk memperoleh sertifikat sistem manajemen mutu meliputi:

1. Perizinan usaha perbenihan hortikultura bagi badan usaha atau surat penugasan organisasi bagi instansi pemerintah;
2. Sertifikat kompetensi produsen benih;
3. Sertifikat benih hortikultura;
4. Dokumen sistem mutu;
5. Surat pernyataan ruang lingkup sertifikasi yang diajukan;
6. Surat pernyataan pemenuhan persyaratan sistem manajemen mutu; dan
7. Surat pernyataan kesediaan memberikan informasi yang diperlukan dalam proses evaluasi.

Selain persyaratan administratif, produsen juga harus memenuhi persyaratan teknis, yaitu:

1. Memiliki sumber daya manusia yang kompeten sesuai skala usaha;
2. Memiliki akses terhadap benih sumber serta fasilitas produksi dan penyimpanan benih;
3. Menyusun rencana produksi benih setiap musim tanam atau setiap tahun;
4. Memiliki dokumentasi kegiatan sertifikasi benih secara mandiri;
5. Memiliki data produksi dan distribusi benih; serta
6. Memiliki prosedur operasional baku produksi benih bermutu sesuai komoditas yang diusahakan.

Dalam proses sertifikasi, LSSM melakukan audit dokumen dan evaluasi penerapan sistem manajemen mutu melalui dua tahap. Audit tahap pertama dilakukan terhadap dokumen dan sistem mutu selama tiga hari kerja. Jika hasil audit tahap pertama dinyatakan lengkap, maka dilanjutkan dengan audit tahap kedua di lokasi pemohon selama lima hari kerja untuk mengevaluasi penerapan sistem manajemen mutu secara langsung.

Setelah proses audit selesai, komite LSSM melakukan penilaian terhadap hasil audit dan menetapkan keputusan sertifikasi. Apabila memenuhi persyaratan, produsen akan memperoleh sertifikat sistem manajemen mutu. Sebaliknya, jika tidak memenuhi persyaratan, pemohon akan menerima surat penolakan. Sertifikat tersebut berlaku selama tiga tahun dan dapat diperpanjang dengan mengajukan permohonan paling lambat empat bulan sebelum masa berlaku berakhir. Selama masa berlaku sertifikat, LSSM melakukan audit surveilans untuk mengevaluasi efektivitas penerapan sistem manajemen mutu.

Produsen benih juga diwajibkan menyampaikan laporan kegiatan sertifikasi kepada LSSM dengan tembusan kepada Direktur Jenderal dan instansi pengawas sertifikasi setiap bulan. Apabila kewajiban tersebut tidak dipenuhi, produsen dapat dikenai sanksi berupa teguran tertulis. Jika dalam waktu tujuh hari teguran tidak ditindaklanjuti, Direktur Jenderal dapat merekomendasikan pencabutan sertifikat sistem manajemen mutu. Di sisi lain, LSSM juga

wajib melaporkan kegiatan sertifikasi sistem manajemen mutu kepada KAN sekurang-kurangnya satu kali setiap tahun. Apabila LSSM tidak melaksanakan kewajiban pelaporan, KAN dapat mencabut akreditasinya berdasarkan rekomendasi Direktur Jenderal. Laporan sertifikasi yang disampaikan LSSM mencakup nama dan alamat lembaga, status serta nomor akreditasi, ruang lingkup akreditasi, perubahan terkait akreditasi, dan pelaksanaan sertifikasi sistem manajemen mutu.

Prosedur Sertifikasi Benih Tanaman Hortikultura

Benih hortikultura bermutu wajib memenuhi standar teknis minimal yang ditetapkan melalui Surat Keputusan Menteri Pertanian dan ditandatangani oleh Direktur Jenderal. Standar tersebut mencakup mutu fisik, mutu genetik, mutu fisiologis, dan kesehatan benih.

Kegiatan sertifikasi benih hortikultura meliputi:

1. Pengawasan pertanaman dan pascapanen;
2. Sertifikasi melalui sistem manajemen mutu;
3. Pengujian produk benih hortikultura; dan
4. Penilaian proses produksi.

Sertifikasi melalui pengawasan pertanaman dan pascapanen ditujukan bagi produsen perseorangan serta badan usaha mikro, kecil, dan menengah. Sementara itu, produsen berskala besar dan instansi pemerintah menerapkan sistem manajemen mutu dan pengujian produk. Sertifikasi produk dilaksanakan oleh Lembaga Sertifikasi Produk (LSPro) atau instansi pemerintah yang telah terakreditasi KAN sesuai ruang lingkup hortikultura.

Untuk produksi benih melalui perbanyakan *in vitro*, florikultura, dan jamur, sertifikasi dilakukan melalui penilaian proses produksi. Pada produsen perseorangan dan usaha mikro, kecil, serta menengah, sertifikasi dilakukan oleh instansi pengawas dan sertifikasi benih. Namun, produsen atau instansi pemerintah yang telah menerapkan sistem manajemen mutu dapat melaksanakan sertifikasi proses produksi secara mandiri.

Tahapan Sertifikasi Benih Hortikultura

Tahapan sertifikasi benih hortikultura terdiri dari 5 tahapan, yaitu:

1. Pengajuan permohonan sertifikasi oleh produsen benih;
2. Pemeriksaan lapangan;
3. Pengujian mutu benih di laboratorium dan/atau pemeriksaan mutu di gudang;
4. Penerbitan sertifikat benih; dan
5. Pelabelan benih.

Permohonan sertifikasi melalui mekanisme pengawasan pertanaman dan pascapanen diajukan kepada instansi pengawas dan sertifikasi, sedangkan sertifikasi melalui sistem manajemen mutu diajukan kepada penjamin mutu. Permohonan tersebut harus dilengkapi persyaratan administratif dan teknis.

Persyaratan administratif meliputi:

1. Salinan KTP untuk produsen perseorangan;
2. Nomor induk berusaha bagi badan usaha; dan
3. Profil usaha serta surat penugasan pimpinan bagi instansi pemerintah.

Persyaratan teknis mencakup:

1. Ketersediaan sumber daya manusia yang kompeten;
2. Kepemilikan benih sumber serta fasilitas produksi dan penyimpanan;
3. Rencana produksi benih setiap musim tanam atau tahunan;
4. Data produksi benih; dan
5. Prosedur operasional baku produksi benih bermutu sesuai komoditas.

Pemeriksaan lapangan dilakukan oleh Pengawas Benih Tanaman (PBT) melalui verifikasi dokumen permohonan, pemeriksaan pendahuluan, pemeriksaan pertanaman, dan evaluasi proses pengolahan benih bina. Pemeriksaan pendahuluan dilakukan sejak sebelum tanam hingga penanaman untuk memastikan kesesuaian lokasi, kondisi lahan, dan benih sumber. Persyaratan lahan meliputi isolasi dan unit sertifikasi.

Pemeriksaan pertanaman dilakukan pada fase pertumbuhan tertentu yang menunjukkan karakter khas tanaman. Pemeriksaan bertujuan memastikan kebenaran varietas, kemurnian genetik, tidak adanya pencampuran atau persilangan dengan tanaman lain, serta memastikan bebas dari organisme pengganggu tanaman yang dapat terbawa benih. Pertanaman yang dinyatakan lulus akan ditetapkan menjadi kelompok benih dengan identitas yang mencakup jenis tanaman, varietas, nomor kelompok benih, nomor induk sertifikasi, blok pertanaman, dan tanggal panen.

Apabila pemeriksaan dokumen dan lapangan memenuhi persyaratan, maka dilanjutkan dengan pengujian mutu benih di laboratorium atau gudang. Benih yang memenuhi standar mutu atau persyaratan teknis minimal akan diterbitkan sertifikat benih sesuai kelas yang dicapai. Jika mutu benih tidak memenuhi kelas yang diajukan tetapi memenuhi kelas di bawahnya, maka sertifikat diterbitkan sesuai kelas yang terpenuhi. Namun, apabila tidak memenuhi standar kelas mana pun, benih dinyatakan tidak lulus sertifikasi. Khusus pada benih hortikultura hibrida, pengujian tambahan berupa uji hibriditas wajib dilakukan melalui pengujian per tanaman maupun metode molekuler.

DAFTAR PUSTAKA

- Amrullah, Murtilaksono A., Adiwena M., Arifin FR. 2023. Teknologi budidaya dan Produksi Tanaman. Syiah Kuala University Press & Universitas Borneo Tarakan
- Kartasapoetra, A.G. 2003. Teknologi Benih (Pengolahan Benih dan Tuntunan Praktikum). Cetakan ke empat. Rineka Cipta. Jakarta
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). 2025. OECD Seeds Schemes. Paris. OECD.
- Association of Official Seed Certifying Agencies (AOSCA). 2023. USDA AMS Clarifies Varietal Labeling Requirements of the Federal Seed Act. USA. AOSCA
- European Union. 2002. Council Directive 2002/55/EC on the Marketing of Vegetable Seed. Official Journal of the European Community
- Peraturan Menteri Pertanian RI Nomor 4 Tahun 2026 tentang produksi, sertifikasi dan pengawasan peredaran benih hortikultura
- Keputusan Menteri Pertanian RI Nomor: 966/TP.010/C/04/2022 tentang petunjuk teknis sertifikasi benih tanaman pangan
- Peraturan Menteri Pertanian Republik Indonesia Nomor 12/permentan/TP.020/4/2018 tentang Produksi, Sertifikasi dan Peredaran Benih Tanaman,
- Peraturan Menteri Pertanian Republik Indonesia Nomor 21 Tahun 2021 tentang Pembenihan Hortikultura.
- Keputusan Menteri Pertanian Republik Indonesia Nomor 990/HK.150/C/05/2018 tentang Petunjuk Teknis Produksi Benih Tanaman Pangan

BAB 11

PRODUKSI BENIH HIBRIDA DAN NON HIBRIDA

11.1 Pengertian Benih Hibrida dan Non Hibrida

Benih Hibrida adalah benih yang dihasilkan melalui proses persilangan antara dua atau lebih tanaman yang mempunyai struktur genetik yang berbeda. Tujuan dari proses persilangan ini yaitu untuk menghasilkan keturunan dengan sifat-sifat unggul yang lebih baik dibandingkan dengan tanaman induknya. Proses persilangan ini dikenal dengan istilah *heterosis* atau keunggulan hibrida (Chakrabarty et al., 2023). Keunggulan hibrida tersebut seperti peningkatan hasil, ketahanan terhadap penyakit, serta ketahanan terhadap kondisi lingkungan yang lebih ekstrem seperti kekeringan atau banjir. Keunggulan ini menjadikan benih hibrida banyak digunakan dalam produksi tanaman pangan komersial seperti jagung hibrida, padi hibrida, tomat hibrida, dan beberapa tanaman hortikultura lainnya. Dalam produksi benih hibrida, proses persilangan terkontrol sangat penting untuk memastikan kualitas dan konsistensi sifat-sifat unggul yang diinginkan. Benih hibrida hanya dapat digunakan satu kali musim tanam, dan tidak cocok untuk disemai kembali, hal ini dikarenakan secara genetik tidak stabil, sehingga keturunan benih selanjutnya akan menunjukkan hasil yang berbeda secara signifikan dengan tanaman induknya. Untuk musim tanaman selanjutnya, karena tanaman yang dihasilkan oleh benih hibrida tidak akan menghasilkan keturunan yang sama seperti induknya (Fabijanski & Arnison, 1989). Oleh karena itu, setiap musim tanam petani harus membeli benih hibrida baru, hal ini menyebabkan adanya ketergantungan petani terhadap produsen benih dan biaya yang relatif lebih tinggi.

Benih non Hibrida merupakan benih yang dihasilkan melalui proses persilangan secara alami atau kegiatan seleksi tanaman yang tidak melibatkan adanya rekayasa genetika atau teknik persilangan

terkontrol seperti pada benih hibrida. Benih non hibrida diperoleh melalui penyerbukan terbuka atau seleksi alami dalam populasi tanaman. Benih non hibrida mempunyai peranan penting yaitu terhadap keragaman genetik, hal ini sangat penting terutama untuk menjaga ketahanan agroekosistem terhadap serangan hama, penyakit, dan kondisi perubahan iklim yang ekstrem (Mulvany, 2021) Tanaman yang dihasilkan dari benih non hibrida cenderung lebih stabil secara genetik dan dapat berkembang biak secara alami, sehingga hal ini memungkinkan hasil panennya dapat digunakan untuk benih musim tanam berikutnya. Meskipun demikian, benih non hibrida cenderung mempunyai produktivitas lebih rendah dan lebih bervariasi dibandingkan dengan benih hibrida, disebabkan dalam prosesnya tidak terdapat proses seleksi genetik untuk sifat-sifat unggul tertentu.

Meskipun benih hibrida mempunyai keunggulan dalam peningkatan produktivitas dan ketahanan terhadap penyakit, tetapi benih non hibrida mempunyai keunggulan lain yaitu digunakan dalam sistem pertanian yang lebih berkelanjutan. Salah satu keunggulan utama benih non hibrida adalah kemampuannya untuk disemai kembali, memungkinkan petani dapat menyimpan dan memperbanyak benih dari hasil panennya. Selain itu, benih non hibrida mempunyai kontribusi dalam menjaga keanekaragaman genetik tanaman, hal ini menjadi salah satu aspek penting untuk menghadapi adanya perubahan iklim secara ekstrem dan masalah ketahanan pangan. Tanaman seperti padi lokal, kedelai lokal, dan beberapa jenis hortikultura tradisional adalah contoh tanaman yang banyak menggunakan benih non hibrida. Keputusan terkait penggunaan benih hibrida atau non hibrida harus mempertimbangkan kebutuhan spesifik petani, tujuan produksi, dan kondisi lingkungan setempat. Peran dari masing-masing jenis benih tersebut terus berkembang, terutama dalam upaya untuk mengintegrasikan dalam sistem pertanian yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan.

11.2 Perbedaan Utama Antara Benih Hibrida dan Non Hibrida

Benih hibrida dan benih non hibrida mempunyai perbedaan utama yaitu secara aspek genetik dan proses perakitan nya. Benih hibrida merupakan benih yang dihasilkan dari proses persilangan secara terkontrol antara dua tetua atau lebih yang mempunyai struktur genetik berbeda dan umumnya dihasilkan melalui proses pemuliaan tanaman secara intensif. Tujuan utama dari proses persilangan ini adalah untuk menggabungkan sifat sifat unggul dari kedua tetua sehingga keturunan yang dihasilkan mempunyai performa morfologi dan agronomi lebih baik. Fenomena ini disebut heterosis atau *hybrid vigor* yaitu performa dari generasi pertama (F1) menunjukkan pertumbuhan, *vigor* dan produktivitas yang lebih tinggi dibandingkan tetua nya. Sedangkan, benih non hibrida yaitu benih yang dihasilkan dari proses seleksi alami atau seleksi buatan dalam populasi tanaman yang relatif stabil secara genetik. Varietas ini sering disebut sebagai varietas bersari bebas (*Open Pollinated Varieties/OPV*). Benih non hibrida dapat menghasilkan benih yang relatif serupa dengan induknya jika ditanam kembali. Oleh karena itu, secara genetik benih hibrida akan mempunyai performa tanaman yang lebih seragam, tetapi tidak stabil untuk digunakan pada musim tanaman berikutnya, sedangkan benih non hibrida mempunyai stabilitas genetik yang lebih tinggi pada generasi berikutnya (Acquaah, 2012).

Perbedaan yang lain yaitu terkait dengan kualitas hasil dan performa agronomi tanaman. Benih hibrida pada umumnya menghasilkan tanaman dengan tingkat produktivitas lebih tinggi dibandingkan tanaman yang berasal dari benih non hibrida, hal ini disebabkan adanya efek heterosis yang mampu meningkatkan *vigor* tanaman, efisiensi fotosintesis, dan kemampuan adaptasi terhadap lingkungan. Selain itu, tanaman hibrida pada umumnya mempunyai tingkat keseragaman yang lebih tinggi dalam pertumbuhan, tinggi tanaman, waktu berbunga, serta ukuran dan kualitas hasil panen. Keseragaman yang semakin tinggi akan memudahkan pengelolaan tanaman serta pelaksanaan panen secara mekanis. Sedangkan tanaman yang berasal dari benih non

hibrida cenderung mempunyai tingkat variasi fenotipe yang lebih besar, hal ini disebabkan adanya proses penyerbukan secara terbuka, sehingga memungkinkan terjadinya rekombinasi genetik secara alami. Meskipun demikian, kemampuan adaptasi varietas non hibrida terhadap kondisi lingkungan lokal lebih baik dibandingkan varietas hibrida, hal ini dikarenakan varietas non hibrida telah mengalami proses seleksi alami dalam jangka waktu yang panjang. Dalam beberapa sistem pertanian tradisional, varietas non hibrida mempunyai kemampuan adaptasi yang lebih baik terhadap kondisi cekaman lingkungan seperti kekeringan, tanah marginal, atau tekanan biotik lokal (Duvick, 2001; Acquaaah, 2012).

Perbedaan lain yang signifikan antara benih hibrida dan non hibrida yaitu berkaitan dengan aspek ekonomi, terutama terkait tentang biaya produksi dan ketergantungan petani terhadap produsen benih. Produksi benih hibrida membutuhkan teknik pemuliaan tanaman yang lebih kompleks, termasuk kegiatan pemeliharaan galur tetua (*inbrida*), pengendalian penyerbukan (polinasi), serta proses produksi benih yang sesuai standar yang sudah ada. Proses tersebut yang menyebabkan harga benih hibrida relatif lebih mahal dibandingkan benih non hibrida. Selain itu, benih hibrida tidak dapat digunakan kembali untuk musim tanam berikutnya karena generasi kedua (F₂) akan mengalami segregasi genetik yang menyebabkan terjadinya penurunan performa dan tanaman menjadi tidak seragam. Sebaliknya, benih non hibrida sebagian hasil panen dapat digunakan sebagai sumber benih untuk penanaman berikutnya, hal ini berdampak terhadap berkurangnya biaya produksi serta meningkatkan kemandirian petani dalam sistem pertanian lokal (Louwaars & de Boef, 2012; Fehr, 1991).

11.3 Pentingnya Benih dalam Pemuliaan Tanaman dan Produksi Pertanian

Benih mempunyai peran utama sebagai pembawa informasi genetik yang menentukan potensi pertumbuhan, produktivitas, dan ketahanan tanaman terhadap berbagai kondisi cekaman lingkungan. Benih yang mempunyai mutu

genetik, fisiologis, dan fisik yang baik akan dapat menghasilkan tanaman dengan *vigor* tinggi, pertumbuhan seragam, serta respons yang lebih baik terhadap manajemen agronomi. Oleh karena itu, penggunaan benih bermutu merupakan cara paling efisien untuk meningkatkan produktivitas pertanian. Beberapa studi menunjukkan bahwa penggunaan benih unggul dapat meningkatkan produktivitas tanaman hingga 20–40% dibandingkan dengan benih tradisional atau benih bermutu rendah (N. P. Louwaars & de Boef, 2012). Dengan demikian, Benih berkualitas tinggi merupakan prasyarat utama untuk mendukung ketahanan pangan dan keberlanjutan sistem produksi pertanian di berbagai ekologi.

Benih dalam mempunyai peran strategis dalam kegiatan pemuliaan tanaman yaitu berperan sebagai bahan utama dalam proses seleksi dan pengembangan varietas unggul. Pemuliaan tanaman merupakan kegiatan merekayasa dan pemilihan genetik untuk memperoleh kombinasi sifat yang diinginkan, seperti hasil tinggi, ketahanan terhadap hama dan penyakit, toleransi terhadap cekaman abiotik, serta kualitas hasil yang lebih baik. Proses ini melibatkan berbagai tahapan mulai dari persilangan, segregasi populasi, seleksi individu, hingga uji adaptasi varietas. Benih yang dihasilkan dari proses pemuliaan tanaman akan membawa kombinasi genetik baru yang menjadi dasar terbentuknya varietas unggul baru. Keberhasilan program pemuliaan tanaman sangat ditentukan oleh kualitas benih induk (inbrida) serta kemurnian genetik dari varietas tersebut (Acquaah, 2012). Oleh karena itu, produksi benih yang baik harus dapat menjamin terkait identitas varietas, kemurnian genetik, serta kemampuan tumbuh yang optimal.

Penggunaan benih unggul akan memungkinkan untuk memperoleh hasil panen yang lebih tinggi meskipun dengan *input* produksi yang relatif sama, hal ini meningkatkan efisiensi penggunaan lahan, air, dan pupuk. Varietas unggul yang dihasilkan melalui pemuliaan tanaman juga sering dirancang untuk memiliki adaptasi yang ih baik terhadap perubahan iklim, seperti toleransi terhadap kekeringan, salinitas, atau suhu tinggi. Dengan demikian, penggunaan benih unggul tidak hanya

meningkatkan produktivitas tetapi juga memperkuat ketahanan sistem pertanian terhadap risiko lingkungan. Hasil Penelitian menunjukkan bahwa peningkatan produktivitas tanaman pangan global sebagian besar dipengaruhi oleh kemajuan dalam teknologi benih dan pemuliaan varietas unggul (Tester & Langridge, 2010). Oleh karena itu, penelitian yang berkaitan dengan benih dan pemuliaan tanaman merupakan strategi penting dalam menghadapi tantangan ketahanan pangan global di masa depan.

Dalam perspektif pembangunan pertanian berkelanjutan, benih juga memainkan peran penting dalam menjaga stabilitas produksi dan meningkatkan kesejahteraan petani. Sistem benih yang kuat memungkinkan distribusi varietas unggul secara luas kepada petani sehingga teknologi genetik hasil pemuliaan dapat diadopsi secara efektif di tingkat lapangan. Selain itu, benih berkualitas juga membantu mengurangi risiko kegagalan panen akibat serangan organisme pengganggu tanaman atau kondisi lingkungan yang tidak menguntungkan. Pada tingkat makro, penggunaan benih unggul berkontribusi terhadap peningkatan produksi nasional dan stabilitas pasokan pangan. Oleh karena itu, pengembangan sistem perbenihan yang terintegrasi—mulai dari penelitian, produksi benih sumber, sertifikasi, hingga distribusi kepada petani—menjadi komponen penting dalam kebijakan pembangunan pertanian modern (N. Louwaars & de Boef, 2012). Dengan demikian, benih juga mempunyai peran sebagai instrumen strategis dalam meningkatkan ketahanan pangan dan keberlanjutan sistem pertanian global.

11.4 Sistem Produksi Benih Non Hibrida (*Open Pollinated Varieties*)

Sistem produksi benih non hibrida atau *open pollinated varieties* (OPV) merupakan pendekatan perbenihan yang mempertahankan kestabilan genetik suatu varietas melalui mekanisme reproduksi alami tanpa rekombinasi genetik terkontrol seperti pada hibrida. Secara genetik, varietas non hibrida umumnya terdiri atas populasi tanaman yang relatif homogen, terutama pada tanaman menyerbuk sendiri, namun masih memungkinkan adanya

variasi genetik terbatas pada tanaman menyerbuk silang. Karakteristik utama benih non hibrida adalah kemampuannya untuk mempertahankan sifat fenotipik yang relatif konsisten dari generasi ke generasi apabila proses produksi benih dilakukan dengan benar. Dalam konteks pemuliaan tanaman, OPV sering dihasilkan melalui seleksi galur murni (*pure line selection*) atau seleksi massa (*mass selection*), tergantung pada sistem reproduksi tanaman yang bersangkutan. Stabilitas genetik ini menjadi keunggulan utama OPV dibandingkan benih hibrida, terutama dalam sistem pertanian tradisional dan subsisten. Oleh karena itu, OPV tetap menjadi komponen penting dalam sistem perbenihan global, khususnya di negara berkembang (Allard, 1999; Ceccarelli, 2015).

Metode perbanyakan benih OPV sangat dipengaruhi oleh sistem reproduksi tanaman, yaitu apakah tanaman tersebut menyerbuk sendiri (*self-pollinated*) atau menyerbuk silang (*open pollinated*). Pada tanaman menyerbuk sendiri seperti padi, kedelai, dan gandum, proses selfing menyebabkan tingkat homozigositas yang tinggi, sehingga menghasilkan populasi yang sangat seragam secara genetik. Sebaliknya, pada tanaman menyerbuk silang seperti jagung atau beberapa sayuran, penyerbukan terbuka memungkinkan terjadinya aliran gen antar individu dalam populasi, sehingga mempertahankan keragaman genetik yang lebih tinggi. Dalam praktiknya, produksi benih OPV pada tanaman menyerbuk sendiri relatif lebih sederhana karena tidak memerlukan kontrol penyerbukan yang ketat. Namun, pada tanaman menyerbuk silang, diperlukan pengelolaan populasi dan isolasi yang baik untuk menjaga identitas varietas. Dengan demikian, pemahaman terhadap sistem reproduksi menjadi dasar dalam menentukan strategi produksi benih OPV yang efektif (Acquaah, 2012; Poehlman & Sleper, 1995).

Teknik produksi benih OPV menekankan pada pemeliharaan kemurnian varietas melalui serangkaian tindakan agronomi dan seleksi lapang yang ketat. Salah satu teknik utama adalah isolasi, baik secara spasial maupun temporal, untuk mencegah kontaminasi genetik dari varietas lain yang berdekatan. Selain itu, praktik *rogguing* atau pencabutan tanaman yang menyimpang secara fenotipik dilakukan secara berkala untuk menjaga keseragaman populasi. Seleksi tanaman induk juga menjadi bagian penting dalam

proses produksi benih, terutama untuk mempertahankan karakter unggul varietas. Proses ini harus dilakukan secara sistematis mulai dari fase vegetatif hingga generatif untuk memastikan bahwa hanya tanaman yang sesuai dengan deskripsi varietas yang dipertahankan. Tanpa pengendalian yang ketat, kualitas genetik benih OPV dapat menurun akibat kontaminasi atau segregasi yang tidak diinginkan (N. Louwaars & de Boef, 2012).

Stabilitas genetik dan kemampuan adaptasi lingkungan merupakan karakteristik penting yang membedakan OPV dari benih hibrida. Varietas non hibrida umumnya memiliki stabilitas performa yang lebih baik pada berbagai kondisi lingkungan, terutama pada sistem pertanian dengan input rendah. Hal ini disebabkan oleh adanya variasi genetik yang memungkinkan tanaman beradaptasi terhadap perubahan kondisi agroekologi, seperti kekeringan, kesuburan tanah rendah, atau tekanan hama dan penyakit. Selain itu, OPV sering menunjukkan stabilitas hasil yang lebih konsisten antar musim dibandingkan hibrida yang sangat responsif terhadap kondisi optimal. Dalam konteks perubahan iklim, kemampuan adaptasi ini menjadi semakin penting untuk menjaga keberlanjutan produksi pertanian. Oleh karena itu, OPV sering direkomendasikan untuk sistem pertanian marginal dan berbasis sumber daya lokal (Ceccarelli, 2015); McGuire & Sperling, 2016).

Dari perspektif agronomi dan ekonomi, benih non hibrida memiliki sejumlah keunggulan sekaligus keterbatasan yang perlu dipertimbangkan. Keunggulan utama OPV adalah kemampuannya untuk digunakan kembali oleh petani tanpa penurunan performa yang signifikan, sehingga mengurangi ketergantungan terhadap pembelian benih setiap musim tanam. Selain itu, biaya produksi benih OPV relatif lebih rendah dibandingkan benih hibrida, sehingga lebih terjangkau bagi petani kecil. Namun demikian, OPV umumnya memiliki potensi hasil yang lebih rendah dibandingkan benih hibrida, terutama pada kondisi lingkungan optimal dengan input tinggi. Dari sisi agronomi, OPV juga cenderung memiliki tingkat keseragaman yang lebih rendah, yang dapat mempengaruhi kualitas panen dan efisiensi pengelolaan tanaman. Oleh karena itu, pemilihan antara OPV dan hibrida harus mempertimbangkan kondisi agroekologi,

kapasitas ekonomi petani, dan tujuan produksi (Tester & Langridge, 2010).

Contoh komoditas utama yang menggunakan sistem benih non hibrida meliputi tanaman pangan seperti padi (*Oryza sativa*), kedelai (*Glycine max*), dan gandum (*Triticum aestivum*), yang sebagian besar merupakan tanaman menyerbuk sendiri. Pada tanaman padi, penggunaan varietas non hibrida masih dominan di banyak negara karena stabilitas hasil dan kemudahan produksi benih oleh petani. Kedelai dan gandum juga menunjukkan karakteristik serupa, di mana varietas OPV dapat diproduksi secara mandiri dengan tingkat kemurnian genetik yang relatif tinggi. Selain itu, beberapa tanaman hortikultura juga menggunakan OPV, terutama pada sistem pertanian tradisional dan organik. Keberadaan OPV dalam berbagai komoditas ini menunjukkan bahwa sistem benih non hibrida tetap relevan dalam mendukung ketahanan pangan dan keberlanjutan pertanian. Dengan demikian, pengembangan dan konservasi varietas OPV menjadi bagian penting dalam strategi perbenihan nasional dan global (McGuire & Sperling, 2016)

11.5 Sistem Produksi Benih Hibrida

Sistem produksi benih hibrida didasarkan pada pemanfaatan fenomena heterosis atau *hybrid vigor*, yaitu peningkatan performa fenotipik keturunan hasil persilangan dibandingkan dengan tetuanya. Heterosis secara umum diekspresikan dalam bentuk peningkatan hasil, vigor pertumbuhan, keseragaman tanaman, serta ketahanan terhadap cekaman biotik dan abiotik. Secara genetik, heterosis dijelaskan melalui beberapa hipotesis utama, yaitu dominansi, overdominansi, dan epistasis. Hipotesis dominansi menyatakan bahwa alel dominan dari kedua tetua menutupi efek alel resesif yang merugikan, sedangkan overdominansi menunjukkan bahwa kombinasi alel heterozigot pada lokus tertentu memberikan keunggulan dibandingkan kondisi homozigot. Selain itu, interaksi antar gen (epistasis) juga berperan dalam memperkuat ekspresi heterosis pada tingkat genomik yang kompleks. Pemanfaatan heterosis menjadi dasar utama dalam pengembangan varietas

hibrida, terutama pada tanaman menyerbuk silang seperti jagung, sorgum, dan beberapa tanaman hortikultura (Z. J. Chen, 2013).

Dalam praktiknya, produksi benih hibrida melibatkan berbagai tipe persilangan yang dirancang untuk mengoptimalkan kombinasi genetik antar galur inbrida. Tipe hibrida yang paling sederhana adalah *single cross hybrid*, yaitu hasil persilangan antara dua galur inbrida yang berbeda, yang umumnya memiliki performa tinggi tetapi memerlukan galur tetua yang sangat stabil dan homogen. Selain itu, terdapat *double cross hybrid*, yang merupakan hasil persilangan antara dua hibrida single cross, sehingga menghasilkan benih dengan stabilitas produksi lebih tinggi namun tingkat heterosis relatif lebih rendah dibandingkan single cross. Tipe lain adalah *three-way cross hybrid*, yang melibatkan persilangan antara satu galur inbrida dengan satu hibrida single cross, sehingga menggabungkan keunggulan stabilitas dan produktivitas. Pemilihan tipe hibrida sangat bergantung pada tujuan pemuliaan, ketersediaan galur tetua, serta kondisi produksi benih di lapangan. Dalam konteks industri benih modern, single cross hybrid lebih banyak digunakan karena memberikan potensi hasil yang lebih tinggi dan keseragaman yang lebih baik (Duvick, 2001; Carena et al., 2010).

Keberhasilan produksi benih hibrida juga sangat ditentukan oleh sistem reproduksi tanaman, khususnya perbedaan antara tanaman menyerbuk sendiri (*self-pollinated crops*) dan menyerbuk silang (*cross-pollinated crops*). Pada tanaman menyerbuk sendiri, seperti padi dan gandum, produksi benih hibrida memerlukan intervensi teknologi yang lebih kompleks, seperti penggunaan sistem male sterility atau teknik emaskulasi untuk mencegah penyerbukan sendiri. Sebaliknya, pada tanaman menyerbuk silang seperti jagung, produksi benih hibrida relatif lebih mudah karena secara alami terjadi aliran serbuk sari antar tanaman. Namun demikian, pengendalian penyerbukan tetap diperlukan untuk menjaga kemurnian genetik, misalnya melalui isolasi jarak dan sinkronisasi pembungaan. Pemahaman terhadap sistem reproduksi ini menjadi krusial dalam merancang strategi produksi benih

hibrida yang efisien dan ekonomis. Tanpa kontrol reproduksi yang tepat, risiko kontaminasi genetik dan penurunan kualitas benih akan meningkat secara signifikan (Acquaah, 2012; Poehlman & Sleper, 1995).

Peran galur inbrida (*inbred lines*) dalam produksi benih hibrida sangat fundamental karena galur ini berfungsi sebagai tetua dalam persilangan yang menghasilkan benih hibrida. Galur inbrida diperoleh melalui proses selfing berulang selama beberapa generasi hingga mencapai tingkat homozigositas yang tinggi, sehingga memiliki stabilitas genetik yang baik. Meskipun galur inbrida umumnya menunjukkan penurunan vigor akibat depresi inbreeding, kombinasi dua atau lebih galur inbrida yang berbeda dapat menghasilkan keturunan dengan performa yang jauh lebih unggul melalui heterosis. Oleh karena itu, pemilihan dan pengujian galur inbrida menjadi tahap kritis dalam program pemuliaan hibrida. Selain itu, karakteristik seperti daya gabung umum (*general combining ability*) dan daya gabung khusus (*specific combining ability*) digunakan untuk mengevaluasi potensi galur dalam menghasilkan hibrida unggul. Proses ini memerlukan evaluasi multilokasi dan analisis statistik yang mendalam untuk memastikan stabilitas dan adaptasi hasil (Sprague & Tatum, 1942; Carena et al., 2010).

Dari perspektif agronomi dan ekonomi, benih hibrida memiliki keunggulan yang signifikan, terutama dalam hal produktivitas dan keseragaman hasil. Tanaman hibrida umumnya menunjukkan pertumbuhan yang lebih vigor, efisiensi penggunaan nutrisi yang lebih tinggi, serta respons yang lebih baik terhadap input produksi seperti pupuk dan irigasi. Namun, keunggulan ini diiringi dengan beberapa keterbatasan, terutama terkait dengan ketergantungan petani terhadap industri benih. Benih hibrida tidak dapat digunakan kembali untuk musim tanam berikutnya karena segregasi genetik menyebabkan penurunan performa, sehingga petani harus membeli benih baru setiap musim. Selain itu, biaya produksi benih hibrida yang relatif tinggi juga menjadi tantangan dalam adopsi, terutama bagi petani skala kecil. Oleh karena itu, penggunaan benih hibrida harus dipertimbangkan secara komprehensif dengan

mempertimbangkan aspek produktivitas, efisiensi biaya, dan keberlanjutan sistem pertanian (Tester & Langridge, 2010).

11.6 Teknik Produksi Benih Hibrida

Teknik produksi benih hibrida diawali dengan pembentukan dan pemeliharaan galur inbrida (*inbred lines*) yang memiliki tingkat homozigositas tinggi dan stabilitas genetik yang baik. Galur inbrida diperoleh melalui proses selfing berulang selama beberapa generasi (umumnya 6–8 generasi atau lebih) untuk menghasilkan individu dengan kombinasi alel yang seragam. Proses ini sering diikuti dengan seleksi ketat terhadap karakter agronomi penting, seperti vigor awal, ketahanan terhadap penyakit, dan kemampuan beradaptasi. Meskipun galur inbrida biasanya mengalami depresi inbreeding yang ditandai dengan penurunan vigor dan produktivitas, galur ini tetap menjadi komponen utama dalam produksi benih hibrida karena potensinya dalam menghasilkan heterosis saat disilangkan. Pemeliharaan galur inbrida juga memerlukan pengendalian ketat terhadap kontaminasi genetik melalui isolasi dan roguing. Oleh karena itu, kualitas galur inbrida sangat menentukan keberhasilan produksi benih hibrida secara keseluruhan (Carena et al., 2010).

Teknik emaskulasi dan kontrol penyerbukan merupakan langkah penting dalam memastikan bahwa persilangan yang terjadi sesuai dengan desain pemuliaan. Emaskulasi dilakukan dengan cara menghilangkan organ jantan (benang sari) pada bunga sebelum terjadi penyerbukan untuk mencegah terjadinya self-pollination. Teknik ini umum digunakan pada tanaman menyerbuk sendiri seperti padi dan gandum. Selain emaskulasi manual, pelaksanaan penyerbukan yang terkontrol dapat dilakukan dengan metode bagging, yaitu menutup bunga dengan kantong khusus untuk menghindari kontaminasi serbuk sari dari luar. Pada tanaman menyerbuk silang seperti jagung, kontrol penyerbukan sering dilakukan dengan teknik detasseling, yaitu menghilangkan bunga jantan pada tanaman betina. Keberhasilan teknik ini sangat bergantung pada ketepatan waktu pelaksanaan dan sinkronisasi fase berbunga antara tetua jantan dan betina.

Tanpa kontrol penyerbukan yang efektif, kemurnian genetik benih hibrida tidak dapat dijamin (Poehlman & Sleper, 1995) (Duvick, 2001).

Sistem *male sterility* merupakan inovasi penting dalam produksi benih hibrida karena memungkinkan eliminasi fungsi jantan tanpa perlu emaskulasi manual. Salah satu sistem yang широко digunakan adalah *Cytoplasmic Male Sterility* (CMS), yang dikendalikan oleh interaksi antara gen sitoplasma (mitokondria) dan gen nuklir, sehingga tanaman tidak menghasilkan serbuk sari yang viabel. CMS banyak diterapkan pada tanaman seperti jagung, padi, dan sorgum karena efisiensinya dalam produksi benih hibrida skala besar. Selain CMS, terdapat *Genetic Male Sterility* (GMS) yang dikendalikan oleh gen nuklir resesif, meskipun penggunaannya lebih terbatas karena memerlukan segregasi genetik yang kompleks. Alternatif lainnya adalah penggunaan *Chemical Hybridizing Agents* (CHA), yaitu senyawa kimia yang dapat menghambat perkembangan serbuk sari tanpa mempengaruhi organ betina. Meskipun CHA memberikan fleksibilitas dalam produksi benih, penggunaannya sering dibatasi oleh faktor biaya, efektivitas, dan potensi dampak lingkungan. Dengan demikian, pemilihan sistem male sterility harus mempertimbangkan efisiensi, stabilitas, dan aspek keamanan (L. Chen & Liu, 2014).

Teknik isolasi dan sinkronisasi pembungaan merupakan aspek krusial dalam produksi benih hibrida untuk memastikan keberhasilan penyerbukan silang yang terkontrol. Isolasi dilakukan untuk mencegah masuknya serbuk sari dari varietas lain yang dapat menyebabkan kontaminasi genetik, baik melalui isolasi jarak, waktu, maupun penghalang fisik. Jarak isolasi yang diperlukan bervariasi tergantung pada jenis tanaman dan sistem penyerbukannya, dengan tanaman menyerbuk silang memerlukan jarak isolasi yang lebih besar. Selain itu, sinkronisasi pembungaan antara tetua jantan dan betina harus diatur sedemikian rupa agar fase anthesis dan stigma reseptif terjadi secara bersamaan. Teknik yang digunakan meliputi pengaturan waktu tanam, pemilihan varietas dengan periode berbunga yang sesuai, serta aplikasi zat pengatur tumbuh. Kegagalan dalam

sinkronisasi pembungaan dapat menyebabkan penurunan tingkat keberhasilan penyerbukan dan produktivitas benih. Oleh karena itu, manajemen waktu menjadi faktor kunci dalam produksi benih hibrida (Acquaah, 2012).

Manajemen lahan produksi benih hibrida mencakup pengelolaan agronomi yang intensif untuk mendukung pertumbuhan optimal tanaman tetua dan keberhasilan proses persilangan. Pemilihan lokasi harus mempertimbangkan kesesuaian agroekologi, termasuk kondisi tanah, iklim, dan ketersediaan air. Selain itu, tata letak penanaman antara barisan tetua jantan dan betina harus dirancang secara sistematis, misalnya dengan rasio tertentu (misalnya 4:1 atau 6:2) untuk memastikan distribusi serbuk sari yang optimal. Pengendalian hama dan penyakit juga menjadi prioritas utama karena infeksi dapat mengganggu proses pembungaan dan viabilitas serbuk sari. Praktik pemupukan dan irigasi harus disesuaikan dengan kebutuhan spesifik tanaman untuk mendukung pembentukan bunga dan biji yang optimal. Secara keseluruhan, manajemen lahan dalam produksi benih hibrida lebih kompleks dibandingkan produksi benih non hibrida karena melibatkan interaksi antara dua atau lebih galur tetua yang berbeda. Oleh karena itu, keberhasilan produksi benih hibrida sangat bergantung pada integrasi antara teknik genetika dan manajemen agronomi di lapangan (Carena et al., 2010).

11.7 Manajemen Produksi Benih

Manajemen produksi benih merupakan komponen kunci dalam menjamin kualitas benih secara menyeluruh, mencakup aspek genetika, fisiologis, dan fisik. Pemilihan lokasi dan kesesuaian agroekologi menjadi tahap awal yang sangat menentukan keberhasilan produksi benih. Lokasi produksi harus memiliki kondisi lingkungan yang sesuai dengan kebutuhan spesifik tanaman, termasuk suhu, curah hujan, kelembapan, dan karakteristik tanah. Selain itu, faktor seperti aksesibilitas, ketersediaan tenaga kerja, serta risiko kontaminasi dari varietas lain juga perlu dipertimbangkan secara matang. Lingkungan yang tidak sesuai dapat menyebabkan penurunan viabilitas benih,

peningkatan serangan patogen, serta ketidaksesuaian pertumbuhan tanaman induk. Oleh karena itu, evaluasi agroekologi yang komprehensif menjadi prasyarat utama dalam sistem produksi benih yang berkelanjutan (K. Bradford & Nonogaki, 2007).

Isolasi ruang dan waktu merupakan strategi penting dalam menjaga kemurnian genetik benih selama proses produksi. Isolasi ruang dilakukan dengan menjaga jarak tertentu antara lahan produksi benih dengan varietas lain yang berpotensi menjadi sumber kontaminasi serbuk sari. Jarak isolasi ini bervariasi tergantung pada jenis tanaman dan sistem penyerbukannya, di mana tanaman menyerbuk silang umumnya memerlukan jarak isolasi yang lebih besar dibandingkan tanaman menyerbuk sendiri. Selain itu, isolasi waktu dapat diterapkan dengan mengatur waktu tanam sehingga periode pembungaan tidak bersamaan dengan varietas lain di sekitarnya. Kombinasi kedua pendekatan ini memberikan perlindungan yang lebih efektif terhadap kontaminasi genetik. Tanpa penerapan isolasi yang tepat, kemurnian varietas dapat terganggu, yang pada akhirnya menurunkan kualitas benih yang dihasilkan (N. Louwaars & de Boef, 2012; Acquaah, 2012).

Pengendalian hama, penyakit, dan gulma dalam produksi benih memiliki tingkat kompleksitas yang lebih tinggi dibandingkan produksi tanaman konsumsi. Hal ini disebabkan karena kerusakan pada tanaman induk tidak hanya mempengaruhi hasil, tetapi juga kualitas benih yang dihasilkan, termasuk viabilitas dan kesehatan benih. Pendekatan yang digunakan umumnya mengacu pada prinsip pengelolaan hama terpadu (*Integrated Pest Management/IPM*), yang mengombinasikan metode biologis, mekanis, dan kimia secara selektif (Nutter Forrest et al., 1991). Penggunaan pestisida harus dilakukan secara hati-hati untuk menghindari residu yang dapat mempengaruhi kualitas benih. Selain itu, pengendalian gulma juga penting untuk mengurangi kompetisi terhadap nutrisi, air, dan cahaya, serta mencegah kontaminasi fisik pada benih. Monitoring rutin dan tindakan preventif menjadi kunci dalam

menjaga kesehatan tanaman selama fase produksi benih (Mcdonald, 1999).

Teknik panen, pascapanen, dan pengolahan benih merupakan tahapan kritis yang sangat menentukan mutu akhir benih. Panen harus dilakukan pada tingkat kemasakan fisiologis optimal, yaitu saat benih telah mencapai bobot kering maksimum dan viabilitas tertinggi. Keterlambatan atau percepatan panen dapat menyebabkan penurunan kualitas benih, baik dari segi daya kecambah maupun vigor. Setelah panen, benih harus segera dikeringkan hingga mencapai kadar air yang aman untuk penyimpanan, biasanya berkisar antara 8–12% tergantung jenis tanaman (Matthews, 2002). Proses pengolahan meliputi pembersihan, sortasi, dan grading untuk memastikan keseragaman ukuran dan kualitas benih. Penanganan yang tidak tepat pada tahap ini dapat menyebabkan kerusakan mekanis yang berdampak pada penurunan viabilitas benih. Oleh karena itu, standar operasional yang ketat diperlukan dalam seluruh pelaksanaan tahapan pascapanen.

Penyimpanan dan distribusi benih merupakan tahap akhir dalam manajemen produksi benih yang bertujuan untuk mempertahankan kualitas hingga benih digunakan oleh petani. Faktor utama yang mempengaruhi daya simpan benih adalah suhu dan kelembapan relatif, yang harus dikontrol secara ketat untuk mencegah deteriorasi benih. Prinsip umum dalam penyimpanan benih adalah "*rule of thumb*" bahwa setiap penurunan suhu 5°C atau kelembapan relatif 1% dapat memperpanjang umur simpan benih secara signifikan (Copeland & McDonald, 2001). Selain itu, penggunaan kemasan yang sesuai juga penting untuk melindungi benih dari serangan hama gudang dan fluktuasi lingkungan. Dalam konteks distribusi, sistem logistik harus mampu menjaga kondisi benih tetap optimal hingga sampai ke pengguna akhir. Kegagalan dalam manajemen penyimpanan dan distribusi dapat mengakibatkan penurunan mutu benih meskipun proses produksi sebelumnya telah dilakukan dengan baik. Oleh karena itu, integrasi antara produksi, penyimpanan, dan distribusi menjadi kunci dalam sistem perbenihan modern (K. J. Bradford et al., 2018).

11.8 Faktor Faktor yang Mempengaruhi Kualitas Benih

Kualitas benih merupakan hasil interaksi kompleks antara faktor genetik, fisiologis, dan lingkungan selama proses pembentukan, panen, hingga penyimpanan benih. Salah satu faktor utama yang mempengaruhi kualitas benih adalah kondisi lingkungan, khususnya suhu, kelembapan, dan cahaya selama fase pembentukan dan pematangan benih. Suhu yang terlalu tinggi selama fase pengisian biji dapat mempercepat respirasi dan memperpendek periode pengisian, sehingga menurunkan bobot benih dan viabilitasnya. Kelembapan yang tinggi pada saat pematangan dan panen juga dapat meningkatkan risiko infeksi patogen serta mempercepat deteriorasi benih. Selain itu, intensitas cahaya berpengaruh terhadap proses fotosintesis tanaman induk yang secara tidak langsung menentukan akumulasi cadangan makanan dalam benih (Bewley et al., 2013). Interaksi antara faktor-faktor lingkungan tersebut sangat menentukan kualitas fisiologis benih, termasuk daya kecambah dan vigor benih. Oleh karena itu, pengelolaan lingkungan selama produksi benih menjadi faktor krusial dalam menghasilkan benih berkualitas tinggi (Finch-Savage & Bassel, 2016).

Selain faktor lingkungan, teknik pemeliharaan tanaman tetua dan sistem penyimpanan benih juga berperan penting dalam menentukan kualitas benih. Pemeliharaan tanaman tetua yang optimal, termasuk pemberian pupuk yang seimbang, pengendalian hama dan penyakit, serta manajemen air secara tepat, akan menghasilkan benih dengan kualitas fisiologis dan genetik yang lebih baik. Setelah panen, penyimpanan benih menjadi tahap kritis yang menentukan daya simpan dan viabilitas benih dalam jangka panjang. Faktor utama dalam penyimpanan benih adalah kadar air benih dan suhu penyimpanan. Kadar air rendah dan suhu rendah dapat memperlambat proses deteriorasi benih. Penyimpanan yang tidak tepat dapat menyebabkan penurunan viabilitas akibat aktivitas metabolisme yang berlebihan serta serangan mikroorganisme. Oleh karena itu, prinsip penyimpanan benih yang baik dikenal dengan konsep "*rule of thumb*", yaitu setiap

penurunan kadar air dan suhu akan meningkatkan umur simpan benih secara signifikan (Matthews, 2002). Dengan demikian, manajemen pascapanen yang tepat sangat penting untuk mempertahankan kualitas benih hingga saat penanaman (Copeland & McDonald, 2001; Walters, 2015).

Kondisi tanah tempat tanaman induk tumbuh juga memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kualitas benih yang dihasilkan. Kesuburan tanah yang baik akan mendukung pertumbuhan tanaman yang optimal sehingga memungkinkan pembentukan benih dengan ukuran, berat, dan kandungan nutrisi yang lebih baik. Ketersediaan unsur hara seperti nitrogen, fosfor, dan kalium berperan penting dalam proses pembentukan embrio dan cadangan makanan dalam benih. Sebaliknya, kondisi tanah yang miskin hara atau mengalami cekaman seperti salinitas dan kekeringan dapat menyebabkan pembentukan benih yang tidak sempurna dan menurunkan viabilitasnya. Selain itu, kondisi tanah juga dapat mempengaruhi tingkat infeksi patogen yang dapat ditransmisikan melalui benih. Oleh karena itu, pengelolaan kesuburan tanah dan kondisi agroekosistem secara keseluruhan menjadi bagian penting dalam sistem produksi benih berkualitas. Pemilihan lokasi produksi benih yang sesuai juga menjadi strategi penting untuk meminimalkan risiko penurunan kualitas benih (Fenner & Thompson, 2005; Bewley et al., 2013).

Perlakuan terhadap benih setelah panen juga merupakan faktor penting yang menentukan kualitas akhir benih sebelum digunakan. Proses pengeringan benih bertujuan untuk menurunkan kadar air hingga tingkat aman sehingga aktivitas metabolisme dapat ditekan dan umur simpan benih dapat diperpanjang. Selain itu, teknik pelapisan benih (*seed coating*) sering digunakan untuk meningkatkan performa benih melalui penambahan bahan pelindung, nutrisi, atau agen hayati yang dapat melindungi benih dari patogen. Perlakuan lain yang tidak kalah penting adalah pengujian viabilitas dan vigor benih, yang dilakukan untuk memastikan bahwa benih memiliki kemampuan berkecambah dan tumbuh secara optimal. Pengujian ini meliputi uji daya kecambah, uji vigor, serta pengujian kesehatan benih

untuk mendeteksi keberadaan patogen. Tanpa adanya perlakuan dan pengujian yang tepat, benih yang dihasilkan berpotensi memiliki kualitas yang rendah dan tidak memenuhi standar sertifikasi. Oleh karena itu, penerapan teknologi pascapanen dan pengujian mutu benih menjadi bagian integral dalam sistem produksi benih modern (Finch-Savage & Bassel, 2016).

11.9 Regulasi dan Standarisasi dalam Produksi Benih

Regulasi dan standarisasi dalam produksi benih merupakan elemen fundamental untuk menjamin mutu, keaslian varietas, serta keamanan distribusi benih dalam sistem pertanian modern. Standar internasional dalam produksi dan distribusi benih umumnya dikembangkan oleh organisasi global seperti *International Seed Testing Association* (ISTA) dan *Organisation for Economic Co-operation and Development* (OECD). ISTA menetapkan metode pengujian benih yang terstandar secara global, termasuk uji daya kecambah, kemurnian, kadar air, dan kesehatan benih. Sementara itu, skema sertifikasi OECD berfokus pada sistem pelabelan dan pengawasan peredaran benih antar negara untuk memastikan identitas varietas dan kualitas genetik tetap terjaga. Standarisasi ini menjadi penting dalam konteks perdagangan global, di mana benih tidak hanya diproduksi untuk konsumsi lokal, tetapi juga untuk ekspor lintas negara. Tanpa adanya standar internasional yang seragam, risiko penyebaran benih bermutu rendah atau tidak sesuai varietas akan meningkat secara signifikan (Hampton & TeKrony, 1995).

Pada tingkat nasional, peraturan mengenai sertifikasi dan kualitas benih berfungsi untuk mengadaptasi standar internasional ke dalam konteks lokal yang sesuai dengan kondisi agroekologi dan sistem pertanian suatu negara. Di Indonesia, sistem sertifikasi benih diatur melalui lembaga resmi seperti Balai Pengawasan dan Sertifikasi Benih (BPSB), yang bertugas melakukan pengawasan mulai dari tahap produksi hingga distribusi. Proses sertifikasi mencakup inspeksi lapangan untuk memastikan kemurnian varietas, serta pengujian laboratorium untuk menilai parameter mutu seperti daya kecambah, kadar air, dan bebas dari patogen. Regulasi ini juga menetapkan kelas benih

(BS, FS, SS, ES) yang mencerminkan tingkat kemurnian genetik dan standar produksi yang berbeda. Selain itu, kebijakan nasional juga mengatur peredaran benih ilegal dan perlindungan varietas tanaman melalui sistem hak pemulia tanaman (*plant variety protection*). Dengan demikian, regulasi nasional berperan sebagai mekanisme kontrol mutu sekaligus perlindungan terhadap inovasi pemuliaan tanaman (Tripp & Louwaars, 1997; Spielman & Kennedy, 2016).

Asosiasi dan lembaga pengawas kualitas benih memiliki peran strategis dalam menjaga integritas sistem perbenihan, baik di tingkat nasional maupun internasional. Selain ISTA dan OECD, terdapat organisasi seperti *International Union for the Protection of New Varieties of Plants* (UPOV) yang berfokus pada perlindungan hak pemulia tanaman dan mendorong inovasi dalam pengembangan varietas baru. Di tingkat regional dan nasional, asosiasi industri benih juga berperan dalam menetapkan standar operasional, memberikan pelatihan, serta memfasilitasi komunikasi antara pelaku industri, pemerintah, dan peneliti. Lembaga-lembaga ini juga berfungsi sebagai penghubung antara kebijakan dan implementasi di lapangan, memastikan bahwa standar yang ditetapkan dapat diterapkan secara efektif. Selain itu, keberadaan lembaga pengawas independen meningkatkan transparansi dan akuntabilitas dalam sistem perbenihan. Tanpa dukungan kelembagaan yang kuat, regulasi yang ada cenderung sulit diimplementasikan secara konsisten (N. Louwaars, 2007)

Dalam perspektif global, harmonisasi regulasi dan standarisasi benih menjadi tantangan sekaligus kebutuhan dalam menghadapi dinamika perdagangan internasional dan perubahan iklim. Perbedaan regulasi antar negara seringkali menjadi hambatan dalam distribusi benih, terutama terkait dengan persyaratan karantina, sertifikasi, dan perlindungan varietas. Oleh karena itu, upaya harmonisasi melalui organisasi internasional menjadi penting untuk menciptakan sistem perbenihan yang lebih efisien dan transparan. Selain itu, perkembangan teknologi seperti bioteknologi dan digitalisasi juga menuntut adanya pembaruan regulasi agar tetap relevan

dengan inovasi yang ada. Regulasi yang adaptif tidak hanya menjamin kualitas benih, tetapi juga mendorong inovasi dan keberlanjutan dalam sektor pertanian. Dengan demikian, integrasi antara standar internasional, regulasi nasional, dan kelembagaan menjadi kunci dalam membangun sistem perbenihan yang kuat dan berdaya saing global (N. Louwaars & de Boef, 2012).

11.10 Tantangan dalam Produksi Benih Hibrida dan Non Hibrida

Produksi benih, baik hibrida maupun non hibrida, menghadapi tantangan yang semakin kompleks seiring dengan perubahan kondisi lingkungan global, khususnya perubahan iklim. Perubahan pola curah hujan, peningkatan suhu, serta kejadian cuaca ekstrem dapat mempengaruhi proses pembungaan, penyerbukan, dan pembentukan biji, yang pada akhirnya berdampak pada kualitas dan kuantitas benih yang dihasilkan. Pada tanaman yang bergantung pada sinkronisasi pembungaan, seperti dalam produksi benih hibrida, gangguan iklim dapat menyebabkan ketidaksesuaian waktu berbunga antara tetua jantan dan betina sehingga menurunkan keberhasilan penyerbukan. Selain itu, suhu tinggi selama fase pengisian biji dapat menurunkan viabilitas dan vigor benih, yang berimplikasi pada rendahnya daya kecambah. Perubahan iklim juga dapat memperluas distribusi geografis organisme pengganggu tanaman yang berdampak pada produksi benih di berbagai wilayah. Oleh karena itu, sistem produksi benih perlu beradaptasi melalui pengembangan varietas yang toleran terhadap cekaman iklim serta penerapan manajemen produksi yang lebih adaptif (Tester & Langridge, 2010; (Zhao et al., 2017).

Salah satu isu penting dalam produksi benih hibrida adalah terbatasnya keanekaragaman genetik yang digunakan dalam program pemuliaan. Benih hibrida umumnya dikembangkan dari sejumlah kecil galur inbrida yang telah dipilih secara intensif untuk menghasilkan kombinasi sifat unggul tertentu. Hal ini berpotensi menyebabkan penyempitan basis genetik (*genetic bottleneck*), yang dapat meningkatkan

kerentanan tanaman terhadap serangan hama, penyakit, atau perubahan lingkungan. Ketergantungan pada sumber genetik yang terbatas juga dapat mengurangi fleksibilitas dalam menghadapi tantangan baru, seperti munculnya patogen baru atau perubahan kondisi agroekosistem. Sebaliknya, benih non hibrida, terutama varietas lokal, memiliki keragaman genetik yang lebih luas sehingga cenderung lebih adaptif terhadap kondisi lingkungan yang beragam. Namun, pemanfaatan benih non hibrida juga menghadapi tantangan dalam hal konsistensi kualitas dan produktivitas. Oleh karena itu, upaya konservasi plasma nutfah dan pemanfaatan sumber daya genetik secara berkelanjutan menjadi sangat penting dalam mendukung sistem produksi benih yang resilien (Esquinas-Alcázar, 2005).

Selain faktor biologis dan lingkungan, kebijakan pertanian juga memiliki pengaruh signifikan terhadap perkembangan industri benih, baik hibrida maupun non hibrida. Regulasi terkait sertifikasi benih, perlindungan varietas tanaman (*plant variety protection*), serta sistem distribusi benih dapat mempengaruhi akses petani terhadap benih berkualitas. Dalam beberapa kasus, kebijakan yang terlalu ketat dapat membatasi peredaran benih lokal dan mengurangi peran sistem perbenihan informal yang selama ini menjadi sumber utama benih non hibrida bagi petani kecil. Di sisi lain, kebijakan yang mendukung investasi dalam industri benih dapat mendorong inovasi dan pengembangan varietas unggul, terutama pada benih hibrida. Namun, dominasi perusahaan besar dalam industri benih juga dapat menciptakan ketimpangan akses dan meningkatkan ketergantungan petani terhadap benih komersial. Oleh karena itu, diperlukan kebijakan yang seimbang antara pengembangan industri benih modern dan perlindungan sistem perbenihan lokal agar tercipta sistem benih yang inklusif dan berkelanjutan (N. Louwaars & de Boef, 2012) ; Spielman & Smale, 2017).

Tantangan lain yang tidak kalah penting dalam produksi benih adalah masalah penyebaran penyakit tanaman dan ketahanan benih terhadap patogen. Benih dapat menjadi media utama dalam penyebaran penyakit, baik yang disebabkan oleh bakteri, virus, maupun jamur, yang dapat ditransmisikan melalui

benih (*seed-borne diseases*) (P Prajapati et al., 2024). Infeksi patogen pada benih tidak hanya menurunkan kualitas benih, tetapi juga dapat menyebabkan kerugian besar pada tahap pertumbuhan tanaman di lapangan. Dalam produksi benih hibrida, tingkat kemurnian dan kesehatan benih menjadi sangat krusial karena benih yang terkontaminasi dapat mempengaruhi seluruh populasi tanaman yang ditanam. Sementara itu, pada benih non hibrida, praktik penyimpanan dan penggunaan benih secara berulang dapat meningkatkan risiko akumulasi patogen jika tidak diikuti dengan pengelolaan yang baik. Oleh karena itu, penerapan teknologi pengujian kesehatan benih, perlakuan benih (*seed treatment*), serta pengawasan mutu menjadi langkah penting dalam menjaga kualitas benih. Pengembangan varietas yang memiliki ketahanan genetik terhadap penyakit juga menjadi strategi utama dalam mengatasi tantangan ini (McDonald & Linde, 2002).

DAFTAR PUSTAKA

- Acquaah, G. (2012). *Principles of plant genetics and breeding*. <https://www.amazon.com/Principles-Genetics-Breeding-George-Acquaah/dp/1405136464>
- Allard, R. W. (1999). *Principles of Plant Breeding* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Bewley, J. D., Bradford, K., Hilhorst, H., & Nonogaki, H. (2013). Seeds: Physiology of development, germination and dormancy, 3rd edition. In *Seeds: Physiology of Development, Germination and Dormancy, 3rd Edition*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4693-4>
- Bradford, K. J., Dahal, P., Van Asbrouck, J., Kunusoth, K., Bello, P., Thompson, J., & Wu, F. (2018). The dry chain: Reducing postharvest losses and improving food safety in humid climates. *Trends in Food Science & Technology*, 71, 84–93. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.11.002>
- Bradford, K., & Nonogaki, H. (2007). *Seed Development, Dormancy and Germination*. <https://doi.org/10.1002/9780470988848>
- Carena, M., Hallauer, A., & Filho, J. B. (2010). *Quantitative Genetics in Maize Breeding*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0766-0>
- Ceccarelli, S. (2015). Efficiency of Plant Breeding. *Crop Science*, 55(1), 87–97. <https://doi.org/10.2135/cropsci2014.02.0158>
- Chakrabarty, S., Basu, S., & Schipprach, W. (2023). *Hybrid Seed Production Technology* (pp. 173–212). https://doi.org/10.1007/978-981-19-5888-5_9
- Chen, L., & Liu, Y. G. (2014). Male Sterility and Fertility Restoration in Crops. *Annual Review of Plant Biology*, 65, 579–606.
- Chen, Z. J. (2013). Genomic and epigenetic insights into the molecular bases of heterosis. *Nature Reviews Genetics*, 14(7), 471–482. <https://doi.org/10.1038/nrg3503>
- Copeland, L. O., & McDonald, M. B. (2001). *Principles of seed science and technology. 4th edn.* (Fourth). Springer New York, NY. <https://doi.org/10.1093/aob/mcf127>

- Duvick, D. N. (2001). Biotechnology in the 1930s: the development of hybrid maize. *Nature Reviews Genetics*, 2(1), 69–74. <https://doi.org/10.1038/35047587>
- Esquinas-Alcázar, J. (2005). Protecting crop genetic diversity for food security: political, ethical and technical challenges. *Nature Reviews Genetics*, 6(12), 946–953. <https://doi.org/10.1038/nrg1729>
- Fabijanski, S. F., & Arnison, P. G. (1989). *Antisense gene systems of pollination control for hybrid seed production*. <https://patents.google.com/patent/US5728926A/en>.
- Fehr, W. R. (1991). *Principles of Cultivar Development: Theory and Technique*. Macmillan Publishing Company (Vol. 1). Macmillan Publishing Company.
- Fenner, M., & Thompson, K. (2005). *The Ecology of Seeds*. Cambridge University Press. <https://doi.org/DOI:10.1017/CBO9780511614101>
- Finch-Savage, W. E., & Bassel, G. W. (2016). Seed vigour and crop establishment: extending performance beyond adaptation. *Journal of Experimental Botany*, 67(3), 567–591. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv490>
- Hampton, J. G., & TeKrony, D. M. (1995). *Handbook of vigour test methods*. International Seed Testing Association (ISTA).
- Louwaars, N. (2007). *Seeds of Confusion: The Impact of Policies on Seed Systems*.
- Louwaars, N., & de Boef, W. (2012). Integrated Seed Sector Development in Africa: A Conceptual Framework for Creating Coherence Between Practices, Programs, and Policies. *Journal of Crop Improvement*, 26, 39–59. <https://doi.org/10.1080/15427528.2011.611277>
- Louwaars, N. P., & de Boef, W. S. (2012). Integrated Seed Sector Development in Africa: A Conceptual Framework for Creating Coherence Between Practices, Programs, and Policies. *Journal of Crop Improvement*, 26(1), 39–59. <https://doi.org/10.1080/15427528.2011.611277>
- Matthews, S. (2002). Copeland, L.O. and McDonald, M.B. Principles of seed science and technology. 4th edn. *Annals of Botany*, 89(6), 798–798. <https://doi.org/10.1093/aob/mcf127>

- McDonald, B. A., & Linde, C. (2002). Pathogen population genetics, evolutionary potential, and durable resistance. *Annual Review of Phytopathology*, 40(1), 349–379. <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.40.120501.101443>
- Mcdonald, M. B. (1999). Seed deterioration: Physiology, repair and assessment. *Seed Science and Technology*, 27, 177–237. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:81450981>
- McGuire, S., & Sperling, L. (2016). Seed systems smallholder farmers use. *Food Security*, 8(1), 179–195. <https://doi.org/10.1007/s12571-015-0528-8>
- Mulvany, P. (2021). 14 - Sustaining agricultural biodiversity and heterogeneous seeds. In A. Kassam & L. Kassam (Eds.), *Rethinking Food and Agriculture* (pp. 285–321). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816410-5.00014-1>
- Nutter Forrest, J., Teng, P., & Shokes, F. M. (1991). Disease assessment terms and concepts. *Plant Disease*, 75, 1187–1188.
- P Prajapati, V., Rathod, S., & Prajapati, D. (2024). *Seed Borne Diseases and its Management*.
- Poehlman, J. M., & Sleper, D. A. (1995). *Breeding Field Crops (4th ed.)* (Fourth). Iowa State University Press.
- Spielman, D., & Kennedy, A. (2016). Towards better metrics and policymaking for seed system development: Insights from Asia's seed industry. *Agricultural Systems*, 147, 111–122. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.05.015>
- Sprague, G. F., & Tatum, L. A. (1942). General vs. Specific Combining Ability in Single Crosses of Corn. *Agronomy Journal*, 34(10), 923–932. <https://doi.org/https://doi.org/10.2134/agronj1942.00021962003400100008x>
- Tester, M., & Langridge, P. (2010). Breeding Technologies to Increase Crop Production in a Changing World. *Science*, 327(5967), 818–822. <https://doi.org/10.1126/science.1183700>
- Tripp, R., & Louwaars, N. (1997). Seed regulation: choices on the road to reform. *Food Policy*, 22(5), 433–446. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0306-9192\(97\)00033-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0306-9192(97)00033-X)

- Walters, C. (2015). Orthodoxy, recalcitrance and in-between: describing variation in seed storage characteristics using threshold responses to water loss. *Planta*, 242(2), 397–406. <https://doi.org/10.1007/s00425-015-2312-6>
- Zhao, C., Liu, B., Piao, S., Wang, X., Lobell, D. B., Huang, Y., Huang, M., Yao, Y., Bassu, S., Ciais, P., Durand, J.-L., Elliott, J., Ewert, F., Janssens, I. A., Li, T., Lin, E., Liu, Q., Martre, P., Müller, C., ... Asseng, S. (2017). Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(35), 9326–9331. <https://doi.org/10.1073/pnas.1701762114>

BIODATA PENULIS



Syaifullah Rahim, S.P., M.Si.

Dosen Program Studi Agroteknologi Jurusan Budidaya Tanaman
Fakultas Pertanian
Universitas Papua

Penulis lahir di Kendari tanggal 24 Juni 1997. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Agroteknologi, Jurusan Budidaya Tanaman, Fakultas Pertanian, Universitas Papua. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Agroteknologi dan melanjutkan S2 pada Jurusan Pemuliaan dan Bioteknologi Tanaman. Penulis menekuni menulis pertanian, Agronomi, Pemuliaan Tanaman. Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: s.rahim@unipa.ac.id

BIODATA PENULIS



Darius Dare, S.P., M.Si.

Dosen Program Studi Agroteknologi
Fakultas Pertanian Universitas Papua

Penulis lahir di Pungkang, Manggarai Barat, Nusa Tenggara Timur, pada tanggal 7 April 1996. Penulis merupakan dosen tetap pada program studi Agroteknologi, Jurusan Budidaya Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Papua. Penulis menyelesaikan pendidikan sarjana pada program studi Agroteknologi di Universitas Papua pada tahun 2018. Kemudian menyelesaikan studi S2 pada program studi magister Pemuliaan dan Bioteknologi Tanaman, IPB University tahun 2024.

Penulis menekuni bidang ilmu Genetika Tanaman, Pemuliaan dan Bioteknologi Tanaman. Berbagai penelitian yang telah dilakukan difokuskan pada analisis keragaman genetik, pemuliaan tanaman pada lingkungan bercekanan, serta budidaya tanaman pangan. Penulis dapat dihubungi melalui email: d.dare@unipa.ac.id.

BIODATA PENULIS



Dr. Ir. Nouke Lenda Mawikere, M.Si

Dosen Program Studi Agroteknologi
Fakultas Pertanian Universitas Papua

Penulis lahir di Tomohon, Manado, pada tanggal 16 November 1966. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Agroteknologi Fakultas Pertanian, serta S2 Ilmu Pertanian dan S3 Ilmu Lingkungan Program Pascasarjana Universitas Papua Manokwari. Penulis menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Budidaya Pertanian Fakultas Pertanian Universitas Cenderawasih Manokwari dan melanjutkan S2 serta S3 pada Jurusan Biologi Institut Pertanian Bogor. Penulis menekuni bidang ilmu Genetika, Pemuliaan Tanaman, dan Bioteknologi Pertanian. Berbagai penelitian yang telah dilakukan difokuskan pada Biodiversitas dan Pemuliaan Tanaman, Ketahanan Pangan, serta Budidaya Tanaman Pertanian. Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: n.mawikere@unipa.ac.id atau noukemawikere@gmail.com.

BIODATA PENULIS



Yuke Mareta Ariesta Sandra

Dosen Program Studi Sarjana Terapan Pertanian Presisi Jurusan
Rekayasa Elektro dan Industri Pertanian Politeknik Manufaktur
Negeri Bangka Belitung.

Penulis lahir di Pangkalpinang, tanggal 21 Maret 1995. Penulis Menyelesaikan Pendidikan S1 pada tahun 2013 pada Jurusan Agroteknologi Universitas Bangka Belitung. Pendidikan S2 diselesaikan pada tahun 2022 di Program Studi Pemuliaan dan Bioteknologi Tanaman Institut Pertanian Bogor (IPB). Penulis memulai karir sebagai dosen tetap Program Studi Pertanian Presisi di Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung pada tahun 2024. Sebelumnya penulis berkarir sebagai asisten peneliti di Pusat Kajian Hortikultura Tropika Institut Pertanian Bogor mulai tahun 2022-2024. Penulis aktif melakukan kegiatan pendidikan, penelitian, dan pengabdian masyarakat di bidang pertanian.
email: Yuke@polman-babel.ac.id

BIODATA PENULIS



Trisia Wulantika, S.P., M.P

Dosen Program Studi Teknologi Benih
Jurusan Budi Daya Tanaman

Penulis lahir di Bogor tanggal 03 April 1994. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknologi Benih Jurusan Budi Daya Tanaman Politeknik Pertanian Negeri Payakumbuh. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Agroekoteknologi dan melanjutkan S2 pada Jurusan Agronomi di Universitas Andalas. Penulis menekuni bidang Menulis dan Aktif dalam melaksanakan Tri Dharma Perguruan Tinggi, publikasi yang sudah terbit dapat dilihat pada google scholar penulis.

BIODATA PENULIS

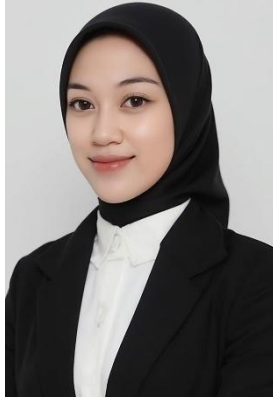


Dr. Ir. Umami Sholikhah, S.P., M.P.

Dosen Program Studi Agroteknologi
Fakultas Pertanian Universitas Jember

Penulis lahir di Banjarnegara, Jawa Tengah, pada 30 November 1978. Saat ini, penulis menjabat sebagai dosen tetap di Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Jember, dengan fokus pada pengajaran, penelitian, dan pengabdian masyarakat di bidang Produksi Tanaman. Penulis menempuh pendidikan Sarjana (S1) Proteksi Tanaman di Universitas Jember, lulus pada tahun 2002, kemudian melanjutkan pendidikan Magister (S2) Agronomi di universitas yang sama dan lulus pada tahun 2005. Penulis meraih gelar Doktor (S3) Ilmu Pertanian pada tahun 2022 dari Universitas Sebelas Maret, Surakarta, dengan fokus penelitian pada pengembangan teknologi dan strategi peningkatan produksi tanaman. Selama kariernya, penulis aktif menulis karya ilmiah, membimbing mahasiswa, dan berkontribusi pada pengembangan ilmu pertanian di Indonesia, khususnya dalam pengelolaan produksi tanaman secara berkelanjutan.

BIODATA PENULIS



Puji Rahayu, S.P.

Mahasiswa Magister Agronomi Fakultas Pertanian
Universitas Jember, Indonesia

Penulis lahir di Tulungagung pada 16 Agustus 2003. Penulis merupakan lulusan Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Jember. Saat ini penulis sedang menempuh pendidikan pada Program Magister Agronomi di Fakultas Pertanian, Universitas Jember. Selama menempuh pendidikan di bidang pertanian, penulis memiliki ketertarikan pada kajian agronomi, khususnya yang berkaitan dengan pemuliaan tanaman, teknologi benih, produksi tanaman, serta pengelolaan sistem budidaya yang berkelanjutan. Penulis juga tertarik pada pengembangan inovasi di bidang pertanian yang adaptif terhadap perubahan lingkungan dan kebutuhan pangan.

BIODATA PENULIS



Gabriela Welma Litaay, S.Si.,M.Biotech

Dosen Program Studi Agroteknologi
Fakultas Pertanian Universitas Papua

Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi S1 Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Papua. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Biologi di Universitas Atma Jaya Yogyakarta dan melanjutkan S2 pada Jurusan Bioteknologi dengan fokus di bidang Pertanian di Universitas Gadjah Mada. Penulis menekuni bidang Menulis.

BIODATA PENULIS



Reza Prakoso Dwi Julianto, SP.,MP

Dosen Program Studi Agroekoteknologi
Fakultas Pertanian Universitas Mulawarman

Penulis lahir di Lumajang tanggal 17 Juli 1990. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Agroekoteknologi Fakultas Pertanian Universitas Mulawarman. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Program Studi Agroekoteknologi Fakultas Pertanian Universitas Brawijaya Minat Pemuliaan Tanaman, dan melanjutkan S2 pada Jurusan Ilmu Tanaman Fakultas Pertanian Universitas Brawijaya minat Bioteknologi dan Pemuliaan Tanaman. Penulis menekuni bidang Pemuliaan Tanaman terutama untuk wilayah tropika basah.