

ILMU DAN TEKNOLOGI BENIH

**Venti Jatsiyah
Enny Adelina
Bachtiar
Maemunah
Sakka Samudin
Muhammad Sahbudin
Khansa Amara
Jeki
Indri Fariroh
Sepsriyanti Kannapadang
Nur Meili Zakiyah
Bahrul Rizki Ramadhan
Maria Azizah
Farah Rosyidah Diyana
Ade Sumiahadi**



ILMU DAN TEKNOLOGI BENIH

Penulis:

Venti Jatsiyah, S.P., M.Si.
Dr. Ir. Enny Adelina, M.P.
Dr. Bachtiar, S.P., M.P.
Dr. Ir. Maemunah, M.P.
Prof. Dr. Ir. Sakka Samudin, M.P.
Muhammad Sahbudin, S.T.P., M.T.
Khansa Amara, S.P., M.Si.
Jeki, S.P., M.Sc.
Indri Fariroh, S.P., M.Si.
Sepsriyanti Kannapadang, S.P., M.Si.
Nur Meili Zakiyah, S.Pd., M.Biotek.
Bahrul Rizki Ramadhan, S.P., M.P.
Maria Azizah, S.P., M.Si.
Farah Rosyidah Diyana, S.Tr.P., M.P.

Editor:

Dr. Ade Sumiahadi, S.P., M.Si.



Fanya Bintang Sejahtera

Ilmu dan Teknologi Benih

Oleh : Venti Jatsiyah; Enny Addina; Bachtia; Maemunah; Sakka Samudin; Muhammad Sahbudin; Khansa Amara; Jeki; Indri Fairoh; Sepsiyanti Kannapadang; Nur Meili Zakiyah; Bahrul Rizki Ramadhan; Maria Azizah; Farah Rosyidah Diyana

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

Editor : Dr. Ade Sumiahadi, S.P., M.Si.

Penyunting : apt. Ridha Putri Marhammah, S.Farm.

Desain Sampul dan Tata Letak : Fatimah Az Zahra, S.H.

Jatsiyah, Venti; dkk

Ilmu dan Teknologi Benih, -cet. 1. Padang: Fanya Bintang Sejahtera,
2025, 281 hlm.

ISBN 978-634-04-4453-7

Diterbitkan oleh :

Fanya Bintang Sejahtera

Anggota IKAPI No. 072/SBA/2025

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

Email: fanyapublishing@gmail.com

Website: www.fanyapublishing.com

Cetakan Pertama, 2025

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya, sehingga buku “Ilmu dan Teknologi Benih” dapat diselesaikan dengan baik. Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, arahan, dan motivasi selama proses penyusunan buku ini, baik secara langsung maupun tidak langsung, sehingga buku ini dapat hadir sebagai bahan ajar dan referensi yang bermanfaat bagi dunia pendidikan dan praktisi pertanian.

Buku ini membahas secara komprehensif berbagai aspek ilmiah dan teknis yang berkaitan dengan produksi, pengelolaan, serta pemanfaatan benih bermutu dalam sistem pertanian. Materi yang diuraikan meliputi struktur dan perkembangan benih, fisiologi perkecambahan, viabilitas dan vigor, teknik pemuliaan tanaman, serta pengujian mutu benih. Selain itu, buku ini juga menguraikan prinsip-prinsip pengolahan, pengeringan, penyimpanan, pengemasan, dan sertifikasi benih sesuai dengan standar yang berlaku.

Lebih lanjut, buku ini memaparkan penerapan teknologi modern dalam bidang perbenihan, seperti penggunaan bioteknologi, rekayasa genetik, serta sistem digital dalam produksi dan distribusi benih. Aspek manajemen mutu, regulasi, serta keberlanjutan industri perbenihan juga menjadi bagian penting dari pembahasan dalam buku ini. Dengan penyajian yang sistematis dan mudah dipahami, buku ini diharapkan dapat memperkuat pengetahuan teoritis sekaligus keterampilan praktis pembaca dalam bidang ilmu dan teknologi benih.

Penulis berharap buku ini dapat menjadi referensi yang berguna bagi mahasiswa, dosen, peneliti, maupun praktisi pertanian dalam memahami pentingnya peranan benih sebagai kunci keberhasilan budidaya dan ketahanan pangan nasional. Semoga buku ini memberikan manfaat yang luas dan dapat mendorong kemajuan sektor pertanian Indonesia menuju arah yang lebih inovatif, berdaya saing, dan berkelanjutan.

Padang, Oktober 2025
Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL	ix
BAB 1 PENGANTAR ILMU DAN TEKNOLOGI BENIH.....	1
1.1 Pengertian dan Ruang Lingkup Ilmu Benih.....	2
1.2 Peran Benih dalam Produksi Pertanian	5
1.3 Sejarah dan Perkembangan Teknologi Benih	8
1.4 Hubungan Ilmu Benih dengan Disiplin Ilmu Lainnya.....	11
1.5 Tantangan dan Prospek Ilmu Benih di Era Modern	13
DAFTAR PUSTAKA	19
BAB 2 STRUKTUR DAN PERKEMBANGAN BENIH	21
2.1 Anatomi dan Morfologi Benih.....	21
2.2 Proses Pembentukan Benih.....	25
2.3 Perkembangan Embrio dan Jaringan Cadangan	28
2.4 Fisiologi Pembentukan Benih Viabel.....	32
2.5 Faktor Genetik dan Lingkungan dalam Pembentukan Benih.....	37
DAFTAR PUSTAKA	41
BAB 3 KUALITAS BENIH	49
3.1 Komponen Kualitas Benih.....	49
3.2 Pengaruh Lingkungan terhadap Kualitas Benih.....	56
3.3 Standar Mutu Benih Nasional dan Internasional	58
3.4 Penurunan Kualitas Benih: Penyebab dan Pencegahan	61
3.5 Evaluasi Kualitas Benih di Lapangan.....	62
DAFTAR PUSTAKA	64
BAB 4 PRODUKSI BENIH	69
4.1 Tinjauan Umum.....	69
4.2 Prinsip Produksi Benih Berkualitas	72
4.3 Tahapan Produksi Benih: Pra-Panen Hingga Panen.....	73
4.4 Sistem Produksi Benih Tanaman Imbrida, Hibrida dan Vegetatif... ..	76
4.5 Manajemen Areal dan Isolasi Lahan Benih.....	79
4.6 Peran Petani Penangkar dalam Produksi Benih	81
DAFTAR PUSTAKA	83
BAB 5 TEKNOLOGI PEMULIAAN TANAMAN DAN BENIH....	85

5.1	Pemuliaan Tanaman Berbasis Bioteknologi	85
5.2	Marker-Assisted Selection (MAS) dan Genomic Selection	86
5.3	Teknologi Kultur Jaringan untuk Perbanyakkan dan Regenerasi	88
5.4	Digitalisasi dan Otomatisasi dalam Produksi Benih	89
5.5	Teknologi Adaptif terhadap Perubahan Iklim	91
5.6	Pemanfaatan Big Data dan Bioinformatika dalam Pemuliaan Tanaman	92
5.7	Sistem Produksi Benih Berbasis Community Seed Bank dan Benih Hibrida	94
	DAFTAR PUSTAKA	97
BAB 6	TEKNOLOGI PENGOLAHAN BENIH	99
6.1	Pembersihan dan Pemisahan Benih	99
6.2	Pengeringan Benih: Metode dan Alat	101
6.3	Sortasi, Grading, dan Pengemasan	103
6.4	Teknologi Pengolahan Modern dan Tradisional	107
6.5	Keselamatan dan Higienitas dalam Pengolahan	108
	DAFTAR PUSTAKA	110
BAB 7	PENGUJIAN MUTU BENIH	111
7.1	Pengantar: Pentingnya Pengujian Mutu Benih dalam Produksi Benih	111
7.2	Prinsip dan Tujuan Pengujian Benih	113
7.3	Uji Viabilitas dan Vigor	115
7.4	Uji Kemurnian Fisik dan Genetik	117
7.5	Uji Kesehatan Benih	118
7.6	Metode Laboratorium dan Lapangan	121
7.7	Interpretasi dan Sertifikasi Hasil Uji	123
	DAFTAR PUSTAKA	126
BAB 8	FISIOLOGI DAN BIODINAMIKA BENIH	127
8.1	Tinjauan Umum	127
8.2	Perkecambahan	127
8.3	Viabilitas benih	142
8.4	Dormansi Benih	145
	DAFTAR PUSTAKA	147
BAB 9	TEKNOLOGI PENYIMPANAN BENIH	149
9.1	Prinsip Penyimpanan Benih untuk Viabilitas Jangka Panjang	149
9.2	Faktor – Faktor yang Mempengaruhi Umur Simpan	150
9.3	Teknologi dan Fasilitas Penyimpanan Modern	164
9.4	Penyimpanan Benih untuk Plasma Nutfah dan Bank Benih	165

9.5 Pengemasan dan Labeling dalam Penyimpanan.....	167
DAFTAR PUSTAKA	170
BAB 10 TEKNOLOGI PENINGKATAN MUTU BENIH	173
10.1 Tinjauan Umum.....	173
DAFTAR PUSTAKA	184
BAB 11 BIOTEKNOLOGI DALAM TEKNOLOGI BENIH.....	187
11.1 Rekayasa Genetika dan Tanaman Transgenik	187
11.2 Kultur Jaringan dan Mikropropagasi.....	194
11.3 Penanda Molekuler untuk Seleksi Benih	199
11.4 Deteksi Mutasi dan Kontaminasi Genetik	201
11.5 Bioinformatika dalam Teknologi Benih.....	206
DAFTAR PUSTAKA	208
BAB 12 TEKNOLOGI MEKANISASI DALAM PRODUKSI BENIH.....	213
12.1 Mekanisasi dalam Penanaman dan Panen Benih	215
12.2 Peralatan untuk Pengolahan dan Sortasi Benih.....	217
12.3 Otomatisasi dalam Pengemasan dan Labeling.....	220
12.4 Pemanfaatan Sensor dan IoT Untuk <i>Monitoring</i>	223
12.5 Efisiensi Produksi dengan Teknologi Modern.....	225
DAFTAR PUSTAKA	228
BAB 13 STANDARISASI DAN SERTIFIKASI BENIH	231
13.1 Sistem Sertifikasi Benih Nasional dan Internasional	231
13.2 Proses dan Tahapan Sertifikasi	232
13.3 Kelembagaan dan Regulasi Benih.....	237
13.4 Penelusuran Asal Usul dan Label Mutu.....	238
13.5 Peran Lembaga Pengawas dan Penjamin Mutu.....	239
DAFTAR PUSTAKA	240
BAB 14 SISTEM DISTRIBUSI DAN PEMASARAN BENIH	241
14.1 Saluran Distribusi Benih Dari Produsen ke Konsumen	241
14.2 Strategi Pemasaran Benih Komersial	244
14.3 Peran Lembaga Swasta dan Pemerintah	246
14.4 Permasalahan Distribusi di Daerah Terpencil.....	248
14.5 Inovasi Digital dalam Pemasaran Benih	249
DAFTAR PUSTAKA	253
BIODATA PENULIS.....	255

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Perkembangan Struktur Reproduksi pada Tumbuhan Angiospermae	21
Gambar 2. Perkembangan Embrio pada Tumbuhan Dikotil dan Monokotil.....	22
Gambar 3. Perbedaan biji Dikotil dan Monokotil.....	23
Gambar 4. Tahapan Perkembangan Benih.....	26
Gambar 5. Kurva Dinamika Pertumbuhan Benih.....	28
Gambar 6. Tahapan Perkembangan Embrio dan Jaringan Cadangan	29
Gambar 7. Proses Mobilisasi Cadangan Makanan Selama Perkecambahan.	31
Gambar 8. Pengaruh Faktor Lingkungan terhadap Viabilitas Benih.....	40
Gambar 9. Rangkaian Kegiatan Penangkaran Jagung Merah Sigi (MESI) ...	70
Gambar 10. Penangkaran Benih Jagung MESI.....	71
Gambar 11. Kegiatan Penangkaran Benih Buah Naga	72
Gambar 12. Rangkaian Kegiatan Penyediaan Benih Bawang Merah Varietas Lembah Palu.....	74
Gambar 13. Jagung Merah Sigi (MESI).....	75
Gambar 14. Penyediaan Bibit Buah Naga.....	77
Gambar 15. Pengembangan dan penelitian perbenihan bawang merah lokal	82
Gambar 16. Alat Pembersih benih Clipper (<i>the air screen cleaner</i>) dan winnower machine	100
Gambar 17. Alat Pembersih benih <i>winnower machine</i>	101
Gambar 18. Sortasi padi secara konvensional	104
Gambar 19. Alat sortasi mekanis <i>seed cleaner</i>	104
Gambar 20. Pengeringan secara konvensional.....	107
Gambar 21. Alur hubungan ISTA, OECD, dan standar nasional dalam pengujian.....	112
Gambar 22. ISTA International Seed Lot Certificates yang terbagi menjadi dua warna.....	124
Gambar 23. Periode perkecambahan benih.....	128
Gambar 24. Hubungan perkecambahan benih dengan kadar air benih pada periode pertama	129
Gambar 25. Hubungan perkecambahan benih dengan kadar air benih pada periode 1 dan 2.....	130
Gambar 26. Hubungan kadar air benih dengan kelembaban relatif.....	131

Gambar 27. Ilustrasi benih	134
Gambar 28. Struktur pati dalam bentuk amilosa	136
Gambar 29. Struktur pati dalam bentuk amilopektin.....	137
Gambar 30. Ikatan peptida protein	138
Gambar 31. Struktur kimia triasilgliserol atau trigliserida.....	139
Gambar 32. Hubungan perkecambahan benih dengan kadar air benih pada periode 1,2, dan 3.....	142
Gambar 33. Model konsepsi steinbauer-sadjad; Viabilitas benih pada setiap periode viabilitas.....	144
Gambar 34. Gejala kemunduran benih	149
Gambar 35. <i>Albizia julibrissin</i> , <i>Cassia fistula</i> , <i>Goodia medicaginea</i> , <i>Trifolium fragiferum</i>	150
Gambar 36. Benih kedelai, kacang tanah, barley, benih oat, benih rye	151
Gambar 37. Perkembangan bobot segar benih, bobot kering benih, dan kadar air benih selama perkembangan dan pematangan benih.....	154
Gambar 38. Kaidah Harrington.....	157
Gambar 39. Kadar air keseimbangan benih pada beberapa tingkat RH	160
Gambar 40. Pengaruh RH dan suhu ruang simpan terhadap perkecambahan benih.....	161
Gambar 41. Respon kadar air dan laju penurunan perkecambahan benih kedelai Demas 1 dan Devon 1 terhadap penyimpanan terang dan gelap.....	162
Gambar 42. Pengaruh kadar air awal benih okra dan kemasan benih terhadap kadar air benih akhir dan perkecambahan setelah 6 bulan penyimpanan.....	167
Gambar 43. Metode <i>Seed Priming</i> dan <i>Seed Pelleting</i>	175
Gambar 44. Tahapan dalam rekayasa genetika.....	188
Gambar 45. Metode transformasi langsung dan tidak langsung.....	189
Gambar 46. Metode transformasi genetika melalui <i>Agrobacterium</i>	193
Gambar 47. Skema Peralatan untuk Pengolahan dan Sortasi Benih.....	214
Gambar 48. Alat-alat untuk Sortasi Benih	217
Gambar 49. Penyimpanan Benih dalam Botol.....	220
Gambar 50. Sistem Pengemasan Otomatis HP-450VR.....	221
Gambar 51. Pemanfaatan Sensor dan IoT dalam <i>Monitoring</i>	224
Gambar 52. Distribusi Benih Tidak Langsung.....	243

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Karakteristik Benih Ortodoks, Intermediet, dan Rekalsitran	23
Tabel 2. Perbandingan Karakteristik Anatomi Benih Ortodoks dan Rekalsitran	24
Tabel 3. Karakteristik Utama Tahapan Perkembangan Benih.....	26
Tabel 4. Teknik Pematahan Dormansi	35
Tabel 5. Parameter Fisiologis Kematangan Benih.....	36
Tabel 6. Pengaruh Ukuran Benih Terhadap Hasil Panen.....	54
Tabel 7. Dampak Faktor Penyimpanan Benih	58
Tabel 8. Parameter Mutu Benih menurut Kementan (2023):	59
Tabel 9. Parameter Kualitas Benih menurut Standar ISTA (2023)	59
Tabel 10. Daya Kecambah dan Kemurniaan berdasarkan Kelas Benih.....	60
Tabel 11. Perbandingan Standar Nasional dan Internasional	60
Tabel 12. Standar Mutu Benih (SNI dan ISTA)	71
Tabel 13. Parameter Panen Benih	76
Tabel 14. Sistem Produksi dan Hasil Perbanyak secara Inbrida, Hibrida dan Vegetatif	79
Tabel 15. Data Jarak Isolasi	80
Tabel 16. Jenis benih dan waktu penyimpanannya	102
Tabel 17. Alat dan mesin pengering mekanik.....	103
Tabel 18. Perbandingan Teknologi tradisional dan modern	108
Tabel 19. Jenis kontaminan pada benih beserta contoh dan dampaknya ...	114
Tabel 20. Jenis kontaminan pada benih beserta contoh dan dampaknya ...	118
Tabel 21. Hubungan ketersediaan air benih (hasil tabulasi data sekunder)	132
Tabel 22. Kandungan unsur anorganik utama fitin dalam biji dari berbagai spesies, dan lokasinya.....	140
Tabel 23. Diameter dan perkecambahan benih wortel pada umur panen yang berbeda	154
Tabel 24. Hubungan antara tingkat kemasakan benih dengan perkecambahan benih squash yang disimpan	154
Tabel 25. Kehilangan viabilitas benih yang disimpan di berbagai suhu dan RH.....	161
Tabel 26. Metode Priming.....	175
Tabel 27. Metode Inokulasi Mikrob.....	177
Tabel 28. Jenis Pelapisan Benih	179
Tabel 29. Metode Dormansi Benih.....	180

Tabel 30. Teknologi Baru dalam <i>Enhancing Seed Quality</i>	182
Tabel 31. Jenis-jenis metode transformasi secara kimia.....	191
Tabel 32. Perbandingan vektor metode transformasi secara tidak langsung	192
Tabel 33. Zat Pengatur Tumbuh Tanaman.....	196
Tabel 34. Media kultur jaringan tanaman umum: deskripsi, komposisi, aplikasi, dan studi tentang media tersebut	197
Tabel 35. Deskripsi jenis-jenis penanda genetik.....	199
Tabel 36. Perbandingan jenis penanda molekuler.....	204
Tabel 37. Lanjutan Perbandingan jenis penanda molekuler.....	205

BAB 1

PENGANTAR ILMU DAN TEKNOLOGI BENIH

Oleh: Venti Jatsiyah

Pendahuluan

Ilmu dan teknologi benih merupakan bidang yang sangat penting dalam dunia pertanian dan ketahanan pangan. Pada dasarnya, benih adalah sumber utama untuk memulai pertumbuhan tanaman, dan kualitas benih yang digunakan akan sangat menentukan keberhasilan dalam menghasilkan panen yang melimpah dan berkualitas. Melalui ilmu benih, kita mempelajari berbagai aspek yang berkaitan dengan benih, mulai dari karakteristik biologis dan genetis, proses produksi, pengujian, hingga penyimpanan dan distribusinya. Dengan pemahaman yang mendalam tentang hal ini, petani dan pemulia tanaman dapat memastikan bahwa benih yang mereka gunakan memenuhi standar mutu dan mampu memberikan hasil optimal.

Sejarah perkembangan teknologi benih menunjukkan perjalanan panjang yang dimulai dari masa awal manusia beralih dari pola hidup berburu dan meramu ke bercocok tanam sekitar 10.000 tahun yang lalu. Pada masa itu, manusia mulai menyadari bahwa benih dari tanaman terbaik memiliki potensi untuk menghasilkan tanaman yang lebih baik pula. Seiring berjalannya waktu, inovasi dan penemuan teknologi semakin berkembang, mulai dari teknik seleksi tradisional, penggunaan alat sederhana, hingga munculnya teknologi modern seperti pemuliaan berbasis genetika dan bioteknologi. Revolusi industri dan penemuan dasar-dasar genetika oleh Gregor Mendel menjadi tonggak penting yang mempercepat pengembangan benih unggul dan varietas tanaman yang lebih produktif dan tahan terhadap berbagai tantangan.

Di era modern, teknologi benih terus berkembang dengan pesat. Kemajuan dalam bidang bioteknologi, rekayasa genetika, dan digitalisasi telah membuka peluang besar untuk menciptakan benih yang tidak hanya unggul dari segi hasil, tetapi juga mampu bertahan di kondisi lingkungan yang ekstrem, seperti kekeringan, suhu tinggi, dan serangan hama serta penyakit. Teknologi ini memungkinkan pemuliaan tanaman yang lebih cepat, presisi, dan efisien, sehingga mampu memenuhi kebutuhan pangan dunia yang terus meningkat. Selain itu, inovasi dalam penyimpanan dan konservasi sumber

daya genetik tanaman juga menjadi bagian penting dari pengembangan teknologi benih saat ini.

Namun, di balik kemajuan tersebut, masih ada berbagai tantangan yang harus dihadapi, seperti perlindungan hak kekayaan intelektual, akses petani terhadap benih berkualitas, serta konservasi sumber daya genetik yang beragam. Masa depan ilmu dan teknologi benih sangat bergantung pada kolaborasi global, inovasi berkelanjutan, dan kebijakan yang mendukung keberlanjutan pertanian. Dengan memahami perjalanan panjang dan perkembangan teknologi ini, kita dapat lebih menghargai peran vital benih dalam memastikan keberhasilan pertanian, meningkatkan kesejahteraan petani, dan menjaga ketahanan pangan di masa depan. Buku ini akan membahas secara lengkap berbagai aspek tersebut, agar pembaca dapat memahami pentingnya ilmu dan teknologi benih dalam mendukung pertanian yang berkelanjutan dan inovatif.

1.1 Pengertian dan Ruang Lingkup Ilmu Benih

Ilmu benih merupakan cabang ilmu yang mempelajari segala aspek yang berkaitan dengan benih sebagai bahan utama dalam produksi tanaman. Secara umum, pengertian ini mencakup pemahaman tentang karakteristik biologis, fisiologis, genetis, serta proses-proses yang mempengaruhi kualitas dan keberhasilan benih dalam menumbuhkan tanaman. Dalam konteks pertanian modern, benih tidak hanya dilihat sebagai bahan penanaman, tetapi juga sebagai aset strategis yang menentukan keberhasilan produksi tanaman secara keseluruhan.

1.1.1 Pengertian Ilmu Benih

Pengertian ilmu benih dapat dirumuskan sebagai cabang ilmu yang mempelajari aspek-aspek biologis, fisiologis, genetis, dan teknologi yang berkaitan dengan produksi, pengujian, penyimpanan, dan penggunaan benih untuk mendukung keberlanjutan produksi tanaman. Menurut FAO (2014), benih adalah “produk dari proses reproduksi tanaman yang mampu menumbuhkan tanaman baru yang identik dengan tanaman induknya, dan memiliki potensi untuk menghasilkan tanaman yang sehat dan produktif.

Dalam pengertian ini, benih tidak hanya dilihat sebagai hasil dari proses reproduksi tanaman, tetapi juga sebagai bahan yang harus memenuhi standar tertentu agar mampu menghasilkan tanaman yang optimal. Oleh karena itu, ilmu benih mencakup aspek-aspek seperti kualitas benih, teknik produksi

benih unggul, serta pengujian dan sertifikasi benih agar memenuhi standar mutu nasional maupun internasional.

Selain itu, Khan et al. (2019) menyatakan bahwa ilmu benih juga meliputi studi tentang faktor-faktor yang mempengaruhi vigor dan viabilitas benih, termasuk kondisi lingkungan, teknik penyimpanan, dan perlakuan khusus untuk meningkatkan daya tumbuh benih. Dengan demikian, pengertian ini menegaskan bahwa ilmu benih tidak hanya berfokus pada aspek biologis, tetapi juga pada aspek teknologi dan manajemen yang mendukung keberhasilan penggunaan benih.

1.1.2 Ruang Lingkup Ilmu Benih

Ruang lingkup ilmu benih sangat luas dan multidisipliner, mencakup berbagai aspek yang berkaitan dengan benih dari tahap awal reproduksi hingga penggunaannya di lapangan. Secara garis besar, ruang lingkup ini meliputi:

- **Produksi Benih** Meliputi teknik dan manajemen produksi benih unggul, baik untuk tanaman pangan, hortikultura, perkebunan, maupun tanaman kehutanan. Termasuk di dalamnya adalah pemilihan sumber benih, teknik budidaya tanaman induk, serta pengelolaan kebun benih agar menghasilkan benih berkualitas tinggi.
- **Pengujian dan Sertifikasi Benih** Meliputi prosedur pengujian kualitas benih berdasarkan standar nasional maupun internasional, seperti vigor, viabilitas, purity, dan bebas dari penyakit. Sertifikasi benih bertujuan memastikan bahwa benih yang beredar di pasar memenuhi standar mutu tertentu dan aman digunakan petani.
- **Teknologi Penyimpanan dan Perlakuan Benih** Meliputi teknik penyimpanan yang menjaga daya tahan dan kualitas benih selama masa simpan, termasuk pengendalian suhu, kelembapan, dan perlakuan khusus seperti perlakuan fisik maupun kimia untuk meningkatkan daya tumbuh.
- **Perbaikan dan Pengembangan Benih Unggul** Meliputi pemuliaan tanaman, rekayasa genetika, dan teknologi bioteknologi untuk menghasilkan benih dengan sifat-sifat unggul seperti ketahanan terhadap hama dan penyakit, toleransi terhadap stres lingkungan, serta peningkatan produktivitas.
- **Penggunaan dan Manajemen Benih di Lapangan** Meliputi teknik penanaman, perlakuan awal benih, serta strategi distribusi dan penggunaan benih yang efisien dan berkelanjutan.

1.1.3 Aspek-aspek Penting dalam Ilmu Benih

Dalam pengembangan dan penerapan ilmu benih, terdapat beberapa aspek penting yang harus diperhatikan secara mendalam, antara lain:

- **Kualitas Benih** Kualitas benih sangat menentukan keberhasilan pertumbuhan tanaman. Kualitas ini meliputi aspek fisik (keutuhan, kebersihan), fisiologis (daya tumbuh, vigor), dan genetis (keaslian, sifat unggul). Standar internasional seperti yang ditetapkan oleh ISTA (International Seed Testing Association) dan ISF (International Seed Federation) menjadi acuan utama dalam pengujian dan sertifikasi.
- **Genetika dan Pemuliaan Tanaman** Pemuliaan bertujuan menghasilkan benih dengan sifat-sifat unggul, seperti ketahanan terhadap hama, penyakit, dan stres lingkungan. Teknologi modern seperti rekayasa genetika dan marker-assisted selection semakin mempercepat proses pengembangan benih unggul.
- **Teknologi Produksi dan Penyimpanan** Penggunaan teknologi modern dalam produksi dan penyimpanan benih sangat penting untuk menjaga kualitas dan daya tahan benih selama masa simpan. Teknik seperti pengeringan yang tepat, penggunaan bahan pengawet alami, dan penyimpanan di lingkungan yang terkendali menjadi bagian integral dari ilmu benih.
- **Pengujian dan Sertifikasi** Pengujian dilakukan secara laboratorium dan lapangan untuk memastikan bahwa benih memenuhi standar mutu. Sertifikasi dilakukan oleh lembaga resmi untuk menjamin keaslian dan kualitas benih yang beredar di pasar.

1.1.4 Signifikansi Ilmu Benih dalam Pertanian

Ilmu benih memiliki peran strategis dalam meningkatkan produktivitas dan keberlanjutan pertanian. Dengan benih berkualitas tinggi, petani dapat memperoleh hasil yang lebih stabil dan optimal, sekaligus mengurangi risiko kegagalan panen akibat serangan hama, penyakit, atau kondisi lingkungan yang tidak mendukung.

Selain itu, pengembangan benih unggul juga mendukung ketahanan pangan nasional dan global, terutama dalam menghadapi tantangan perubahan iklim dan pertumbuhan populasi dunia. Sebagai contoh, benih tahan kekeringan dan toleran terhadap suhu ekstrem menjadi sangat penting dalam konteks perubahan iklim yang semakin nyata.

1.1.5 Tantangan dalam Ilmu Benih

Meskipun perkembangan ilmu benih sangat pesat, masih terdapat berbagai tantangan yang harus diatasi, seperti:

- **Keterbatasan akses petani terhadap benih berkualitas;** Terutama di daerah terpencil dan negara berkembang, di mana distribusi benih unggul masih terbatas.
- **Perlindungan hak kekayaan intelektual;** Dalam pengembangan benih unggul, perlindungan hak paten dan varietas menjadi isu penting untuk mendorong inovasi.
- **Pengelolaan sumber daya genetik;** Menjaga keberagaman genetik tanaman agar tetap tersedia untuk pemuliaan di masa depan.
- **Perubahan iklim dan stres lingkungan;** Menuntut pengembangan benih yang mampu bertahan di kondisi ekstrem dan tidak menimbulkan dampak negatif terhadap ekosistem.

Secara keseluruhan, ilmu benih merupakan bidang yang sangat vital dalam mendukung keberlanjutan produksi tanaman dan ketahanan pangan. Melalui pemahaman yang mendalam tentang karakteristik, proses produksi, pengujian, dan teknologi penyimpanan benih, ilmu ini berperan sebagai fondasi utama dalam pengembangan pertanian modern yang efisien, berkelanjutan, dan inovatif. Penguasaan aspek-aspek tersebut tidak hanya penting bagi para ilmuwan dan pemulia tanaman, tetapi juga bagi petani, pengelola kebun benih, dan seluruh pemangku kepentingan yang terkait.

1.2 Peran Benih dalam Produksi Pertanian

Benih memegang peranan yang sangat penting dalam keberhasilan dan keberlanjutan produksi pertanian. Sebagai titik awal dari seluruh proses produksi tanaman, benih tidak hanya berfungsi sebagai sumber generatif untuk menanam, tetapi juga sebagai faktor utama yang menentukan kualitas hasil panen, efisiensi produksi, dan keberlanjutan ekosistem pertanian. Dalam konteks ini, pemahaman mendalam tentang peran benih menjadi sangat penting, terutama dalam menghadapi tantangan global seperti perubahan iklim, ketahanan pangan, dan kebutuhan akan produksi yang lebih efisien dan ramah lingkungan.

1.2.1 Benih sebagai Titik Awal Produksi Tanaman

Benih merupakan bahan utama yang digunakan untuk memulai pertumbuhan tanaman. Tanpa benih yang berkualitas, proses produksi

tanaman tidak akan optimal, bahkan bisa gagal sama sekali. Benih yang baik harus memiliki sifat genetik unggul, viabilitas tinggi, dan daya berkecambah yang baik. Kualitas benih ini akan menentukan tingkat keberhasilan penanaman, pertumbuhan tanaman, serta hasil akhir yang diperoleh. Sebagai contoh, benih unggul mampu menghasilkan tanaman yang sehat, tahan penyakit, dan mampu beradaptasi dengan kondisi lingkungan spesifik.

1.2.2 Pengaruh Kualitas Benih terhadap Produktivitas dan Hasil Panen

Kualitas benih secara langsung mempengaruhi produktivitas pertanian. Benih yang berkualitas tinggi akan menghasilkan tanaman yang lebih seragam, sehat, dan memiliki potensi hasil yang lebih tinggi. Sebaliknya, benih yang buruk atau tidak sesuai standar dapat menyebabkan pertumbuhan yang tidak optimal, tingkat kematian tanaman yang tinggi, serta hasil panen yang rendah. Menurut penelitian oleh Singh et al. (2019), penggunaan benih unggul dapat meningkatkan hasil panen hingga 20-30% dibandingkan dengan benih konvensional yang tidak terstandar. Hal ini menunjukkan bahwa investasi dalam benih berkualitas merupakan salah satu strategi utama untuk meningkatkan efisiensi dan keberhasilan produksi pertanian.

1.2.3 Benih sebagai Faktor Keberlanjutan dan Ketahanan Pangan

Selain berpengaruh langsung terhadap hasil, benih juga berperan dalam mendukung keberlanjutan sistem pertanian. Benih yang dikembangkan melalui teknologi rekayasa genetika atau pemuliaan tanaman modern mampu meningkatkan ketahanan terhadap hama, penyakit, dan kondisi lingkungan ekstrem seperti kekeringan atau banjir. Dengan demikian, benih yang inovatif dapat membantu petani mengurangi penggunaan pestisida dan input kimia lainnya, sehingga mendukung praktik pertanian yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan. Selain itu, benih juga berperan dalam menjaga keberagaman genetik tanaman. Melalui pemuliaan dan konservasi benih, petani dan peneliti dapat memastikan tersedianya sumber daya genetik yang penting untuk adaptasi terhadap perubahan iklim dan tantangan lain di masa depan. Dengan demikian, benih tidak hanya sebagai alat produksi, tetapi juga sebagai aset strategis dalam menjaga ketahanan pangan global.

1.2.4 Peran Benih dalam Teknologi Pertanian Modern

Dalam era teknologi modern, peran benih semakin berkembang. Penggunaan teknologi seperti rekayasa genetika, bioteknologi, dan pemuliaan

tanaman berbasis marker telah memungkinkan pengembangan benih dengan sifat-sifat unggul yang sebelumnya sulit dicapai. Contohnya adalah benih padi tahan hama dan kekeringan, benih jagung dengan kandungan nutrisi yang lebih tinggi, serta benih sayuran yang memiliki umur simpan lebih lama. Teknologi ini tidak hanya meningkatkan hasil dan efisiensi produksi, tetapi juga membantu petani mengatasi tantangan iklim dan pasar global yang semakin kompetitif.

Selain itu, teknologi digital dan sistem informasi berbasis data juga memfasilitasi pemilihan benih yang tepat sesuai dengan kondisi lokal dan kebutuhan pasar. Sistem ini memungkinkan petani dan pemulia untuk mengakses informasi tentang kualitas benih, asal-usul, dan performa varietas tertentu secara cepat dan akurat, sehingga pengambilan keputusan menjadi lebih tepat sasaran.

1.2.5 Peran Benih dalam Meningkatkan Efisiensi dan Keberhasilan Produksi

Penggunaan benih yang tepat dan berkualitas tinggi dapat meningkatkan efisiensi produksi secara signifikan. Dengan benih yang memiliki tingkat viabilitas tinggi dan sifat unggul, petani dapat mengurangi jumlah benih yang digunakan per hektar, mempercepat waktu tanam, dan meningkatkan tingkat keberhasilan penanaman. Hal ini berdampak langsung pada pengurangan biaya produksi dan peningkatan pendapatan petani.

Selain itu, benih yang tahan terhadap kondisi lingkungan ekstrem dan serangan hama serta penyakit dapat mengurangi ketergantungan terhadap pestisida dan input kimia lainnya. Dengan demikian, penggunaan benih inovatif mendukung praktik pertanian yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan, sekaligus meningkatkan ketahanan petani terhadap fluktuasi pasar dan iklim.

1.2.6 Peran Benih dalam Peningkatan Kesejahteraan Petani dan Ketahanan Pangan Nasional

Secara makro, peran benih dalam produksi pertanian berkontribusi besar terhadap peningkatan kesejahteraan petani dan ketahanan pangan nasional. Dengan tersedianya benih berkualitas dan inovatif, petani dapat memperoleh hasil yang lebih tinggi dan stabil, sehingga meningkatkan pendapatan dan taraf hidup mereka. Di tingkat nasional, peningkatan produktivitas pertanian melalui penggunaan benih unggul dapat membantu memenuhi kebutuhan

pangan masyarakat, mengurangi ketergantungan impor, dan memperkuat ketahanan pangan secara keseluruhan.

Selain itu, pengembangan dan distribusi benih yang tepat juga mendukung diversifikasi tanaman dan pengembangan komoditas unggulan daerah, yang pada akhirnya memperkuat ekonomi lokal dan nasional. Oleh karena itu, investasi dalam riset dan pengembangan benih menjadi salah satu strategi utama dalam mencapai pembangunan pertanian yang berkelanjutan dan inklusif.

1.3 Sejarah dan Perkembangan Teknologi Benih

Perkembangan teknologi benih merupakan bagian integral dari evolusi pertanian manusia yang telah berlangsung selama ribuan tahun. Sejarah ini mencerminkan upaya manusia untuk meningkatkan kualitas, kuantitas, dan keberlanjutan produksi tanaman melalui inovasi dan penemuan yang terus berkembang dari masa ke masa. Dalam bagian ini, kita akan menelusuri perjalanan panjang teknologi benih dari masa awal hingga era modern, termasuk inovasi penting yang telah mengubah cara manusia memproduksi dan memanfaatkan benih untuk memenuhi kebutuhan pangan global.

1.3.1 Awal Mula Penggunaan Benih dalam Peradaban Manusia

Sejarah teknologi benih bermula dari masa prasejarah ketika manusia pertama kali beralih dari pola hidup berburu dan meramu ke pola bercocok tanam. Sekitar 10.000 tahun yang lalu, manusia mulai menanam tanaman seperti gandum, barley, dan kacang-kacangan dari biji-biji yang mereka temukan secara alami. Pada masa ini, proses pemilihan benih dilakukan secara tidak sadar, berdasarkan keberhasilan tanaman tertentu dalam bertahan dan berbuah. Mereka secara tidak langsung melakukan seleksi alam dan seleksi manusia, yang kemudian menjadi dasar dari domestikasi tanaman.

Seiring waktu, manusia menyadari bahwa benih dari tanaman yang tumbuh baik memiliki potensi untuk menghasilkan tanaman yang lebih baik pula. Mereka mulai menyimpan benih dari tanaman terbaik untuk ditanam kembali pada musim berikutnya, sebuah praktik yang dikenal sebagai seleksi tradisional. Praktik ini menjadi fondasi awal dari pengembangan teknologi benih, meskipun pada masa itu belum ada pemahaman ilmiah yang mendalam tentang genetika.

1.3.2 Perkembangan Teknologi Benih di Era Kuno dan Abad Pertengahan

Pada masa peradaban kuno, seperti Mesir, Mesopotamia, dan Tiongkok, manusia mulai mengembangkan teknik pertanian yang lebih maju, termasuk metode penyimpanan benih dan pengelolaan varietas tanaman. Mereka juga mulai melakukan seleksi secara lebih sistematis untuk meningkatkan hasil dan ketahanan tanaman. Misalnya, di Mesir kuno, petani menggunakan teknik pemilihan benih dari tanaman yang menunjukkan sifat unggul, seperti ketahanan terhadap kekeringan dan hasil panen yang tinggi.

Pada abad pertengahan, inovasi dalam penyimpanan dan pengelolaan benih semakin berkembang. Penggunaan wadah kedap udara dan teknik pengeringan membantu menjaga kualitas benih selama periode tertentu. Selain itu, di Eropa, praktik pemuliaan tanaman mulai dilakukan secara lebih sadar dan terorganisasi, meskipun masih bersifat tradisional dan berbasis pengalaman.

1.3.3 Revolusi Industri dan Awal Teknologi Modern

Perkembangan teknologi benih mengalami lonjakan besar selama Revolusi Industri pada abad ke-18 dan ke-19. Penemuan mesin-mesin pertanian seperti mesin penanam dan mesin panen memungkinkan produksi benih dalam jumlah besar dan dengan efisiensi yang lebih tinggi. Pada masa ini, muncul pula konsep pemuliaan tanaman secara sistematis, yang didukung oleh penemuan dasar-dasar genetika oleh Gregor Mendel pada tahun 1865. Penelitian Mendel tentang pewarisan sifat tanaman membuka jalan bagi pemuliaan tanaman berbasis ilmu pengetahuan.

Di awal abad ke-20, muncul teknik pemuliaan tanaman yang lebih canggih, termasuk penggunaan mutasi buatan dan hibridisasi. Hibridisasi, khususnya, menjadi salah satu inovasi penting yang menghasilkan varietas tanaman dengan sifat unggul, seperti hasil tinggi dan ketahanan terhadap penyakit. Pengembangan benih hibrida pertama kali dilakukan pada jagung di Amerika Serikat dan kemudian menyebar ke berbagai tanaman lain.

1.3.4 Era Bioteknologi dan Genetika Modern

Perkembangan teknologi benih semakin pesat sejak pertengahan abad ke-20 dengan munculnya bioteknologi dan rekayasa genetika. Penemuan DNA dan teknik rekayasa genetika memungkinkan modifikasi genetik tanaman secara langsung untuk meningkatkan sifat-sifat tertentu, seperti ketahanan terhadap hama, toleransi terhadap stres lingkungan, dan

peningkatan nutrisi. Teknologi rekayasa genetika ini membuka peluang besar dalam pengembangan benih transgenik yang mampu memenuhi kebutuhan pangan global yang semakin meningkat.

Selain itu, kemajuan dalam bioteknologi juga mendukung pengembangan benih yang lebih aman, tahan lama, dan memiliki tingkat keberhasilan penanaman yang lebih tinggi. Teknologi marker-assisted selection dan genomik telah mempercepat proses pemuliaan tanaman dengan mengidentifikasi gen-gen penting yang berperan dalam sifat-sifat unggul. Hal ini memungkinkan pemuliaan yang lebih presisi dan efisien dibandingkan metode konvensional.

1.3.5 Digitalisasi dan Teknologi Terkini dalam Pengembangan Benih

Memasuki abad ke-21, teknologi digital dan data besar mulai diintegrasikan ke dalam pengembangan benih. Penggunaan sistem informasi geografis, pemodelan komputer, dan analisis genomik memungkinkan pemetaan sifat genetik tanaman secara lebih lengkap dan akurat. Teknologi ini mendukung pengembangan varietas tanaman yang adaptif terhadap perubahan iklim dan kondisi lingkungan ekstrem. Selain itu, inovasi dalam teknologi kultur jaringan dan bioreaktor memungkinkan produksi benih dalam skala besar dengan kualitas yang konsisten. Teknologi *cryopreservation* dan penyimpanan genetik di bank benih global juga menjadi bagian penting dari strategi konservasi sumber daya genetik tanaman untuk masa depan.

1.3.6 Tantangan dan Masa Depan Teknologi Benih

Meskipun telah mengalami perkembangan pesat, teknologi benih masih menghadapi berbagai tantangan, seperti kebutuhan akan keberlanjutan, konservasi sumber daya genetik, dan pengurangan ketergantungan terhadap bahan kimia. Di masa depan, integrasi teknologi canggih seperti CRISPR dan editing gen akan semakin mempercepat proses pemuliaan tanaman dan meningkatkan keberagaman genetik. Selain itu, kolaborasi global dan penguatan kebijakan dalam konservasi sumber daya genetik serta distribusi benih yang adil akan menjadi kunci keberhasilan pengembangan teknologi benih yang berkelanjutan dan mampu memenuhi kebutuhan pangan dunia yang terus meningkat.

1.4 Hubungan Ilmu Benih dengan Disiplin Ilmu Lainnya

Ilmu benih merupakan bidang studi yang sangat penting dalam konteks pertanian dan ketahanan pangan. Namun, keberhasilannya tidak dapat dipisahkan dari kolaborasi dan hubungan yang erat dengan berbagai disiplin ilmu lain. Hubungan ini tidak hanya memperkaya pemahaman tentang proses dan teknologi benih, tetapi juga memperluas aplikasi dan inovasi yang dapat dihasilkan. Dalam bagian ini, akan dibahas secara mendalam bagaimana ilmu benih berinteraksi dan bersinergi dengan disiplin ilmu lain, serta bagaimana kolaborasi tersebut mendorong kemajuan teknologi dan praktik pertanian yang berkelanjutan.

1.4.1 Hubungan Ilmu Benih dengan Ilmu Biologi dan Genetika

Ilmu biologi dan genetika merupakan fondasi utama dalam pengembangan benih berkualitas tinggi. Melalui pemahaman mendalam tentang struktur, fungsi, dan mekanisme genetik tanaman, ilmuwan dapat melakukan pemuliaan tanaman secara selektif untuk meningkatkan sifat-sifat unggul seperti hasil, ketahanan terhadap hama dan penyakit, serta toleransi terhadap stres lingkungan. Teknologi rekayasa genetika dan *marker-assisted selection* (MAS) adalah contoh penerapan ilmu genetika yang secara langsung mempengaruhi pengembangan benih modern. Misalnya, penggunaan teknologi CRISPR-Cas9 dalam modifikasi genetik tanaman telah memungkinkan penciptaan varietas benih yang lebih tahan terhadap kondisi ekstrem, seperti kekeringan dan suhu tinggi, yang sangat relevan dalam menghadapi perubahan iklim global.

1.4.2 Hubungan Ilmu Kimia dan Teknologi Pangan

Ilmu kimia berperan penting dalam proses pengolahan dan preservasi benih. Analisis kimiawi terhadap kandungan nutrisi, zat pengawet, serta bahan aktif dalam benih membantu memastikan kualitas dan keamanan benih yang akan digunakan. Selain itu, teknologi pengemasan dan perlakuan benih yang melibatkan bahan kimia, seperti fungisida dan insektisida, memerlukan pemahaman mendalam tentang reaksi kimia dan toksikologi untuk mengurangi risiko terhadap manusia dan lingkungan. Pengembangan bahan pengawet yang ramah lingkungan dan efektif juga menjadi fokus penelitian yang mengintegrasikan ilmu kimia dan teknologi benih.

1.4.3 Hubungan Ilmu Agronomi dan Ekologi

Ilmu agronomi dan ekologi memberikan kerangka kerja penting dalam menempatkan pengembangan benih dalam konteks sistem pertanian yang berkelanjutan. Pemilihan varietas benih yang sesuai dengan kondisi lingkungan dan praktik agronomi tertentu dapat meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya, seperti air dan nutrisi tanah, serta mengurangi ketergantungan terhadap input kimiawi. Pendekatan agroekologi yang mengintegrasikan keanekaragaman hayati dan praktik konservasi tanah dan air mendukung pengembangan benih yang adaptif terhadap ekosistem lokal. Dengan demikian, kolaborasi ini membantu menciptakan sistem pertanian yang lebih resilient dan ramah lingkungan.

1.4.4 Hubungan Ilmu Ekonomi dan Sosial

Pengembangan dan distribusi benih tidak hanya berkaitan dengan aspek ilmiah dan teknologi, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh faktor ekonomi dan sosial. Analisis ekonomi membantu menentukan strategi produksi, distribusi, dan akses terhadap benih, terutama dalam konteks petani kecil dan masyarakat adat. Selain itu, aspek sosial seperti budaya, kebijakan, dan hak atas kekayaan intelektual turut mempengaruhi inovasi dan adopsi teknologi benih. Pemahaman ini penting agar pengembangan benih dapat memenuhi kebutuhan masyarakat secara adil dan berkelanjutan.

1.4.5 Hubungan Ilmu Hukum dan Kebijakan

Aspek hukum dan kebijakan memainkan peran penting dalam mengatur hak kekayaan intelektual, paten, dan regulasi terkait benih. Kebijakan yang mendukung inovasi dan perlindungan hak petani serta produsen benih harus seimbang agar tidak menghambat akses dan keberlanjutan. Regulasi yang tepat juga memastikan bahwa benih yang dipasarkan memenuhi standar mutu dan keamanan, serta mencegah penyebaran benih palsu atau tidak terdaftar. Kolaborasi antara ilmu benih dan bidang hukum ini penting untuk menciptakan ekosistem inovasi yang sehat dan berkeadilan.

1.4.6 Peran Teknologi Informasi dan Komunikasi

Perkembangan teknologi informasi dan komunikasi (TIK) telah membuka peluang besar dalam pengelolaan data dan penyebaran informasi terkait benih. Sistem basis data genetik, platform digital untuk distribusi benih, serta aplikasi berbasis mobile memungkinkan petani dan pemulia untuk mengakses informasi secara cepat dan akurat. Integrasi data genomik, hasil uji

lapang, dan informasi pasar mendukung pengambilan keputusan yang lebih baik dalam pengelolaan benih. Dengan demikian, ilmu benih semakin terintegrasi dengan teknologi digital, mempercepat inovasi dan adopsi teknologi di lapangan.

1.4.7 Sinergi dengan Disiplin Ilmu Lain dalam Riset dan Pengembangan

Pengembangan benih modern saat ini sangat bergantung pada kolaborasi multidisiplin. Riset yang melibatkan bioteknologi, ilmu komputer, ekonomi, sosial, dan lingkungan menjadi kunci dalam menciptakan varietas yang tidak hanya unggul secara genetik tetapi juga sesuai dengan kebutuhan pasar dan keberlanjutan ekologis. Pendekatan ini memungkinkan terciptanya solusi inovatif yang mampu menjawab tantangan global, seperti perubahan iklim, ketahanan pangan, dan konservasi sumber daya alam.

Secara keseluruhan, hubungan antara ilmu benih dan disiplin ilmu lain merupakan fondasi penting dalam pengembangan teknologi dan praktik pertanian yang berkelanjutan. Kolaborasi ini memperkuat kapasitas ilmiah, mempercepat inovasi, dan memastikan bahwa manfaat teknologi benih dapat dirasakan secara luas oleh masyarakat dan lingkungan.

1.5 Tantangan dan Prospek Ilmu Benih di Era Modern

Dalam era globalisasi dan kemajuan teknologi yang pesat saat ini, ilmu benih menghadapi berbagai tantangan yang kompleks sekaligus menawarkan peluang besar untuk pengembangan di masa depan. Perkembangan teknologi, perubahan iklim, kebutuhan akan ketahanan pangan, serta dinamika pasar global menjadi faktor utama yang mempengaruhi arah dan keberlanjutan ilmu benih. Pada bagian ini, kita akan membahas secara mendalam tantangan utama yang dihadapi oleh ilmu benih di era modern serta prospek dan peluang yang dapat dioptimalkan untuk kemajuan bidang ini.

Tantangan dalam Pengembangan dan Pemanfaatan Benih di Era Modern

Salah satu tantangan utama yang dihadapi adalah meningkatnya kebutuhan akan benih berkualitas tinggi yang mampu beradaptasi dengan kondisi lingkungan yang semakin tidak menentu. Perubahan iklim global menyebabkan fluktuasi suhu, pola curah hujan, dan kejadian ekstrem seperti kekeringan dan banjir, yang secara langsung mempengaruhi pertumbuhan tanaman dan keberhasilan produksi benih. Oleh karena itu, pengembangan

benih yang tahan terhadap stres lingkungan menjadi prioritas utama. Menurut FAO (2020), inovasi dalam pemuliaan tanaman harus mampu menghasilkan varietas yang tidak hanya produktif tetapi juga tahan terhadap kondisi ekstrem, sehingga mendukung ketahanan pangan global.

Selain itu, tantangan lain adalah keberlanjutan sumber daya alam dan penggunaan teknologi yang ramah lingkungan. Penggunaan bahan kimia dan teknologi rekayasa genetika harus dilakukan secara bertanggung jawab agar tidak menimbulkan dampak negatif terhadap ekosistem dan kesehatan manusia. Pengembangan benih berbasis teknologi modern seperti bioteknologi dan genomik harus diimbangi dengan prinsip keberlanjutan dan etika, agar tidak menimbulkan ketergantungan yang berlebihan terhadap teknologi tertentu dan menjaga keanekaragaman hayati (Kumar et al., 2021).

Tantangan berikutnya adalah aspek ekonomi dan aksesibilitas. Di banyak negara berkembang, akses terhadap benih berkualitas masih terbatas karena faktor biaya, infrastruktur, dan pengetahuan. Ketimpangan ini dapat memperbesar kesenjangan dalam produksi pertanian dan ketahanan pangan. Oleh karena itu, pengembangan sistem distribusi dan penyuluhan yang efektif sangat diperlukan agar petani kecil dapat memperoleh benih yang sesuai dan berkualitas tinggi (FAO, 2020).

Selain aspek teknis dan ekonomi, tantangan lain yang tidak kalah penting adalah regulasi dan kebijakan. Regulasi yang ketat dan beragam di berbagai negara dapat memperlambat inovasi dan adopsi teknologi benih baru. Di sisi lain, regulasi yang tidak memadai dapat menimbulkan risiko terhadap keamanan hayati dan kesehatan manusia. Oleh karena itu, harmonisasi regulasi internasional dan penguatan kebijakan yang mendukung inovasi serta perlindungan hak kekayaan intelektual menjadi hal penting untuk mendorong kemajuan ilmu benih secara global (OECD, 2022).

Prospek dan Peluang Pengembangan Ilmu Benih di Masa Depan

Di tengah berbagai tantangan tersebut, prospek pengembangan ilmu benih di era modern sangat cerah jika didukung oleh inovasi dan kolaborasi lintas disiplin. Teknologi genomik dan bioteknologi, misalnya, membuka peluang besar untuk mempercepat pemuliaan tanaman dan menghasilkan varietas unggul yang tahan terhadap stres lingkungan, penyakit, dan hama. Pendekatan seperti editing gen menggunakan CRISPR-Cas9 telah menunjukkan potensi besar dalam mempercepat proses pemuliaan dan meningkatkan sifat-sifat unggul tanaman secara spesifik dan efisien (Jaganathan et al., 2020).

Selain itu, pemanfaatan big data dan kecerdasan buatan (AI) dalam pengelolaan data genetik dan fenotip tanaman memungkinkan identifikasi karakter unggul secara cepat dan akurat. Teknologi ini dapat mempercepat proses seleksi dan pengembangan varietas baru yang sesuai dengan kebutuhan pasar dan kondisi lingkungan tertentu. Penggunaan platform digital dan sistem informasi berbasis cloud juga memudahkan akses dan distribusi benih berkualitas kepada petani di seluruh dunia, termasuk di daerah terpencil (Li et al., 2021).

Pengembangan benih berbasis keberlanjutan dan konservasi keanekaragaman hayati juga menjadi peluang besar. Dengan memanfaatkan teknologi cryopreservation dan bank gen, kita dapat melestarikan varietas langka dan genetik yang memiliki potensi untuk dikembangkan kembali di masa depan. Pendekatan ini penting untuk menjaga keberagaman genetik tanaman, yang merupakan sumber utama untuk inovasi pemuliaan di masa mendatang (FAO, 2020).

Selain aspek teknologi, kolaborasi internasional dan kemitraan antara lembaga penelitian, industri, dan pemerintah menjadi kunci dalam mempercepat inovasi dan distribusi benih. Program-program pengembangan kapasitas dan transfer teknologi dapat membantu negara-negara berkembang untuk meningkatkan produksi dan kualitas benih, serta memperkuat ketahanan pangan nasional dan global (OECD, 2022).

Dalam konteks praktis, penerapan teknologi dan inovasi ini harus didukung oleh kebijakan yang kondusif, sistem regulasi yang adaptif, serta edukasi dan penyuluhan kepada petani. Penguatan kapasitas petani dalam mengelola dan memanfaatkan benih berkualitas akan menjadi faktor penentu keberhasilan implementasi inovasi di lapangan. Dengan demikian, masa depan ilmu benih sangat bergantung pada sinergi antara inovasi teknologi, kebijakan yang mendukung, dan partisipasi aktif dari seluruh pemangku kepentingan.

Secara keseluruhan, tantangan yang dihadapi oleh ilmu benih di era modern sangat kompleks dan multidimensi. Perubahan iklim, keberlanjutan sumber daya, aksesibilitas, serta regulasi menjadi faktor utama yang harus diatasi secara inovatif dan berkelanjutan. Di sisi lain, kemajuan teknologi seperti genomik, bioteknologi, big data, dan AI menawarkan peluang besar untuk mempercepat pengembangan varietas unggul yang tahan terhadap stres lingkungan dan mampu memenuhi kebutuhan pangan dunia. Keberhasilan dalam mengatasi tantangan ini akan sangat bergantung pada kolaborasi global, kebijakan yang mendukung, serta peningkatan kapasitas petani dan pemangku kepentingan lainnya. Dengan pendekatan yang holistik dan inovatif, ilmu

benih dapat menjadi kekuatan utama dalam mewujudkan ketahanan pangan dan keberlanjutan pertanian di masa depan.

Kesimpulan

Dalam bab ini, kita telah mempelajari berbagai aspek penting dari ilmu dan teknologi benih yang menjadi dasar keberhasilan dan keberlanjutan dalam produksi pertanian. Secara umum, benih adalah bahan utama yang digunakan petani untuk menanam tanaman dan merupakan faktor kunci yang menentukan hasil panen dan kualitas produksi. Pengertian ilmu benih mencakup pemahaman tentang karakteristik biologis, fisiologis, dan genetis benih, serta proses produksi, pengujian, dan penyimpanan yang harus dilakukan dengan standar tertentu agar benih yang digunakan benar-benar berkualitas tinggi.

Ruang lingkup ilmu benih sangat luas dan meliputi berbagai bidang, mulai dari teknik produksi benih unggul, pengujian dan sertifikasi, teknologi penyimpanan, hingga pengembangan benih yang tahan terhadap berbagai tantangan lingkungan. Aspek-aspek ini sangat penting karena kualitas benih akan langsung mempengaruhi keberhasilan penanaman, pertumbuhan tanaman, dan hasil akhir yang diperoleh petani. Oleh karena itu, penguasaan ilmu ini menjadi sangat vital untuk mendukung pertanian yang efisien, produktif, dan berkelanjutan.

Sejarah perkembangan teknologi benih menunjukkan perjalanan panjang dari masa awal manusia mulai menanam tanaman dari biji secara tidak sadar, hingga era modern yang didukung oleh inovasi ilmiah dan teknologi canggih. Pada masa awal, manusia hanya melakukan seleksi alami dan tradisional, tetapi seiring waktu, muncul teknik-teknik pemuliaan yang lebih sistematis, termasuk penggunaan mesin, genetika, dan bioteknologi. Revolusi industri dan penemuan dasar-dasar genetika oleh Gregor Mendel membuka jalan bagi pengembangan varietas tanaman hibrida dan benih unggul yang mampu meningkatkan hasil secara signifikan. Di era modern, teknologi seperti rekayasa genetika, marker-assisted selection, dan digitalisasi telah mempercepat proses pengembangan benih yang lebih tahan terhadap stres lingkungan dan hama.

Ilmu benih tidak berdiri sendiri, tetapi sangat erat kaitannya dan bersinergi dengan berbagai disiplin ilmu lain. Hubungan ini memperkuat pengembangan teknologi dan inovasi dalam bidang pertanian. Misalnya, ilmu genetika dan biologi membantu memahami struktur dan pewarisan sifat tanaman, sedangkan ilmu kimia mendukung proses pengawetan dan

perlakuan benih agar tetap berkualitas. Ilmu agronomi dan ekologi membantu menyesuaikan varietas benih dengan kondisi lingkungan setempat, sehingga hasilnya lebih optimal dan berkelanjutan. Di sisi lain, ilmu ekonomi dan sosial berperan dalam memastikan akses petani terhadap benih berkualitas dan mendukung distribusi yang adil. Aspek hukum dan kebijakan juga penting untuk melindungi hak kekayaan intelektual dan mengatur regulasi yang mendukung inovasi serta keamanan benih yang beredar di pasar. Teknologi informasi dan komunikasi semakin memperkuat kolaborasi ini dengan memudahkan akses data, distribusi benih, dan pengambilan keputusan berbasis data.

Di masa depan, ilmu benih menghadapi berbagai tantangan besar, seperti perubahan iklim yang menyebabkan kondisi lingkungan menjadi semakin ekstrem, kebutuhan akan benih yang tahan terhadap stres lingkungan, serta perlindungan sumber daya genetik tanaman yang semakin terancam. Selain itu, keberlanjutan sumber daya alam dan penggunaan teknologi yang ramah lingkungan menjadi perhatian utama. Tantangan ini harus diatasi dengan inovasi dan kolaborasi lintas disiplin, termasuk pemanfaatan teknologi terbaru seperti CRISPR, bioteknologi, big data, dan kecerdasan buatan. Teknologi ini menawarkan peluang besar untuk mempercepat pemuliaan tanaman dan menghasilkan varietas yang lebih unggul, tahan terhadap berbagai tantangan, dan sesuai dengan kebutuhan pasar serta kondisi lingkungan.

Selain itu, pengembangan sistem distribusi dan akses yang lebih baik, serta kebijakan yang mendukung inovasi dan perlindungan hak petani dan pemulia, akan sangat menentukan keberhasilan pengembangan ilmu benih di masa depan. Melalui kolaborasi global dan peningkatan kapasitas petani, diharapkan teknologi dan inovasi ini dapat diakses secara luas dan merata, sehingga manfaatnya dapat dirasakan oleh seluruh masyarakat, terutama petani kecil dan masyarakat yang tinggal di daerah terpencil.

Secara keseluruhan, perkembangan ilmu dan teknologi benih menunjukkan bahwa bidang ini sangat dinamis dan penuh peluang. Dengan inovasi yang terus berkembang dan dukungan kebijakan yang tepat, ilmu benih dapat menjadi kekuatan utama dalam meningkatkan ketahanan pangan, memperkuat keberlanjutan pertanian, dan menjaga keberagaman hayati tanaman. Keberhasilan dalam mengatasi tantangan tersebut akan sangat bergantung pada sinergi antara ilmuwan, petani, pemerintah, dan seluruh pemangku kepentingan lainnya. Dengan pendekatan yang holistik dan berkelanjutan, masa depan ilmu benih menjanjikan peran yang semakin

penting dalam mewujudkan pertanian yang produktif, berkelanjutan, dan mampu memenuhi kebutuhan pangan dunia yang terus meningkat.

DAFTAR PUSTAKA

- Duvick, D. N., & Cassman, K. G. (2020). Genetic improvements in crop productivity. *Nature*, 578(7794), 229–236.
- FAO. (2014). *The State of the World's Plant Genetic Resources for Food and Agriculture*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2020). *The State of Food and Agriculture 2020: Overcoming water challenges in agriculture*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- International Seed Testing Association (ISTA). (2018). *ISTA Rules for Seed Testing*.
- International Seed Federation (ISF). (2020). *Global Seed Sector Overview*.
- Khan, M. A., Ahmad, M., & Iqbal, M. (2019). Seed vigor and viability: A review. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 21(2), 345–359.
- Kumar, S., Singh, R., & Yadav, S. (2021). Advances in biotechnology for crop improvement. *Plant Biotechnology Journal*, 19(3), 439–453.
- Singh, R., Kumar, S., & Yadav, S. (2019). Impact of quality seed on crop productivity. *Journal of Agricultural Science*, 11(2), 123–132.

BAB 2

STRUKTUR DAN PERKEMBANGAN BENIH

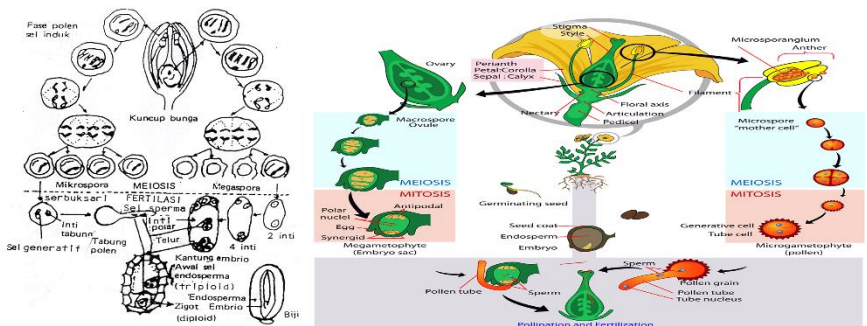
Oleh: Enny Adelina

2.1 Anatomi dan Morfologi Benih

Benih merupakan struktur reproduktif kompleks yang terdiri dari tiga komponen utama: kulit benih (testa), jaringan cadangan makanan, dan embrio (Copeland & McDonald, 2001; Bewley et al., 2013). Ketiga komponen ini bekerja secara terintegrasi untuk memastikan keberhasilan perkecambahan dan pertumbuhan awal kecambah.

Struktur Dasar Benih

Kulit benih atau testa berkembang dari integumen ovulum dan berfungsi sebagai pelindung terluar benih (Esau, 1991; Werker, 1997). Struktur ini melindungi embrio dan jaringan cadangan dari kerusakan mekanis, serangan patogen, dan kondisi lingkungan yang tidak menguntungkan. Selain itu, testa berperan dalam mengatur pertukaran air dan gas serta terlibat dalam mekanisme dormansi (Debeaujon et al., 2000).



Gambar 1. Perkembangan Struktur Reproduksi pada Tumbuhan Angiospermae

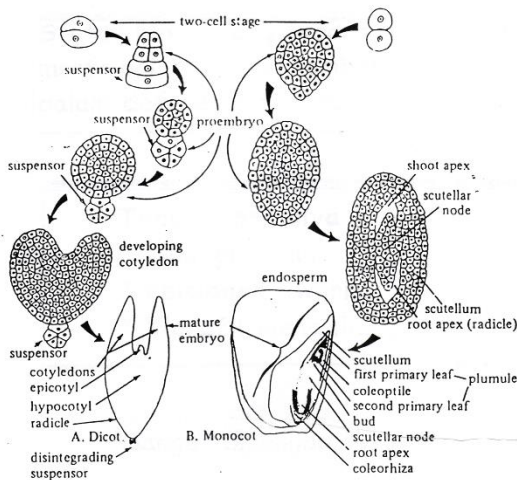
Pada Angiospermae, terdapat dua jenis jaringan penyimpan utama yang berfungsi sebagai cadangan (Olsen, 2004; Berger et al., 2006). Endosperma merupakan jaringan triploid ($3n$) hasil pembuahan ganda yang menyimpan cadangan makanan berupa karbohidrat, protein, dan lipid. Kotiledon adalah

daun lembaga yang dapat berfungsi sebagai organ penyimpan pada dikotil atau sebagai organ penyerap nutrisi dari endosperma pada monokotil.

Embrio merupakan struktur paling vital dalam benih yang berkembang dari zigot hasil pembuahan (Goldberg et al., 1994; Harada et al., 2010). Embrio matang terdiri dari radikula sebagai calon akar, plumula sebagai calon pucuk, hipokotil dan epikotil sebagai bagian batang, serta kotiledon yang berjumlah satu pada monokotil dan dua pada dikotil.

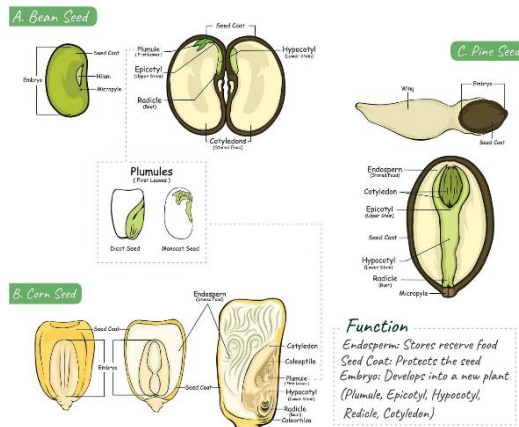
Perbedaan Morfologi Benih Monokotil dan Dikotil

Benih monokotil dan dikotil menunjukkan perbedaan morfologi yang mendasar (Fenner & Thompson, 2005; Black et al., 2006). Benih monokotil memiliki satu kotiledon yang termodifikasi disebut skutelum, embrio berukuran kecil yang terletak lateral, serta endosperma dominan sebagai sumber cadangan makanan. Struktur khususnya adalah koleoptil sebagai pelindung plumula dan koleorhiza sebagai pelindung radikula.



Gambar 2. Perkembangan Embrio pada Tumbuhan Dikotil dan Monokotil

Sebaliknya, benih dikotil memiliki dua kotiledon yang simetris dan embrio yang umumnya berukuran lebih besar. Pada dikotil, endosperma dapat dominan, tereduksi, atau tidak ada tergantung spesiesnya (Weber et al., 2005). Benih dikotil tidak memiliki struktur pelindung khusus seperti koleoptil dan koleorhiza.



Gambar 3. Perbedaan biji Dikotil dan Monokotil

Klasifikasi Benih Berdasarkan Toleransi Pengeringan

Berdasarkan kemampuan bertahan terhadap pengeringan, benih diklasifikasikan menjadi tiga kategori utama (Walters, 2015):

Benih ortodoks memiliki kemampuan bertahan pada kadar air sangat rendah hingga 5-7% dan dapat disimpan dalam waktu lama pada suhu rendah. Benih ini memiliki kulit benih tebal dan impermeabel serta mengandung protein pelindung seperti LEA proteins dan gula non-reduktif (Hoekstra et al., 2001). Contoh: padi, jagung, kedelai, dan tomat.

Benih rekalsitran tidak tahan terhadap kadar air rendah dan kehilangan viabilitas jika dikeringkan hingga kadar air di bawah 20-30% (Berjak and Pammenter, 2013). Karakteristiknya adalah kulit benih tipis dan permeabel serta embrio yang sering dalam keadaan metabolisme aktif. Contoh: kakao, mangrove, dan durian.

Benih intermediet menunjukkan karakteristik antara ortodoks dan rekalsitran. Dapat mentolerir pengeringan hingga kadar air moderat 10-12% namun tidak dapat disimpan jangka panjang (Farrant et al., 1988). Contoh: kopi dan kelapa sawit.

Tabel 1. Karakteristik Benih Ortodoks, Intermediet, dan Rekalsitran

Karakteristik	Ortodoks	Intermediet	Rekalsitrans
Kadar air kritis	5 – 7 %	10 – 12 %	20 – 30 %
Daya simpan	Panjang	Sedang	Pendek
Kulit benih	Tebal, impermeabel	Sedang	Tipis, permeabel
Contoh	Padi, kedelai	Kopi, kelapa sawit	Kakao, durian

Tabel 2. Perbandingan Karakteristik Anatomi Benih Ortodoks dan Rekalsitran

Karakteristik	Benih Ortodoks	Benih Rekalsitran	Benih Intermediet
Kulit Benih	Tebal, keras, sering impermeabel	Tipis, permeabel	Ketebalan sedang, semi-permeabel
Jaringan Penyimpan	Dinding sel tebal, vakuola kecil	Dinding sel tipis, vakuola besar	Karakteristik menengah
Sistem Vaskular	Tereduksi	Berkembang baik	Moderat
Embrio	Metabolisme rendah, dorman	Metabolisme aktif, sering pra-germinatif	Metabolisme moderat
Ultrastruktur Sel	Organel terpaket rapat	Organel tersebar dalam sitoplasma berair	Kondisi menengah
Contoh Tanaman	Padi, jagung, kedelai, tomat	Kakao, mangrove, kelapa, durian	Kopi, kelapa sawit

Variasi Ukuran dan Bentuk Benih

Benih menunjukkan keragaman morfologi yang luar biasa sebagai hasil adaptasi evolusioner (Marshall, 1986; Moles et al., 2005). Ukuran benih berkisar dari sangat kecil (anggrek: 0,1-0,2 mm) hingga sangat besar (kelapa: 30-45 cm). Ukuran berkorelasi dengan strategi ekologi: benih kecil diproduksi dalam jumlah besar dengan kemampuan penyebaran baik, sementara benih besar mengandung lebih banyak cadangan makanan untuk pertumbuhan dalam kondisi kurang menguntungkan (Wulff, 1986).

Bentuk benih bervariasi sesuai mekanisme penyebaran: benih bersayap untuk penyebaran angin, benih berduri atau berkait untuk penyebaran hewan, dan benih berlendir untuk penyebaran air (Fenner and Thompson, 2005).

Hubungan Struktur Anatomi dengan Viabilitas dan Vigor

Integritas struktural setiap komponen benih berkontribusi terhadap viabilitas dan vigor (Tekrony & Egli, 1997; Finch-Savage & Bassel, 2015). Parameter struktural yang berkaitan dengan kualitas benih meliputi integritas kulit benih, kelengkapan struktur embrio, ukuran dan kondisi jaringan cadangan, serta keutuhan sistem vaskular internal (AOSA, 1985).

Metode Pengamatan Struktur Benih

Identifikasi dan analisis struktur benih dapat dilakukan melalui berbagai metode (Dell'Aquila, 2007; Ilyas, 2012). Pengamatan makroskopis menggunakan mata telanjang atau lup dengan perbesaran 10-40x untuk mengamati morfologi eksternal. Pengamatan mikroskopis menggunakan mikroskop cahaya untuk struktur internal jaringan, sedangkan mikroskop elektron untuk visualisasi ultrastruktur sel.

Perkembangan teknologi modern memungkinkan penerapan teknik non-destruktif yang bermanfaat dalam analisis tanpa merusak sampel. Radiografi sinar-X memungkinkan pengamatan struktur internal benih secara utuh (Bino et al., 1993; Gomes-Junior et al., 2012), analisis spektroskopi untuk menentukan komposisi kimia, dan tomografi untuk rekonstruksi tiga dimensi struktur internal dengan resolusi tinggi.

2.2 Proses Pembentukan Benih

Proses pembentukan benih merupakan rangkaian peristiwa biologis kompleks yang dimulai dari pembuahan hingga terbentuknya benih matang yang siap dipanen (Copeland & McDonald, 2001; Bewley et al., 2013;). Pemahaman proses ini sangat penting untuk mengoptimalkan produksi benih berkualitas tinggi.

Tahapan Perkembangan Benih

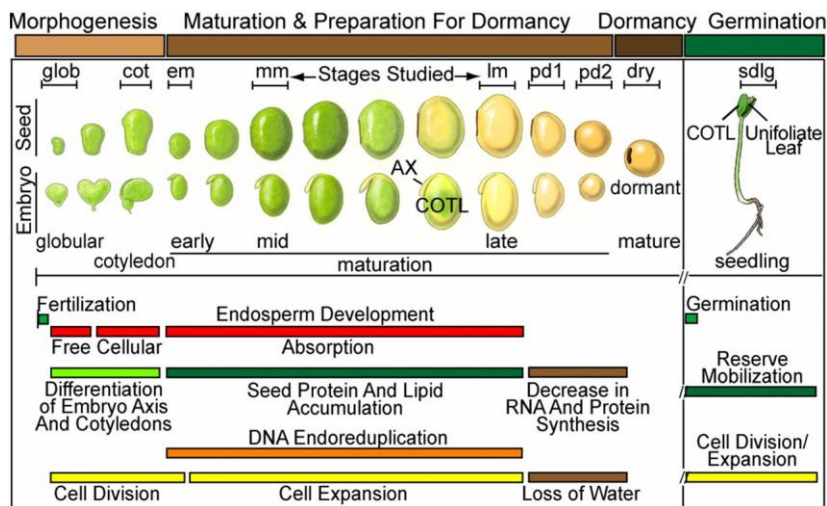
Perkembangan benih dapat dibagi menjadi beberapa fase utama yang berlangsung secara berurutan dengan karakteristik yang berbeda (Goldberg et al., 1994; Raghavan, 2006):

Fase Pembuahan dan Inisiasi (1-3 hari): Pada Angiospermae, terjadi pembuahan ganda dimana satu inti sperma menyatu dengan sel telur membentuk zigot diploid ($2n$), sementara inti sperma lainnya bergabung dengan dua inti polar membentuk endosperma triploid ($3n$) (Berger et al., 2006).

Fase Histodiferensiasi (7-21 hari): Periode pembelahan sel intensif dan diferensiasi jaringan. Embrio berkembang melalui tahapan proembrionik, globular, hati (dikotil) atau transisi (monokotil), hingga torpedo (Jürgens, 2001). Bersamaan dengan itu, endosperma mengalami diferensiasi membentuk jaringan penyimpanan nutrisi.

Fase Akumulasi Cadangan Makanan (21-42 hari): Periode pertumbuhan cepat dimana benih mengalami peningkatan ukuran dan berat kering akibat sintesis dan penimbunan cadangan makanan berupa karbohidrat, protein, dan lipid (Baud et al., 2008). Kadar air benih masih tinggi (50-70%) untuk mendukung aktivitas metabolisme.

Fase Desikasi dan Maturasi (42-56 hari): Terjadi penurunan kadar air signifikan (hingga 10-20%) disertai penurunan aktivitas metabolisme. Benih mensintesis protein pelindung dan gula non-reduktif sebagai persiapan menghadapi kondisi kering dan dormansi (Hoekstra et al., 2001; Hand et al., 2011).



Gambar 4. Tahapan Perkembangan Benih

Tabel 3. Karakteristik Utama Tahapan Perkembangan Benih

Tahap Perkembangan	Durasi (relatif)	Kadar Air (%)	Aktivitas Metabolik	Perubahan Morfologis Utama	Peristiwa Biokimia Penting
Pembuahan	1-2 hari	80-90	Sangat tinggi	Pembentukan zigot dan endosperma awal	Aktivasi genom, inisiasi pembelahan sel
Histodiferensiasi	7-14 hari	70-80	Tinggi	Pembentukan embrio globular hingga torpedo, diferensiasi jaringan endosperma	Ekspresi gen terkait diferensiasi jaringan, pembentukan meristem
Akumulasi Cadangan Makanan	14-28 hari	50-70	Tinggi	Pembesaran benih, ekspansi jaringan penyimpanan	Sintesis dan akumulasi pati, protein, dan lipid cadangan
Desikasi	7-14 hari	15-5	Menurun drastis	Penyusutan ukuran, perubahan warna kulit benih	Sintesis protein LEA dan HSP, akumulasi gula non-reduksi, penurunan aktivitas enzim
Benih Matang	-	5-15	Sangat rendah	Benih dengan ukuran dan warna final	Stabilisasi membran, pembentukan struktur glassy state

Dinamika Pertumbuhan Benih

Pertumbuhan benih menunjukkan pola sigmoid yang terdiri dari tiga fase dengan karakteristik berbeda (Egli, 2017). Fase lambat awal ditandai pertumbuhan relatif lambat karena dominasi pembelahan sel tanpa peningkatan ukuran signifikan. Fase cepat atau eksponensial mengalami pertumbuhan sangat cepat akibat pembesaran sel dan akumulasi cadangan makanan masif, dimana berat kering benih meningkat drastis sementara kadar air mulai menurun (Borisjuk et al., 2002). Fase lambat akhir menunjukkan pertumbuhan yang melambat menjelang maturitas fisiologis dengan dominasi proses desikasi dan stabilisasi struktur benih.

Perbedaan Pola Perkembangan pada Kelompok Tanaman

Kelompok tanaman berbeda menunjukkan pola perkembangan benih yang khas sesuai strategi penyimpanan cadangan makanannya. Tanaman sereal memiliki endosperma dominan sebagai tempat penyimpanan dengan embrio kecil lateral, fase pengisian 20-30 hari dengan akumulasi pati 70-75% dari berat kering (Sreenivasulu et al., 2008). Tanaman leguminosa menunjukkan kotiledon dominan sebagai organ penyimpan dengan endosperma yang diserap selama perkembangan, fase pengisian 35-50 hari dengan akumulasi protein 35-40% berat kering (Shewry et al., 1995). Tanaman penghasil minyak memiliki kotiledon sebagai tempat utama penyimpanan lipid dengan fase pengisian 25-40 hari dan akumulasi lipid 40-50% berat kering yang memberikan densitas energi tinggi per unit berat (Graham, 2008).

Faktor yang Mempengaruhi Pembentukan Benih

Pembentukan benih berkualitas dipengaruhi oleh interaksi kompleks antara faktor internal dan eksternal. Faktor internal mencakup keseimbangan hormon (auksin, sitokinin, giberelin, dan ABA), kapasitas fotosintesis dan efisiensi translokasi asimilat dari tanaman induk, aktivitas enzim biosintesis cadangan makanan, serta program genetik yang mengatur timing dan koordinasi proses perkembangan (Davies, 2007; Santos-Mendoza et al., 2008).

Faktor eksternal meliputi suhu optimal 22-30 °C untuk aktivitas enzim dan metabolisme, ketersediaan air untuk transportasi nutrisi, intensitas cahaya 600-1200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ untuk fotosintesis optimal, serta keseimbangan hara makro dan mikro untuk biosintesis komponen benih (Wahid et al., 2007; Ashraf & Harris, 2013).

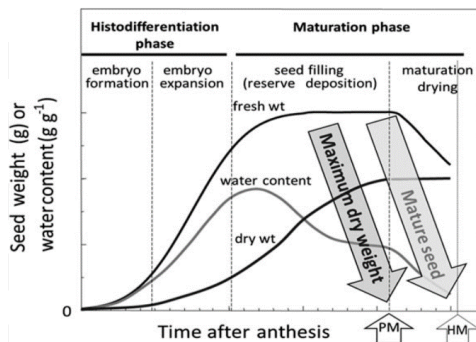
Indikator Kematangan Benih

Penentuan waktu panen optimal memerlukan pemahaman berbagai indikator kematangan yang dapat diamati dan diukur. Indikator morfologis

meliputi perubahan warna kulit benih atau buah, pengerasan dan pengeringan struktur pelindung, serta mudah lepasnya benih dari tanaman induk. Indikator fisiologis mencakup pencapaian berat kering maksimum, kadar air optimal 10-25%, viabilitas dan vigor maksimum, serta penurunan aktivitas respirasi (TeKrony & Egli, 1991). Indikator biokimia meliputi stabilisasi komposisi cadangan makanan, akumulasi maksimal protein protektif, dan penurunan kadar ABA yang mengindikasikan berakhirnya fase dormansi primer.

Konsekuensi Waktu Panen Terhadap Kualitas

Waktu panen memiliki dampak signifikan terhadap kualitas benih. Panen terlalu dini menghasilkan benih dengan viabilitas rendah 60-75%, vigor lemah, daya simpan pendek, dan komposisi cadangan makanan tidak optimal. Panen optimal menghasilkan viabilitas tinggi 85-95%, vigor maksimal, daya simpan panjang, dan komposisi biokimia optimal dengan ketahanan stres yang baik (Copeland & McDonald, 2001). Panen terlambat menyebabkan penurunan viabilitas menjadi 70-85%, risiko kerusakan cuaca, dan peningkatan serangan hama penyakit yang dapat menurunkan kualitas secara drastis.



Gambar 5. Kurva Dinamika Pertumbuhan Benih

2.3 Perkembangan Embrio dan Jaringan Cadangan

Perkembangan embrio dan pembentukan jaringan cadangan merupakan proses kunci yang menentukan kualitas dan potensi benih (Goldberg et al., 1994; Harada et al., 2010). Kedua proses ini berlangsung secara bersamaan dan saling mempengaruhi untuk menghasilkan benih yang viabel dan bervigor tinggi.

Embriogenesis

Embriogenesis adalah proses perkembangan embrio dari zigot hasil pembuahan hingga terbentuk embrio matang dengan struktur lengkap (Laux

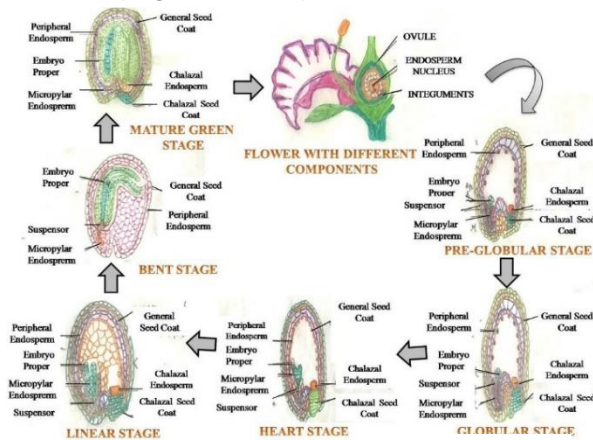
et al., 1996). Proses ini terdiri dari beberapa tahapan yang terdefinisi dengan baik:

Tahap Proembrionik (2-8 sel): Zigot mengalami pembelahan asimetris menghasilkan sel apikal (terminal) yang kecil dan sel basal yang lebih besar. Sel apikal berkembang menjadi embrio proper, sedangkan sel basal membentuk suspensor yang berfungsi sebagai jembatan nutrisi dan penghasil hormon (Dodeman, 1997).

Tahap Globular (32-64 sel): Embrio berbentuk bulat dengan diferensiasi jaringan dasar yang mulai terlihat, meliputi protoderm (calon epidermis), ground meristem (calon korteks dan empulur), dan prokambium (calon jaringan vaskular) (Laux, 2004).

Tahap Hati dan Torpedo (Dikotil): Tahap hati ditandai terbentuknya dua primordia kotiledon dan meristem apikal pucuk di antara keduanya (Long et al., 1996). Tahap torpedo menunjukkan elongasi embrio dengan diferensiasi jaringan yang semakin jelas, termasuk pembentukan meristem apikal akar.

Tahap Transisi (Monokotil): Terbentuk skutelum (kotiledon tunggal) yang asimetris, koleoptil untuk melindungi plumula, dan koleorhiza untuk melindungi radikula (Raghavan, 2006).



Gambar 6. Tahapan Perkembangan Embrio dan Jaringan Cadangan

Pembentukan dan Diferensiasi Jaringan Meristematik

Jaringan meristematik merupakan pusat pertumbuhan tanaman yang terbentuk selama embriogenesis dan berperan vital dalam menentukan

arsitektur tanaman dewasa. Meristem apikal pucuk (SAM) terletak di antara kotiledon pada dikotil atau lateral terhadap skutelum pada monokotil, terdiri dari zona sel induk pusat, zona perifer yang menghasilkan primordia organ lateral, dan zona rib yang berkontribusi pada pertumbuhan batang (Long et al., 1996).

Meristem apikal akar (RAM) memiliki organisasi berbeda, terletak di ujung radikula dan tersusun dari pusat diam yang dikelilingi sel-sel inisial. Kedua jenis meristem memiliki karakteristik seluler khas berupa sel berukuran kecil dengan rasio nukleus terhadap sitoplasma tinggi, dinding sel tipis, dan kemampuan pembelahan yang sangat tinggi untuk mempertahankan aktivitas proliferasi sambil menghasilkan sel yang berdiferensiasi (Aida et al., 2004).

Akumulasi Cadangan Makanan

Akumulasi cadangan makanan merupakan proses kompleks yang terjadi selama fase pengisian benih dan sangat menentukan vigor dan viabilitas benih (Baud et al., 2008). Karbohidrat, terutama pati, menjadi komponen dominan pada endosperma sereal dan disintesis melalui jalur yang melibatkan enzim ADP-glukosa pirofosforilase. Protein cadangan disintesis di retikulum endoplasma dan disimpan dalam protein bodies, dengan jenis yang bervariasi antar kelompok tanaman: albumin dan globulin dominan pada dikotil, prolamin dan glutelin pada monokotil (Shewry et al., 1995). Lipid cadangan memberikan kontribusi energi tertinggi per unit berat, disintesis melalui jalur Kennedy dan disimpan dalam oleosomes, dominan pada benih berlemak seperti bunga matahari dan kanola (Graham, 2008).

Peran Endosperma dan Perisperm

Endosperma sebagai jaringan triploid hasil pembuahan ganda berfungsi sebagai penyimpan utama cadangan makanan pada sereal, penghasil enzim hidrolitik saat perkecambahan, dan pengatur mekanis pertumbuhan embrio. Struktur endosperma sereal terdiri dari lapisan aleuron yang kaya protein dan enzim, endosperma tepung yang kaya pati, dan endosperma basal sebagai penghubung dengan embrio (Sabelli and Larkins, 2009).

Perisperm merupakan jaringan diploid yang berasal dari nuselus (jaringan maternal), ditemukan pada beberapa tanaman seperti bit gula, quinoa, dan lada hitam, berperan sebagai penyimpan cadangan makanan terutama karbohidrat (López-Fernández and Maldonado, 2013).

Mobilisasi Cadangan Makanan Saat Perkecambahan

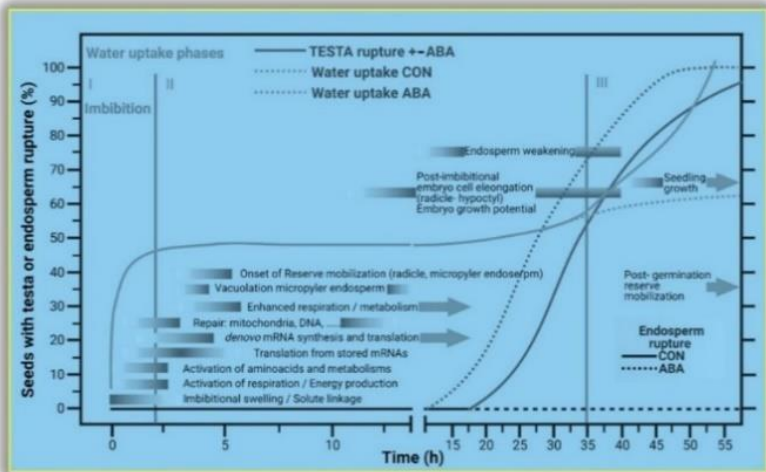
Mobilisasi cadangan makanan merupakan proses vital yang mengubah senyawa kompleks menjadi bentuk sederhana untuk mendukung pertumbuhan embrio (Nonogaki et al., 2010). Proses ini melibatkan aktivasi

enzim-enzim hidrolitik yang bekerja secara terkoordinasi untuk memecah berbagai komponen cadangan makanan yang tersimpan dalam benih.

Mobilisasi karbohidrat dimulai dengan aktivasi enzim α -amilase dan β -amilase yang bekerja sinergis menghidrolisis pati menjadi gula sederhana. Enzim invertase berperan dalam menguraikan sukrosa menjadi glukosa dan fruktosa. Proses ini dimulai dari area yang berdekatan dengan embrio dan secara bertahap menyebar ke seluruh endosperma, memastikan pasokan energi berkelanjutan selama tahap awal perkecambahan (Leubner-Metzger, 2003).

Protein cadangan dalam protein bodies mengalami hidrolisis melalui aktivitas enzim protease, menghasilkan asam amino sebagai bahan baku sintesis protein baru yang diperlukan dalam proses metabolisme dan pembentukan struktur sel embrio. Mobilisasi protein menyediakan nitrogen organik yang esensial bagi pertumbuhan awal kecambah (Müntz et al., 2001).

Mobilisasi lipid merupakan proses paling kompleks dimana enzim lipase menguraikan triasilgliserol dalam oleosomes menjadi asam lemak dan gliserol. Asam lemak kemudian dikonversi menjadi sukrosa melalui siklus glioksilat dalam glioksisom. Proses ini memungkinkan benih mengubah cadangan lemak menjadi karbohidrat yang mudah ditransportasikan dan dimanfaatkan oleh jaringan yang sedang tumbuh (Penfield et al., 2004).



Gambar 7. Proses Mobilisasi Cadangan Makanan Selama Perkecambahan

Faktor yang Mempengaruhi Perkembangan Embrio

Perkembangan embrio dipengaruhi oleh berbagai faktor yang saling berinteraksi. Faktor genetik meliputi gen pengatur embriogenesis seperti *WUSCHEL* dan *SHOOT MERISTEMLESS* yang menentukan pola dasar pembentukan embrio, gen pengatur akumulasi cadangan seperti *LEAFY COTYLEDON* dan *FUSCA3* yang mengontrol sintesis dan penyimpanan cadangan, serta faktor transkripsi spesifik yang diaktivasi sesuai tahap perkembangan (Laux et al., 1996; Harada, 1997).

Faktor hormonal mencakup auksin dan sitokinin yang mengatur pembelahan sel dan diferensiasi jaringan embrio, giberelin yang berperan dalam mobilisasi cadangan makanan, dan ABA yang menginduksi sintesis protein cadangan dan mengatur dormansi benih (Davies, 2007; Finkelstein et al., 2008). Faktor lingkungan meliputi suhu optimal untuk aktivitas enzim, ketersediaan nutrisi dari tanaman induk, dan kondisi air yang memadai untuk transportasi nutrisi dan proses biokimia selama perkembangan embrio.

Abnormalitas Perkembangan Embrio

Abnormalitas perkembangan embrio merupakan masalah serius dalam produksi benih yang disebabkan oleh faktor genetik maupun lingkungan (Meinke, 2019). Jenis abnormalitas meliputi embrio rudimenter yang tidak berkembang sempurna, kotiledon asimetris akibat distribusi nutrisi tidak merata atau gangguan hormonal, kegagalan diferensiasi dimana struktur meristem tidak terbentuk baik, dan embrio prematur akibat panen terlalu dini sebelum mencapai kematangan fisiologis.

Dampak abnormalitas terhadap viabilitas sangat signifikan, dapat menyebabkan penurunan daya kecambah 30-70% tergantung tingkat keparahan, menghasilkan kecambah abnormal atau lemah dengan pertumbuhan terhambat, meningkatkan kerentanan terhadap serangan patogen, serta menurunkan daya simpan karena proses metabolisme yang tidak stabil (Finch-Savage and Bassel, 2015).

2.4 Fisiologi Pembentukan Benih Viabel

Pembentukan benih viabel merupakan proses fisiologis kompleks yang melibatkan serangkaian perubahan biokimia dan molekuler selama fase pematangan benih (Angelovici et al., 2010; Bewley et al., 2013). Proses ini menentukan kemampuan benih untuk berkecambah normal dan menghasilkan tanaman yang sehat. Viabilitas benih tidak hanya bergantung pada keberhasilan fertilisasi dan perkembangan embrio, tetapi juga pada

serangkaian proses fisiologis yang mempersiapkan benih untuk kondisi dorman dan kemampuan berkecambah di masa mendatang.

Proses Pematangan Benih

Pematangan benih adalah fase transisi dari pertumbuhan aktif menuju kondisi metabolisme rendah yang stabil (Kermode, 2017). Proses ini melibatkan beberapa perubahan fisiologis utama yang bersifat terkoordinasi dan bertahap.

Sintesis Protein Cadangan: Selama pematangan, terjadi pergeseran dramatis dari sintesis protein struktural ke sintesis protein cadangan seperti albumin, globulin, prolamin, dan glutelin (Shewry et al., 1995; Krishnan, 2005). Protein cadangan ini berperan vital sebagai sumber nitrogen dan energi yang akan dimobilisasi saat perkecambahan. Proses sintesis ini diregulasi secara ketat oleh hormon ABA dan kompleks faktor transkripsi spesifik seperti ABI3, FUS3, dan LEC1 yang bekerja koordinatif untuk memastikan akumulasi protein cadangan optimal (Santos-Mendoza et al., 2008).

Akumulasi Metabolit Protektif: Benih mengalami akumulasi berbagai senyawa pelindung yang berperan penting dalam mempertahankan viabilitas selama periode dormansi dan penyimpanan (Crowe, 1992; Angelovici et al., 2010). Oligosakarida seperti rafinosa, stakhiosa, dan verbaskosa berfungsi sebagai osmoprotektan yang melindungi membran sel dan protein dari kerusakan akibat dehidrasi. Sistem antioksidan yang terdiri dari tokoferol, askorbat, dan berbagai senyawa flavonoid berperan melindungi komponen seluler dari kerusakan oksidatif selama penyimpanan jangka panjang. Benih juga mengakumulasi senyawa antimikroba sebagai sistem pertahanan alami untuk mencegah infeksi patogen selama fase dorman dan tahap awal perkecambahan.

Perubahan Aktivitas Metabolisme: Karakteristik utama dari proses pematangan adalah penurunan drastis aktivitas metabolisme. Laju respirasi mengalami penurunan eksponensial dari 15-20 $\mu\text{L O}_2/\text{g/jam}$ pada fase awal pematangan menjadi hanya 1-3 $\mu\text{L O}_2/\text{g/jam}$ ketika benih mencapai kematangan penuh (Fait et al., 2006). Perubahan ini mencerminkan transisi metabolisme dari kondisi aktif ke kondisi quiescent yang memungkinkan benih bertahan dalam jangka waktu lama. Secara bersamaan, aktivitas enzim anabolik mengalami penurunan sementara aktivitas enzim sistem antioksidan meningkat sebagai persiapan menghadapi potensi stres oksidatif (Bailly, 2019).

Pembentukan Toleransi Pengeringan

Toleransi pengeringan adalah kemampuan adaptif yang memungkinkan benih bertahan pada kadar air sangat rendah tanpa kehilangan viabilitas (Hoekstra et al., 2001; Buitink & Leprince, 2004). Mekanisme molekuler melibatkan LEA (*Late Embryogenesis Abundant*) proteins yang berfungsi sebagai molecular chaperones untuk mencegah agregasi protein dan stabilisasi makromolekul selama dehidrasi (Battaglia et al., 2008). Oligosakarida non-reduktif seperti rafinosa, stakhiosa, dan trehalosa berperan sebagai osmoprotektan dan stabilizer membran, sementara sistem antioksidan melindungi sel dari kerusakan oksidatif.

Pada kadar air rendah, sitoplasma mengalami transisi menjadi fase glass-like (vitrifikasi) yang memperlambat reaksi biokimia dan mencegah kerusakan struktural. Proses ini difasilitasi oleh akumulasi sukrosa dalam konsentrasi tinggi (Murthy et al., 2003).

Dinamika Kadar Air dan Aktivitas Metabolisme

Penurunan kadar air merupakan perubahan fisiologis mencolok selama pematangan benih, dimana kadar air menurun bertahap dari 85-90% pada awal embriogenesis hingga 10-20% pada kematangan fisiologis (Bewley et al., 2013). Proses ini terjadi dalam dua fase: fase cepat bersamaan dengan penyelesaian sintesis biomassa, dan fase lambat yang berkorelasi dengan akumulasi senyawa protektif dan stabilisasi struktur seluler (Leprince et al., 2016).

Perubahan kadar air diikuti transformasi metabolisme fundamental dalam sel-sel benih. Aktivitas DNA dan RNA polymerase mengalami penurunan progresif yang menandakan berkurangnya aktivitas transkripsi dan replikasi. Terjadi transisi dari metabolisme pertumbuhan menuju metabolisme pemeliharaan, aktivasi jalur biosintesis senyawa protektif, dan reorganisasi sistem endomembran sebagai adaptasi terhadap kondisi dehidrasi (Dekkers et al., 2015; Kermode, 2017).

Regulasi Hormonal

Keseimbangan hormon memainkan peran sentral dalam mengatur transisi dari fase pertumbuhan ke fase dormansi selama pematangan benih. ABA berfungsi sebagai hormon master regulator yang mengkoordinasikan berbagai aspek proses maturasi, menginduksi sintesis protein cadangan dan LEA proteins, serta mengaktifasi faktor transkripsi kunci. Konsentrasi ABA meningkat dramatis dari 50-100 ng/g pada fase awal menjadi 800-1500 ng/g saat kematangan penuh (Rodríguez-Gacio et al., 2009).

Giberelin menunjukkan pola berlawanan dengan ABA, dengan konsentrasi tinggi pada embriogenesis awal yang menurun progresif saat memasuki fase pematangan. Rasio ABA terhadap GA yang tinggi menjadi esensial untuk mempertahankan kondisi dormansi dan mencegah perkecambahan prematur (Yamaguchi, 2008). Sitokinin dan etilen berperan sebagai hormon modulatori yang mengatur diferensiasi jaringan, timing senescence struktur maternal, dan koordinasi timing pelepasan benih dari tanaman induk (Davies, 2007).

Pembentukan Dormansi

Dormansi adalah program adaptif yang mencegah perkecambahan pada kondisi lingkungan tidak menguntungkan dan memastikan benih berkecambah pada waktu dan tempat tepat (Baskin & Baskin, 2014). Berdasarkan mekanisme yang mendasarinya, dormansi diklasifikasikan menjadi dormansi fisiologis (dimediasi ketidakseimbangan hormon), dormansi morfologis (embrio belum berkembang sempurna), dan dormansi fisik (impermeabilitas kulit benih).

Pembentukan dormansi melibatkan mekanisme molekuler kompleks termasuk ekspresi gen DOG1 yang mengatur kedalaman dan durasi dormansi, modifikasi kromatin melalui histone methylation, akumulasi inhibitor perkecambahan dalam kulit benih, dan deposisi senyawa struktural seperti lignin, suberin, dan cutin yang memberikan impermeabilitas fisik dan kimiawi (Debeaujon et al., 2000; Nakabayashi et al., 2012).

Tabel 4. Teknik Pematahan Dormansi

Tipe Dormansi	Karakteristik	Contoh Spesies	Metode Pematahan Dormansi	
			alami	buatan
Immature embryo	benih secara fisiologis belum mampu berkecambah, karena embrio belum masak walaupun biji sudah masak	<i>Fraxinus excelsior</i> , <i>Ginkgo biloba</i> , <i>Gnetum gnemon</i>	pematangan secara alami	melanjutkan proses fisiologis pemasakan embrio setelah biji mencapai masa lewat masak (after ripening)
Dormansi mekanis	Perkembangan embrio secara fisik terhambat karena adanya kulit biji/buah yang keras	<i>Pterocarpus</i> , <i>Terminalia</i> spp., <i>Melia volkensii</i>	Dekomposisi bertahap pada struktur yang keras	Peretakan mekanis
Dormansi Fisik	Imbibisi/penyerapan air terhalang oleh lapisan kulit biji/buah yang impermeabel	Beberapa Legum & Myrtaceae	Fluktuasi suhu	Skarifikasi mekanis, pemberian air panas atau bahan kimia
Dormansi Fisiologi (Kimiawi)	Buah atau biji mengandung zat penghambat (chemical inhibitory compound) yang menghambat perkecambahan	Buah fleshy (berdaging)	Pencucian (leaching) oleh air, dekomposisi bertahap pada jaringan buah	Menghilangkan jaringan buah dan mencuci bijinya dengan air
Dormansi Sinar	Biji gagal berkecambah tanpa adanya pencahayaan yang cukup. Dipengaruhi oleh mekanisme Biokimia fitokrom	Sebagian besar spesies temperate, tumbuhan pioneer tropika humida seperti <i>eucalyptus</i> dan <i>Spathodea</i>	Pencahayaan	Pencahayaan
Dormansi Suhu	Perkecambahan rendah tanpa adanya perlakuan dengan suhu tertentu	Sebagian besar spesies temperate, tumbuhan pioneer daerah tropis-sub tropis kering, tumbuhan pioneer tropika humida	Penempatan pada suhu rendah di musim dingin. Pembakaran. Pemberian suhu yang berfluktuasi	Stratifikasi atau pemberian perlakuan suhu rendah. Pemberian suhu tinggi. Pemberian suhu berfluktuasi

Mekanisme Pembentukan Viabilitas dan Vigor

Viabilitas dan vigor ditentukan oleh interaksi kompleks antara tiga komponen utama yang saling berkaitan (Finch-Savage & Bassel, 2015). Integritas struktural mencakup keutuhan kulit benih, kelengkapan struktur embrio dan meristem, serta kondisi jaringan cadangan dan sistem vaskular. Kapasitas metabolik menentukan efisiensi sistem respirasi dan produksi ATP, aktivitas enzim hidrolitik untuk mobilisasi cadangan makanan, dan sistem antioksidan untuk melindungi komponen seluler dari kerusakan oksidatif. Stabilitas membran meliputi komposisi lipid yang tepat, protein membran yang fungsional, dan sistem perbaikan kerusakan membran.

Indikator Fisiologis Kematangan

Penentuan kematangan benih secara akurat memerlukan evaluasi berbagai parameter yang dapat diukur objektif. Parameter biokimia meliputi aktivitas α -amilase yang mencapai maksimum 180-250 unit/g, kadar ABA tinggi dalam rentang 200-350 ng/g, konduktivitas listrik rendah 25-45 $\mu\text{S}/\text{cm}/\text{g}$, dan aktivitas enzim antioksidan tinggi (Rodríguez-Gacio et al., 2009).

Parameter fisik mencakup kadar air optimal 10-25% tergantung spesies, pencapaian berat kering maksimum, perubahan warna dan tekstur kulit benih, serta kemudahan pelepasan benih dari tanaman induk. Parameter fisiologis meliputi viabilitas dan vigor yang mencapai maksimum, laju respirasi minimal, dan resistensi terhadap stres lingkungan yang tinggi (TeKrony & Egli, 1991; Marcos Filho, 2015).

Tabel 5. Parameter Fisiologis Kematangan Benih

Tahap Pematangan	Hari Setelah Antesis	Kadar Air (%)	Laju Respirasi ($\mu\text{L O}_2/\text{g}/\text{jam}$)	RQ	ATP ($\mu\text{mol}/\text{g FW}$)	Aktivitas Transkripsi (%)	Status Metabolik
Embriogenesis awal	10-15	85-90	18-25	1.0-1.2	2.5-3.5	100	Pertumbuhan aktif
Pematangan awal	20-25	70-80	12-18	0.9-1.1	2.0-2.8	80-90	Sintesis cadangan
Pematangan tengah	30-35	50-65	8-12	0.8-1.0	1.5-2.2	60-70	Akumulasi metabolit
Pematangan akhir	40-45	35-45	4-8	0.7-0.9	1.0-1.5	30-40	Preparasi dormansi
Pre-desiccation	50-55	25-35	2-4	0.6-0.8	0.5-1.0	10-20	Toleransi pengeringan
Kematangan fisiologis	60-70	10-20	1-3	0.5-0.7	0.2-0.5	1-5	Tenang

2.5 Faktor Genetik dan Lingkungan dalam Pembentukan Benih

Pembentukan benih berkualitas merupakan hasil interaksi kompleks antara faktor genetik intrinsik dan kondisi lingkungan eksternal (Roach & Wulff, 1987; Donohue, 2009). Pemahaman interaksi ini sangat penting untuk mengoptimalkan produksi benih dengan viabilitas dan vigor tinggi.

Kontrol Genetik Karakteristik Benih

Kualitas benih dikendalikan oleh berbagai kelompok gen yang bekerja dalam jalur regulasi terintegrasi untuk menentukan karakteristik morfologis dan biokimia benih (Luo et al., 2005; Li et al., 2008). Gen pengatur ukuran benih seperti DA1 dan DA2 mengontrol pembelahan sel integumen maternal yang menentukan ruang untuk perkembangan embrio dan endosperma, sementara gen AN3 dan KLUH mengatur proliferasi dan pembesaran sel yang berkontribusi terhadap volume total benih. Mutasi pada gen-gen ini dapat menghasilkan benih dengan ukuran abnormal yang mempengaruhi vigor dan daya simpan.

Gen pengatur komposisi biokimia menentukan kualitas nutrisi dan fungsional benih melalui kontrol sintesis dan akumulasi senyawa cadangan. LEAFY COTYLEDON (LEC1, LEC2) berfungsi sebagai regulator utama embriogenesis dan akumulasi cadangan yang mengkoordinasikan transisi dari fase pertumbuhan ke fase maturasi (Harada, 1997). FUSCA3 dan ABI3 mengontrol sintesis protein cadangan dan pembentukan dormansi, sementara WRINKLED1 berperan sebagai master regulator biosintesis lipid pada benih berlemak (Baud et al., 2007; Santos-Mendoza et al., 2008).

Gen protein cadangan secara langsung menentukan jenis dan jumlah protein penyimpanan yang terakumulasi dalam benih. Cruciferin dan napin merupakan protein cadangan utama pada Brassicaceae, zein sebagai protein cadangan prolamin pada jagung, dan glutelin sebagai protein cadangan utama pada padi yang menentukan kualitas gizi dan sifat fungsional (Shewry et al., 1995). Variasi dalam ekspresi gen-gen ini menghasilkan keragaman karakteristik benih yang dapat dimanfaatkan dalam program pemuliaan.

Pengaruh Genotipe Tanaman Induk

Genotipe induk memberikan kontribusi signifikan terhadap kualitas benih melalui berbagai mekanisme yang melibatkan faktor genetik dari kedua tetua (Gehring et al., 2009). Kontribusi maternal memiliki peran dominan karena jaringan maternal seperti integumen dan nucellus menyediakan struktur fisik dan nutrisi yang mendukung perkembangan embrio dan endosperma. Gen maternal seperti TRANSPARENT TESTA mengatur

warna dan struktur kulit benih yang menentukan permeabilitas dan ketahanan benih terhadap faktor lingkungan (Debeaujon et al., 2000).

Kontribusi paternal mempengaruhi pembentukan endosperma triploid melalui kontribusi genomik yang menentukan karakteristik metabolisme dan akumulasi cadangan makanan. Gen-gen imprinted yang mengalami regulasi epigenetik berdasarkan asal parental berperan dalam mengatur alokasi sumber daya dan pertumbuhan endosperma (Spillane et al., 2007). Fenomena heterosis pada benih hibrida dapat meningkatkan vigor benih melalui efek komplementasi gen yang menghasilkan performa superior dibandingkan kedua tetuanya.

Tingkat heritabilitas berbagai karakter kualitas benih menunjukkan variasi yang mencerminkan kompleksitas kontrol genetiknya. Ukuran benih menunjukkan heritabilitas tinggi ($h^2 = 0.8-0.9$), kandungan protein memiliki heritabilitas sedang-tinggi ($h^2 = 0.7-0.8$), sementara viabilitas benih menunjukkan heritabilitas sedang ($h^2 = 0.6-0.7$), mengindikasikan pengaruh genetik kuat namun tetap dimodulasi oleh faktor lingkungan (Crossa et al., 2017).

Faktor Lingkungan Abiotik

Suhu merupakan faktor lingkungan yang sangat menentukan kualitas pembentukan benih melalui pengaruhnya terhadap aktivitas enzimatik dan proses metabolisme. Suhu optimal 22-30 °C diperlukan untuk memastikan aktivitas enzim biosintesis berjalan efisien selama pembentukan cadangan makanan (Wahid et al., 2007). Suhu rendah (<15 °C) menyebabkan penurunan aktivitas metabolisme yang menghambat pengisian benih, sementara suhu tinggi (>35 °C) memicu sintesis heat shock proteins yang mengalihkan energi metabolisme dari proses akumulasi cadangan makanan.

Kelembaban udara relatif berperan penting dalam mengatur keseimbangan air dan transportasi nutrisi selama pembentukan benih. Kelembaban optimal 60-80% RH mendukung transportasi nutrisi efisien dari tanaman induk ke benih. Kelembaban rendah (<40% RH) dapat menginduksi stres kekeringan yang memicu sintesis ABA prematur, menyebabkan percepatan maturasi sebelum akumulasi cadangan optimal. Kelembaban tinggi (>85% RH) menciptakan risiko perkecambahan prematur atau vivipary.

Cahaya mempengaruhi pembentukan benih melalui pengaruhnya terhadap fotosintesis dan regulasi hormonal tanaman induk. Intensitas cahaya optimal 600-1200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ diperlukan untuk fotosintesis maksimal yang menghasilkan asimilat sebagai bahan baku pembentukan cadangan makanan benih (Ashraf & Harris, 2013). Kualitas cahaya, terutama rasio merah

terhadap merah jauh, mempengaruhi regulasi hormonal yang mengontrol alokasi asimilat dan timing pematangan benih.

Ketersediaan air menjadi faktor kritis yang mempengaruhi semua aspek pembentukan benih karena perannya dalam transportasi nutrisi dan ekspansi sel. Kekurangan air menghambat proses pengisian benih dan dapat mempercepat maturasi sebelum akumulasi cadangan optimal tercapai, sementara kelebihan air dapat menyebabkan kondisi anaerob yang mengganggu respirasi seluler dan meningkatkan risiko infeksi patogen (Penfield & MacGregor, 2016).

Interaksi Genotipe × Lingkungan (G×E)

Interaksi genotipe × lingkungan menjelaskan fenomena mengapa genotipe yang sama dapat menghasilkan kualitas benih berbeda ketika ditanam pada lingkungan berbeda, dan sebaliknya (Crossa et al., 2017). Pemahaman pola interaksi ini penting dalam mengklasifikasikan stabilitas genotipe: genotipe stabil menunjukkan performa konsisten di berbagai kondisi lingkungan, genotipe responsif memiliki performa bervariasi sesuai kondisi lingkungan, dan genotipe spesifik menunjukkan performa optimal hanya pada lingkungan tertentu.

Pemahaman interaksi G×E memiliki implikasi praktis luas dalam sistem produksi benih modern. Pemilihan varietas harus disesuaikan dengan karakteristik zona agroklimat dimana benih akan diproduksi. Pengembangan varietas adaptif untuk kondisi marjinal menjadi strategi penting untuk memperluas area produksi benih. Dalam konteks perubahan iklim global, pemahaman interaksi G×E menjadi dasar untuk mengembangkan strategi mitigasi dalam produksi benih, termasuk identifikasi genotipe yang resilient terhadap variabilitas iklim.

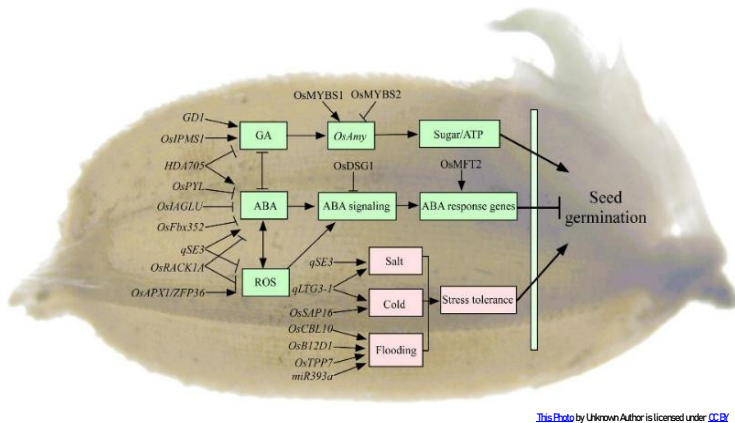
Pengaruh Stres Lingkungan terhadap Viabilitas

Stres kekeringan merupakan faktor lingkungan paling merusak terhadap kualitas benih, dapat menurunkan viabilitas hingga 20-40% tergantung intensitas dan durasi cekaman. Kondisi kekurangan air menginduksi sintesis ABA berlebihan yang mempercepat proses dormansi sebelum benih mencapai kematangan optimal, mengakibatkan pengurangan waktu pengisian benih dan kandungan cadangan makanan (Hasanuzzaman et al., 2020).

Stres salinitas memberikan dampak kompleks terhadap pembentukan benih melalui gangguan pada homeostasis ion dan tekanan osmotik dalam sel, menurunkan aktivitas enzim biosintesis yang diperlukan untuk pembentukan cadangan makanan. Sebagai mekanisme adaptif, tanaman menginduksi

akumulasi proline dan gula sebagai osmoprotektan, namun hal ini mengalihkan energi metabolisme dari proses pembentukan cadangan benih (Ashraf & Harris, 2013).

Stres suhu, baik tinggi maupun rendah, memberikan dampak devastatif terhadap viabilitas benih melalui denaturasi protein enzimatis dan kerusakan membran sel (suhu tinggi), atau inaktivasi enzim dan kristalisasi air dalam sel (suhu rendah). Kedua kondisi suhu ekstrem memicu produksi *reactive oxygen species* berlebihan yang menyebabkan kerusakan oksidatif pada lipid membran, protein, dan asam nukleat (Wang et al., 2004). Akumulasi kerusakan oksidatif ini menurunkan viabilitas benih secara langsung dan mengurangi daya simpan karena kerusakan progresif selama penyimpanan.



This Photo by Unknown Author is licensed under CC BY

Gambar 8. Pengaruh Faktor Lingkungan terhadap Viabilitas Benih

DAFTAR PUSTAKA

- Aida, M., Beis, D., Heidstra, R., Willemsen, V., Blilou, I., Galinha, C., Nussaume, L., Noh, Y.-S., Amasino, R., Scheres, B., 2004. The PLETHORA Genes Mediate Patterning of the Arabidopsis Root Stem Cell Niche. *Cell* 119, 109–120. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2004.09.018>
- Angelovici, R., Galili, G., Fernie, A.R., Fait, A., 2010. Seed desiccation: a bridge between maturation and germination. *Trends Plant Sci* 15, 211–218. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2010.01.003>
- AOSA, 1985. Seed vigour testing handbook. Association of Official Seed Analysts (AOSA), Lincoln, Nebraska.
- Ashraf, M., Harris, P.J.C., 2013. Photosynthesis under stressful environments: An overview. *Photosynthetica* 51, 163–190. <https://doi.org/10.1007/s11099-013-0021-6>
- Bailly, C., 2019. The signalling role of ROS in the regulation of seed germination and dormancy. *Biochemical Journal* 476, 3019–3032. <https://doi.org/10.1042/bcj20190159>
- Baskin, C.C., Baskin, J.M., 2014. Seeds, Ecology, Biogeography and Evolution of Dormancy, and Germination, 2nd ed, Plant Ecology. Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/C2013-0-00597-X>
- Battaglia, M., Olvera-Carrillo, Y., Garcarrubio, A., Campos, F., Covarrubias, A.A., 2008. The Enigmatic LEA Proteins and Other Hydrophilins. *Plant Physiol* 148, 6–24. <https://doi.org/10.1104/pp.108.120725>
- Baud, S., Dubreucq, B., Miquel, M., Rochat, C., Lepiniec, L., 2008. Storage Reserve Accumulation in Arabidopsis: Metabolic and Developmental Control of Seed Filling. *Arabidopsis Book* 6, e0113. <https://doi.org/10.1199/tab.0113>
- Baud, S., Mendoza, M.S., To, A., Harscoët, E., Lepiniec, L., Dubreucq, B., 2007. WRINKLED1 specifies the regulatory action of LEAFY COTYLEDON2 towards fatty acid metabolism during seed maturation in Arabidopsis. *The Plant Journal* 50, 825–838. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313x.2007.03092.x>
- Berger, F., Grini, P.E., Schnittger, A., 2006. Endosperm: an integrator of seed growth and development. *Curr Opin Plant Biol* 9, 664–670. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pbi.2006.09.015>

- Berjak, P., Pammenter, N.W., 2013. Implications of the lack of desiccation tolerance in recalcitrant seeds. *Front Plant Sci* 4. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00478>
- Bewley, J.D., Bradford, K.J., Hilhorst, H.W.M., Nonogaki, H., 2013. *Seeds: Physiology of development, germination and dormancy* (3rd edition). Springer, New York.
- Bino, R.J., Aartse, J.W., van der Burg, W.J., 1993. Non-destructive X-ray analysis of *Arabidopsis* embryo mutants. *Seed Sci Res* 3, 167–170. <https://doi.org/10.1017/s0960258500001744>
- Black, M., Bewley, J.D., Halmer, P., 2006. *The encyclopedia of seeds: science, technology and uses*. CABI Publishing, Wallingford, UK.
- Borisjuk, L., Walenta, S., Rolletschek, H., Mueller-Klieser, W., Wobus, U., Weber, H., 2002. Spatial analysis of plant metabolism: Sucrose imaging within *Vicia faba* cotyledons reveals specific developmental patterns. *The Plant Journal* 29, 521–530. <https://doi.org/10.1046/j.1365-313x.2002.01222.x>
- Buitink, J., Leprince, O., 2004. Glass formation in plant anhydrobiotes: survival in the dry state*1. *Cryobiology* 48, 215–228. [https://doi.org/10.1016/s0011-2240\(04\)00052-5](https://doi.org/10.1016/s0011-2240(04)00052-5)
- Copeland, L.O., McDonald, M.B., 2001. *Principles of Seed Science and Technology*, 4th ed. Springer Science+Business Media, LLC, New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1619-4>
- Crossa, J., Pérez-Rodríguez, P., Cuevas, J., Montesinos-López, O., Jarquín, D., de los Campos, G., Burgueño, J., González-Camacho, J.M., Pérez-Elizalde, S., Beyene, Y., Dreisigacker, S., Singh, R., Zhang, X., Gowda, M., Roorkiwal, M., Rutkoski, J., Varshney, R.K., 2017. *Genomic Selection in Plant Breeding: Methods, Models, and Perspectives*. *Trends Plant Sci* 22, 961–975. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2017.08.011>
- Crowe, J., 1992. Anhydrobiosis. *Annu Rev Physiol* 54, 579–599. <https://doi.org/10.1146/annurev.physiol.54.1.579>
- Davies, P.J., 2007. *Plant Hormones: Biosynthesis, Signal Transduction, Action!*. Springer, Dordrecht Netherlands.
- Debeaujon, I., Léon-Kloosterziel, K.M., Koornneef, M., 2000. Influence of the Testa on Seed Dormancy, Germination, and Longevity in *Arabidopsis*. *Plant Physiol* 122, 403–414. <https://doi.org/10.1104/pp.122.2.403>

- Dekkers, B.J.W., Costa, M.C.D., Maia, J., Bentsink, L., Ligterink, W., Hilhorst, H.W.M., 2015. Acquisition and loss of desiccation tolerance in seeds: from experimental model to biological relevance. *Planta* 241, 563–577. <https://doi.org/10.1007/s00425-014-2240-x>
- Dell'Aquila, A., 2007. Towards new computer imaging techniques applied to seed quality testing and sorting. *Seed Science and Technology* 35, 519–538. <https://doi.org/10.15258/sst.2007.35.3.01>
- Dodeman, V., 1997. Review article. Zygotic embryogenesis versus somatic embryogenesis. *J Exp Bot* 48, 1493–1509. <https://doi.org/10.1093/jexbot/48.313.1493>
- Donohue, K., 2009. Completing the cycle: maternal effects as the missing link in plant life histories. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 364, 1059–1074. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0291>
- Egli, D.B., 2017. Seed biology and yield of grain crops. CABI. <https://doi.org/10.1079/9781780647708.0000>
- Esau, K., 1991. *Anatomy of Seed Plants*, 2nd ed. Wiley, New York.
- Fait, A., Angelovici, R., Less, H., Ohad, I., Urbanczyk-Wochniak, E., Fernie, A.R., Galili, G., 2006. Arabidopsis Seed Development and Germination Is Associated with Temporally Distinct Metabolic Switches. *Plant Physiol* 142, 839–854. <https://doi.org/10.1104/pp.106.086694>
- Farrant, J.M., Pammenter, N.W., Berjak, P., 1988. Recalcitrance - a current assessment. *Seed Science and Technology* 16, 155–166.
- Fenner, M., Thompson, K., 2005. *The Ecology of Seeds*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511614101>
- Finch-Savage, W.E., Bassel, G.W., 2015. Seed vigour and crop establishment: extending performance beyond adaptation. *J Exp Bot* 67, 567–591. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv490>
- Finkelstein, R., Reeves, W., Ariizumi, T., Steber, C., 2008. Molecular aspects of seed dormancy. *Annu Rev Plant Biol* 59, 387–415. <https://doi.org/https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092740>
- Gehring, M., Bubb, K.L., Henikoff, S., 2009. Extensive Demethylation of Repetitive Elements During Seed Development Underlies Gene Imprinting. *Science* (1979) 324, 1447–1451. <https://doi.org/10.1126/science.1171609>

- Goldberg, R.B., de Paiva, G., Yadegari, R., 1994. Plant Embryogenesis: Zygote to Seed. *Science* (1979) 266, 605–614. <https://doi.org/10.1126/science.266.5185.605>
- Gomes-Junior, F.G., Yagushi, J.T., Belini, U.L., Cicero, S.M., Tomazello-Filho, M., 2012. X-ray densitometry to assess internal seed morphology and quality. *Seed Science and Technology* 40, 102–107. <https://doi.org/10.15258/sst.2012.40.1.11>
- Graham, I.A., 2008. Seed Storage Oil Mobilization. *Annu Rev Plant Biol* 59, 115–142. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092938>
- Hand, S.C., Menze, M.A., Toner, M., Boswell, L., Moore, D., 2011. LEA Proteins During Water Stress: Not Just for Plants Anymore. *Annu Rev Physiol* 73, 115–134. <https://doi.org/10.1146/annurev-physiol-012110-142203>
- Harada, J.J., 1997. Seed Maturation and Control of Germination, in: *Cellular and Molecular Biology of Plant Seed Development*. Springer Netherlands, pp. 545–592. https://doi.org/10.1007/978-94-015-8909-3_15
- Harada, J.J., Belmonte, M.F., Kwong, R.W., 2010. Plant Embryogenesis (Zygotic and Somatic), in: *Encyclopedia of Life Sciences*. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9780470015902.a0002042.pub2>
- Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M.H.M.B., Zulfiqar, F., Raza, A., Mohsin, S.M., Mahmud, J. Al, Fujita, M., Fotopoulos, V., 2020. Reactive Oxygen Species and Antioxidant Defense in Plants under Abiotic Stress: Revisiting the Crucial Role of a Universal Defense Regulator. *Antioxidants* 9. <https://doi.org/10.3390/antiox9080681>
- Hoekstra, F.A., Golovina, E.A., Buitink, J., 2001. Mechanisms of plant desiccation tolerance. *Trends Plant Sci* 6, 431–438. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(01\)02052-0](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(01)02052-0)
- Ilyas, S., 2012. Ilmu dan Teknologi Benih : Teori dan Hasil-hasil Penelitian. PT Penerbit IPB Press, Bogor.
- Jürgens, G., 2001. Apical–basal pattern formation in *Arabidopsis* embryogenesis. *EMBO J* 20, 3609–3616. <https://doi.org/https://doi.org/10.1093/emboj/20.14.3609>
- Kermode, A.R., 2017. Regulatory Mechanisms in the Transition from Seed Development to Germination: Interactions Between the Embryo and

- the Seed Environment, in: Seed Development and Germination. Routledge, pp. 273–332. <https://doi.org/10.1201/9780203740071-11>
- Krishnan, H.B., 2005. Engineering Soybean for Enhanced Sulfur Amino Acid Content. *Crop Sci* 45, 454–461. <https://doi.org/10.2135/cropsci2005.0454>
- Laux, T., 2004. Genetic Regulation of Embryonic Pattern Formation. *THE PLANT CELL ONLINE* 16, S190–S202. <https://doi.org/10.1105/tpc.016014>
- Laux, T., Mayer, K.F.X., Berger, J., Jürgens, G., 1996. The WUSCHEL gene is required for shoot and floral meristem integrity in Arabidopsis. *Development* 122, 87–96. <https://doi.org/10.1242/dev.122.1.87>
- Leprince, O., Pellizzaro, A., Berriri, S., Buitink, J., 2016. Late seed maturation: drying without dying. *J Exp Bot* erw363. <https://doi.org/10.1093/jxb/erw363>
- Leubner-Metzger, G., 2003. Functions and regulation of β -1,3-glucanases during seed germination, dormancy release and after-ripening. *Seed Sci Res* 13, 17–34. <https://doi.org/10.1079/ssr2002121>
- Li, Y., Zheng, L., Corke, F., Smith, C., Bevan, M.W., 2008. Control of final seed and organ size by the DA1 gene family in Arabidopsis thaliana. *Genes & Development* 22, 1331–1336. <https://doi.org/10.1101/gad.463608>
- Long, J.A., Moan, E.I., Medford, J.I., Barton, M.K., 1996. A member of the KNOTTED class of homeodomain proteins encoded by the STM gene of Arabidopsis. *Nature* 379, 66–69. <https://doi.org/10.1038/379066a0>
- López-Fernández, M.P., Maldonado, S., 2013. Ricinosomes provide an early indicator of suspensor and endosperm cells destined to die during late seed development in quinoa (*Chenopodium quinoa*). *Ann Bot* 112, 1253–1262. <https://doi.org/10.1093/aob/mct184>
- Luo, M., Dennis, E.S., Berger, F., Peacock, W.J., Chaudhury, A., 2005. MINISEED3 (MINI3), a WRKY family gene, and HAIKU2 (IKU2), a leucine-rich repeat (LRR) KINASE gene, are regulators of seed size in Arabidopsis. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 102, 17531–17536. <https://doi.org/10.1073/pnas.0508418102>
- Marcos Filho, J., 2015. Seed vigor testing: an overview of the past, present and future perspective. *Sci Agric* 72, 363–374. <https://doi.org/10.1590/0103-9016-2015-0007>

- Marshall, D.L., 1986. EFFECT OF SEED SIZE ON SEEDLING SUCCESS IN THREE SPECIES OF SESBANIA (FABACEAE). *Am J Bot* 73, 457–464. <https://doi.org/10.1002/j.1537-2197.1986.tb12063.x>
- Meinke, D.W., 2019. Genome-wide identification of <sc>EMBRYO</sc>-<sc>DEFECTIVE</sc> (<sc>EMB</sc>) genes required for growth and development in *Arabidopsis*. *New Phytologist* 226, 306–325. <https://doi.org/10.1111/nph.16071>
- Moles, A.T., Ackerly, D.D., Webb, C.O., Tweddle, J.C., Dickie, J.B., Westoby, M., 2005. A Brief History of Seed Size. *Science* (1979) 307, 576–580. <https://doi.org/10.1126/science.1104863>
- Müntz, K., Belozersky, M.A., Dunaevsky, Y.E., Schlereth, A., Tiedemann, J., 2001. Stored proteinases and the initiation of storage protein mobilization in seeds during germination and seedling growth. *J Exp Bot* 52, 1741–1752. <https://doi.org/10.1093/jexbot/52.362.1741>
- Murthy, U.M.N., Kumar, P.P., Sun, W.Q., 2003. Mechanisms of seed ageing under different storage conditions for *Vigna radiata* (L.) Wilczek: lipid peroxidation, sugar hydrolysis, Maillard reactions and their relationship to glass state transition. *J Exp Bot* 54, 1057–1067. <https://doi.org/10.1093/jxb/erg092>
- Nakabayashi, K., Bartsch, M., Xiang, Y., Miatton, E., Pellengahr, S., Yano, R., Seo, M., Soppe, W.J.J., 2012. The Time Required for Dormancy Release in *Arabidopsis* Is Determined by DELAY OF GERMINATION1 Protein Levels in Freshly Harvested Seeds. *Plant Cell* 24, 2826–2838. <https://doi.org/10.1105/tpc.112.100214>
- Nonogaki, H., Bassel, G.W., Bewley, J.D., 2010. Germination—Still a mystery. *Plant Science* 179, 574–581. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.02.010>
- Olsen, O.-A., 2004. Nuclear Endosperm Development in Cereals and *Arabidopsis thaliana*. *THE PLANT CELL ONLINE* 16, S214–S227. <https://doi.org/10.1105/tpc.017111>
- Penfield, S., MacGregor, D.R., 2016. Effects of environmental variation during seed production on seed dormancy and germination. *J Exp Bot* 57, 436. <https://doi.org/10.1093/jxb/erw436>
- Penfield, S., Rylott, E.L., Gilday, A.D., Graham, S., Larson, T.R., Graham, I.A., 2004. Reserve Mobilization in the *Arabidopsis* Endosperm Fuels Hypocotyl Elongation in the Dark, Is Independent of Abscissic Acid,

- and Requires PHOSPHOENOLPYRUVATE CARBOXYKINASE1. *Plant Cell* 16, 2705–2718. <https://doi.org/10.1105/tpc.104.024711>
- Raghavan, V., 2006. *Double Fertilization: Embryo and Endosperm Development in Flowering Plants*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York.
- Roach, D.A., Wulff, R.D., 1987. Maternal Effects In Plants. *Annu Rev Ecol Syst* 18, 209–235. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.18.1.209>
- Rodríguez-Gacio, M. del C., Matilla-Vázquez, M.A., Matilla, A.J., 2009. Seed dormancy and ABA signaling: The breakthrough goes on. *Plant Signaling & Behavior* 4, 1035–1048. <https://doi.org/10.4161/psb.4.11.9902>
- Sabelli, P.A., Larkins, B.A., 2009. The Development of Endosperm in Grasses. *Plant Physiol* 149, 14–26. <https://doi.org/10.1104/pp.108.129437>
- Santos-Mendoza, M., Dubreucq, B., Baud, S., Parcy, F., Caboche, M., Lepiniec, L., 2008. Deciphering gene regulatory networks that control seed development and maturation in Arabidopsis. *The Plant Journal* 54, 608–620. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313x.2008.03461.x>
- Shewry, P.R., Napier, J.A., Tatham, A.S., 1995. Seed Storage Proteins: Structures and Biosynthesis. *Plant Cell* 7, 945. <https://doi.org/10.2307/3870049>
- Spillane, C., Schmid, K.J., Laoueuillé-Duprat, S., Pien, S., Escobar-Restrepo, J.-M., Baroux, C., Gagliardini, V., Page, D.R., Wolfe, K.H., Grossniklaus, U., 2007. Positive darwinian selection at the imprinted MEDEA locus in plants. *Nature* 448, 349–352. <https://doi.org/10.1038/nature05984>
- Sreenivasulu, N., Usadel, B., Winter, A., Radchuk, V., Scholz, U., Stein, N., Weschke, W., Strickert, M., Close, T.J., Stitt, M., Graner, A., Wobus, U., 2008. Barley Grain Maturation and Germination: Metabolic Pathway and Regulatory Network Commonalities and Differences Highlighted by New MapMan/PageMan Profiling Tools . *Plant Physiol* 146, 1738–1758. <https://doi.org/10.1104/pp.107.111781>
- Tekrony, D.M., Egli, D.B., 1997. Accumulation of Seed Vigour During Development and Maturation, in: *Basic and Applied Aspects of Seed Biology*. Springer Netherlands, pp. 369–384. https://doi.org/10.1007/978-94-011-5716-2_41
- TeKrony, D.M., Egli, D.B., 1991. Relationship of Seed Vigor to Crop Yield: A Review. *Crop Sci* 31, 816–822. <https://doi.org/10.2135/cropsci1991.0011183x003100030054x>

- Wahid, A., Gelani, S., Ashraf, M., Foolad, M., 2007. Heat tolerance in plants: An overview. *Environ Exp Bot* 61, 199–223. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.05.011>
- Walters, C., 2015. Orthodoxy, recalcitrance and in-between: describing variation in seed storage characteristics using threshold responses to water loss. *Planta* 242, 397–406. <https://doi.org/10.1007/s00425-015-2312-6>
- Wang, W., Vinocur, B., Shoseyov, O., Altman, A., 2004. Role of plant heat-shock proteins and molecular chaperones in the abiotic stress response. *Trends Plant Sci* 9, 244–252. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2004.03.006>
- Weber, H., Borisjuk, L., Wobus, U., 2005. MOLECULAR PHYSIOLOGY OF LEGUME SEED DEVELOPMENT. *Annu Rev Plant Biol* 56, 253–279. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.56.032604.144201>
- Werker, E., 1997. Seed Anatomy. Gebrüder Borntraeger, Berlin.
- Wulff, R.D., 1986. Seed Size Variation in *Desmodium Paniculatum*: II. Effects on Seedling Growth and Physiological Performance. *J Ecol* 74, 99–114. <https://doi.org/10.2307/2260351>
- Yamaguchi, S., 2008. Gibberellin Metabolism and its Regulation. *Annu Rev Plant Biol* 59, 225–251. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092804>

BAB 3

KUALITAS BENIH

Oleh: Bachtiar

Kualitas benih merupakan salah satu faktor kritis yang menentukan keberhasilan budidaya tanaman. Benih yang berkualitas tinggi memiliki daya tumbuh yang baik, vigor yang kuat, serta bebas dari penyakit dan hama, sehingga mampu menghasilkan tanaman yang sehat dan produktif. Kualitas benih tidak hanya ditentukan oleh kemurnian fisik dan genetik, tetapi juga oleh viabilitas (kemampuan tumbuh) dan vigor (kekuatan tumbuh) benih tersebut. Oleh karena itu, pemilihan benih yang unggul menjadi langkah awal yang sangat penting dalam mencapai hasil pertanian yang optimal.

Selain faktor genetik, kualitas benih juga dipengaruhi oleh proses produksi, panen, penyimpanan, dan penanganan pascapanen. Proses produksi benih harus memenuhi standar teknis yang ketat untuk memastikan kemurnian varietas dan kesehatan benih. Penyimpanan benih yang tidak tepat, seperti dalam kondisi lembap atau terkena temperatur ekstrem, dapat menurunkan viabilitas benih secara signifikan. Selain itu, kontaminasi oleh patogen atau benih gulma juga dapat mengurangi kualitas benih, sehingga diperlukan pengujian laboratorium untuk memastikan mutu benih sebelum didistribusikan ke petani.

Dalam konteks pertanian modern, penggunaan benih berkualitas tinggi tidak hanya meningkatkan produktivitas, tetapi juga mendukung keberlanjutan lingkungan. Benih yang baik dapat mengurangi risiko kegagalan panen, mengoptimalkan penggunaan pupuk dan pestisida, serta meningkatkan ketahanan tanaman terhadap perubahan iklim. Oleh karena itu, pemerintah, peneliti, dan produsen benih harus bekerja sama untuk memastikan ketersediaan benih berkualitas melalui sertifikasi, pelatihan petani, dan pengembangan teknologi benih yang lebih unggul. Dengan demikian, investasi dalam kualitas benih merupakan langkah strategis untuk mencapai ketahanan pangan dan pembangunan pertanian yang berkelanjutan.

3.1 Komponen Kualitas Benih

Benih yang berkualitas tidak dapat dilepaskan dari kondisi faktor-faktor yang melekat pada benih. Faktor-faktor internal benih berkaitan dengan karakter genetika benih, sifat fisiologis dan kondisi biokimia benih. Karakter genetik benih menentukan potensi dan kemampuan tumbuh dan ketahanan

terhadap cekaman benih terhadap faktor lingkungan. Karakter genetik tersebut dapat ditinjau dari beberapa sifat benih antara lain:

1. Daya Berkecambah (Viabilitas)

Viabilitas sebagai indikator utama kualitas benih adalah persentase benih yang mampu berkecambah dalam kondisi optimal, dapat diartikan sebagai daya hidup benih yang ditandai gejala-gejala pertumbuhan awal sebagai dampak dari proses metabolisme yang terjadi dalam benih.

Badan Standardisasi Nasional menetapkan standar mutu benih, dengan daya kecambah minimal 85% dianggap baik. Standar ini memberikan kepastian bahwa benih yang digunakan mempunyai potensi tumbuh yang baik, menghasilkan tanaman yang sehat dan berproduksi secara normal. Sebaliknya benih dengan daya berkecambah rendah menghasilkan pertanaman yang tidak seragam.

Viabilitas benih diukur melalui berbagai parameter, seperti daya berkecambah, laju perkecambahan, dan indeks kecepatan berkecambah. Parameter tersebut ditentukan oleh berbagai faktor, seperti jenis benih, kondisi penyimpanan, dan kadar air benih.

Daya berkecambah dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut: (Fatikhasari et al., 2022)

$$DK = \frac{JK}{JC} \times 100\%$$

Keterangan:

DK = Daya berkecambah

JK = Jumlah kecambah normal

JC = Jumlah benih yang berkecambah

Laju Perkecambahan adalah kemampuan berkecambah benih secara cepat pada kurun waktu tertentu. Laju perkecambahan ditentukan dengan menghitung jumlah hari yang dibutuhkan untuk munculnya bakal akar (radikula) dan bakal tunas (plumula), dengan menggunakan persamaan (Sutopo, 1988):

$$LP = \frac{N1T1+N2T2+\dots+NxTx}{JB}$$

Keterangan:

LP = Laju perkecambahan

N = Jumlah benih berkecambah

T = Jumlah waktu antara pengujian awal sampai pengujian akhir pada interval tertentu

JB = Jumlah benih

Indeks Kecepatan Perkecambahan berkaitan dengan LP yang didukung oleh daya kecambah dari setiap benih yang mempunyai viabilitas yang tinggi. IKP dihitung selama 7 hari pengamatan pada ketiga benih dengan menggunakan rumus Copeland dan McDonald (2001):

$$IKP = \frac{G_1}{D_1} + \frac{G_2}{D_2} + \dots + \frac{G_n}{D_n}$$

Keterangan:

- IKP = Indeks kecepatan perkecambahan
 G = Jumlah benih berkecambah
 D = Waktu yang bersesuaian dengan jumlah tersebut
 n = Jumlah hari pada perhitungan akhir

2. Vigor Benih (*Seed Vigor*)

Vigor adalah kemampuan benih untuk berkecambah dengan cepat dan seragam, tumbuh sehat, dan menghasilkan tanaman yang kuat di bawah kondisi lingkungan yang beragam (baik optimal maupun suboptimal). Selain viabilitas, vigor benih merupakan indikator kualitas benih (ISTA, 2023). Faktor-faktor yang berpengaruh pada kevigoran benih antara lain:

- Genetik, varietas tertentu memiliki vigor bawaan lebih tinggi (Bewley et al., 2022).
- Umur benih, benih yang masih muda atau lewat tua mengalami ketidakcukupan dan kekurangan nutrisi
- Proses pasca panen yaitu pengeringan, penyimpanan, dan perlakuan benih (misalnya, *priming*) mempengaruhi vigor (Farooq et al., 2019).
- Kondisi lingkungan, saat pembentukan benih, kejadian cekaman air, temperatur ekstrem, atau nutrisi tanaman kurang menurunkan vigor (Rodo dan Marcos-Filho, 2018).

Benih dengan kevigoran yang tinggi berdampak pada persentase kecambah yang lebih homogen, tahan terhadap patogen tanah (misalnya *damping off*) serta tingkat produktivitas tanaman lebih stabil. Beberapa metode pengukuran vigor benih yang umum digunakan meliputi:

- Uji perkecambahan cepat (*accelerated aging test*): benih diadaptasi pada temperatur dan kelembapan tinggi sebelum dikecambahkan untuk meniru kondisi adanya cekaman
- Uji daya hantar listrik (*EC Test*), kebocoran elektrolit dari benih menunjukkan kerusakan membran sel (Copeland & McDonald, 2021).
- Uji tetrazolium (*TZ Test*) Menggunakan larutan tetrazolium untuk menilai viabilitas jaringan embrio (ISTA, 2023).

3. Kemurnian Benih

Kemurnian benih (*seed purity*) adalah parameter kualitas benih yang mencakup kemurnian genetik (*genetic purity*) dan kemurnian fisik (*physical purity*), yang menentukan kesesuaian varietas dan produktivitas tanaman.

a. Kemurnian Genetik (*Genetic Purity*)

Kemurnian genetik didasarkan pada kemurnian varietas benih tanaman sesuai dengan ciri khas genetik yang telah identifikasi dan ditentukan artinya benih bebas dari kontaminasi genetik akibat penyerbukan silang atau dampak terjadinya mutasi genetik.

Faktor-faktor yang mempengaruhi kemurnian genetik:

- Penyerbukan silang (*cross-pollination*) dengan varietas tanaman lain.
- Kesalahan isolasi selama masa produksi benih.
- Mutasi genetik atau *genetic drift* selama tahap proses pemuliaan tanaman.
- Kontaminasi mekanis saat panen dan tahap proses pascapanen.

b. Kemurnian Fisik (*Physical Purity*)

Kemurnian fisik adalah persentase benih murni (*pure seed*) dalam suatu lot benih, yang tidak bercampur dan bebas dari:

- Benih varietas lainnya (*other crop seeds*).
- Benih gulma (*weed seeds*).
- Kotoran (*inert matter*) seperti krikil kecil, tanah, bagian-bagian tanaman, atau sekam.

4. Kadar Air Benih

Kadar air benih (*seed moisture content*) adalah persentase kandungan air dalam benih terhadap berat totalnya. Parameter ini penting karena dapat mempengaruhi tingkat viabilitas benih, kecepatan penurunan mutu fisiologis benih (deteriorasi), dan efektivitas lama penyimpanan.

Kadar air optimal bervariasi tergantung jenis tanaman, umumnya antara 5–15%. Dampak kadar air tinggi (>14%) terhadap benih, antara lain:

- Meningkatkan aktivitas respirasi benih, menyebabkan lama simpan lebih singkat.
- Memicu pertumbuhan dan perkembangan jamur (*Aspergillus*, *Penicillium*).
- Mempercepat terjadinya deteriorasi dan kematian benih/embrio.

Pengaruh Kadar Air pada Penyimpanan Benih

Dampak kadar air yang terlalu rendah (<5%) pada sebagian benih, dapat menyebabkan kerusakan membran sel sebagai akibat terjadinya dehidrasi ekstrem. Setiap penurunan 1% kadar air di bawah titik kritis, umur simpan

benih berlipat ganda (Ellis & Hong, 2019). Sebagai contoh: pada benih kedelai, kadar air >10% menyebabkan peningkatan *free fatty acids* (FFA) selama penyimpanan (Kumar et al., 2023), yang dapat mempengaruhi kualitas dan lama simpan benih secara signifikan seperti penurunan viabilitas benih, peningkatan laju respirasi benih, terbentuknya senyawa aldehida dan peroksida yang bersifat toksik bagi embrio. Sedangkan penyimpanan benih padi dengan kadar air 14% mengurangi viabilitas setelah 6 bulan (Saha et al., 2020). Adapun kisaran aman kadar air untuk penyimpanan jangka panjang berdasarkan kelompok benih tanaman, antara lain:

- Serealia (padi, gandum): 10–12%.
- Benih berminyak (kedelai, lobak): 6–8%.
- Benih hortikultura (tomat, cabai): 5–7%.

5. Ukuran dan Keseragaman Benih

Ukuran dan keseragaman benih (*seed size and uniformity*) adalah parameter sangat penting yang mempengaruhi viabilitas dan vigor benih, serta kinerja agronomis (memudahkan penanaman mekanis, keseragaman pertumbuhan tanaman dan hasil akhir panen). Studi terbaru menunjukkan benih dengan ukuran yang bervariasi dalam satu lot dapat menyebabkan penurunan produksi tanaman hingga 20% (Bewley et al., 2022).

Faktor yang mempengaruhi ukuran benih sebagai berikut:

a. Faktor Genetik

Besar kecilnya benih tergantung dari jenis tanaman yang dipengaruhi oleh gen tertentu. Disamping itu proses dan hasil pemuliaan tanaman modern yang dapat menghasilkan galur atau varietas dengan karakteristik yang berbeda dibandingkan dengan induknya.

b. Faktor Lingkungan

Lingkungan tumbuh sangat berpengaruh pada pertumbuhan tanaman dan pembentukan serta perkembangan biji. Faktor iklim, ketersediaan hara/nutrisi dan cekaman abiotik selama pembentukan benih dapat menentukan bobot dan ukuran benih.

Pengaruh ukuran benih

Bobot dan ukuran benih dapat berpengaruh langsung terhadap proses dan tahap pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Pengaruh ukuran benih terhadap perkecambahan menunjukkan benih berukuran besar dengan cadangan makanan lebih besar (endosperm/kotiledon besar) memiliki tingkat perkecambahan 15-20% lebih tinggi dibandingkan benih berukuran kecil (Bewley et al., 2022). Kecambah lebih vigor dengan sistem perakaran lebih

berkembang (Liu et al., 2022). Sedangkan benih yang kecil lebih cepat berkecambah pada kondisi normal, namun rentan terhadap cekaman lingkungan seperti kekeringan dan serangan penyakit.

Benih berukuran besar berdampak terhadap pada pertumbuhan awal, dengan kecepatan tumbuh 25-30% lebih tinggi dalam 4 MST (Misra et al., 2023). Indeks luas daun (LAI) lebih tinggi pada fase vegetatif, ditunjang sistem perakaran lebih dalam dan menyebar sehingga serapan hara lebih tinggi (Zhang et al., 2023).

Ukuran benih juga berpengaruh terhadap hasil panen seperti terlihat pada Tabel 6 berikut:

Tabel 6. Pengaruh Ukuran Benih Terhadap Hasil Panen

Komoditas	Ukuran Benih	Peningkatan Hasil Panen
Padi	Benih besar (>30g/1000 butir)	12-15%
Jagung	Keseragaman ukuran	18-20%
Kedelai	Benih ukuran medium	Optimal

Sumber: Chen et al.(2021); Liu at al. (2022)

6. Bebas dari Hama dan Penyakit

Benih yang bebas dari hama dan penyakit dapat menentukan kualitas benih dan juga penting untuk sistem pertanian berkelanjutan. Benih yang sehat akan mengurangi pemakaian pestisida dan dapat mengurangi resiko penularan hama dan penyakit tanaman. Patogen benih terdiri dari mikroorganisme bakteri, jamur atau virus yang dapat mengurangi kualitas benih. Benih dapat dikategorikan sehat bila:

- Memiliki viabilitas tinggi (> 85%), dengan nilai vigor yang tinggi.
- Tidak mengandung patogen (virus, jamur, bakteri dan nematoda) yang dapat ditularkan melalui benih yang terinfeksi patogen.
- Tidak terkontaminasi telur serangga berpotensi menjadi hama yang dapat memperbanyak diri saat penyimpanan dan saat benih berkecambah dan tumbuh.

7. Daya Simpan (*Seed Longevity*)

Daya simpan benih (*seed longevity*) didasarkan pada kemampuan benih untuk mempertahankan viabilitas (daya kecambah) dan vigor selama penyimpanan dalam jangka waktu tertentu. Faktor-faktor yang berpengaruh pada daya simpan benih terdiri dari faktor internal dan eksternal:

A. Faktor Internal (Genetik dan Fisiologis)

1. Kandungan air awal (*initial seed moisture*)

- Benih dengan kadar air tinggi ($>14\%$) rentan terhadap aktivitas respirasi tinggi dan pertumbuhan jamur.
 - Kadar air optimal benih untuk penyimpanan jangka panjang antara 5–8% (Vertucci & Roos, 2021).
2. Komposisi kimia benih
 - Benih tinggi lemak lebih cepat mengalami oksidasi dan penurunan viabilitas, ditemukan pada benih kedelai, bunga matahari.
 - Benih tinggi protein lebih stabil tetapi rentan terhadap serangan hama gudang, misalnya benih kacang-kacangan (Walters et al., 2020).
 3. Struktur benih
 - Benih dengan kulit keras (*hard-seededness*) memiliki daya simpan lebih lama karena perlindungan fisik terhadap kelembaban, seperti legum (Baskin dan Baskin, 2011).
- B. Faktor Eksternal (Lingkungan Penyimpanan)
1. Temperatur
 - Setiap penurunan suhu 5 °C dapat memperpanjang umur simpan benih 2–3 kali lipat (FAO, 2022).
 - Rekomendasi temperatur untuk penyimpanan jangka pendek (1–2 tahun) yakni antara 15–20 °C, sedangkan untuk jangka panjang (>5 tahun) adalah -18–4 °C (Sallon et al., 2020).
 2. Kelembaban Relatif (RH)
 - RH ideal untuk mencegah penyerapan air oleh benih berkisar 30–50% (Hong & Ellis, 2019).
 3. Atmosfer penyimpanan
 - Penyimpanan dalam nitrogen (N_2) atau vakum mengurangi oksidasi sehingga mengurangi aktivitas respirasi benih dan meningkatkan daya simpan benih.
 - Konsentrasi CO_2 tinggi ($>20\%$) dapat menghambat pertumbuhan jamur (Navarro, 2021).

Respon daya simpan juga dapat ditinjau berdasarkan kategori jenis benih. Jenis benih dapat dibagi menjadi benih ortodoks dan rekalsitran. Benih ortodoks adalah benih yang masih dapat bertahan hidup dengan kondisi kadar air sangat rendah (3–7%) dan dapat disimpan lama dalam temperatur dingin. Karakteristik benih ortodoks antara lain:

- Toleran terhadap dehidrasi ekstrem.
- Aktivitas metabolisme berhenti saat benih dalam kondisi kering.
- Daya simpan dapat puluhan hingga ribuan tahun dalam kondisi optimal.

- Contoh: padi, jagung, gandum, tomat, kubis.

Benih rekalsitran adalah benih yang toleran terhadap pengeringan tetapi mati jika kadar air turun di bawah 20–30%. Sifat-sifat benih rekalsitran sebagai berikut:

- Aktivitas metabolik tetap berjalan selama penyimpanan.
- Sensitif terhadap temperatur rendah (kerusakan akibat *chilling injury*).
- Daya simpan benih hanya beberapa hari hingga bulan (Ballesteros et al., 2020).
- Contoh: kelapa, mangga, kakao, rambutan, durian, alpukat.

Mekanisme Penurunan Viabilitas Benih Selama Penyimpanan

Penurunan viabilitas benih tanaman ditentukan oleh mekanisme sebagai berikut:

1. Kerusakan oksidatif: akumulasi *Reactive Oxygen Species* (ROS) merusak membran sel, DNA, dan protein (Waterworth et al., 2020). Sedangkan antioksidan alami (vitamin E, glutathione) melindungi benih, tetapi kadarnya menurun seiring waktu (Sano et al., 2021).
2. Kerusakan enzimatik enzim lipase dan protease teraktivasi, menyebabkan degradasi cadangan makanan (Bewley et al., 2023).
3. Akumulasi mutasi DNA benih yang disimpan lama menunjukkan peningkatan kerusakan DNA mitokondria (Chen et al., 2022).

3.2 Pengaruh Lingkungan terhadap Kualitas Benih

Kondisi iklim (curah hujan dan temperatur) sangat berpengaruh terhadap kualitas benih mulai dari fase pembentukan hingga penyimpanan benih. Manajemen budidaya dan pascapanen yang tepat diperlukan untuk memastikan benih tetap memiliki kualitas yang tinggi meskipun diterpa variabilitas iklim. Pengaruh lingkungan biofisik seperti curah hujan dan temperatur serta proses panen dan pascapanen terhadap kualitas benih sangat signifikan. Hal ini disebabkan oleh faktor-faktor tersebut berpengaruh pada proses fisiologi, perkembangan benih, daya simpan dan viabilitas benih.

1. Curah hujan

- Curah hujan tinggi dapat menyebabkan: 1) panen benih tertunda sehingga mengalami kondisi lewat matang bahkan benih dapat berkecambah di lapangan, 2) meningkatkan risiko serangan jamur dan bakteri (misalnya *Aspergillus* spp., *Fusarium* spp.), menyebabkan kontaminasi mikotoksin dan menurunkan viabilitas benih, 3) pembusukan benih jika pengeringan tidak optimal setelah panen dan 4)

pengurangan pembentukan biji (aborsi biji) pada fase pembungaan dan pengisian biji.

- Curah hujan rendah menyebabkan: 1) cekaman dalam bentuk ketidaktersediaan air, sehingga biji tidak berkembang secara optimal (ukuran kecil, berat rendah), 2) memicu pematangan dini dan menghasilkan benih dengan vigor rendah, 3) mengurangi kandungan nutrisi pada benih, bila terjadi kekeringan saat pengisian biji.

2. Temperatur

- Temperatur tinggi berpengaruh: 1) mempercepat pematangan benih namun mengurangi vigor karena aktivitas metabolisme tidak berjalan secara optimal, 2) menyebabkan kerusakan protein dan enzim dalam benih yang berdampak pada pengurangan daya kecambah, 3) menyebabkan gagal penyerbukan (misalnya pada padi dan jagung), jika temperatur $>35^{\circ}\text{C}$ pada fase pembungaan. Temperatur tinggi disertai kelembapan tinggi, menyebabkan benih mudah terserang jamur penyimpanan.
- Temperatur rendah menyebabkan: 1) perlambatan perkembangan benih, sehingga ukuran maksimal biji tidak mencapai, 2) pada tanaman tropis temperatur $<15^{\circ}\text{C}$ menghambat pembentukan biji pada jagung dan kedelai, 3) Chilling injury pada benih yang disimpan sehingga, mengurangi viabilitas benih.

3. Kombinasi temperatur dan curah hujan dapat mempengaruhi kualitas benih dengan cara 1) meningkatkan aktivitas respirasi benih, 2) memicu pertumbuhan jamur dan serangan hama gudang, dan 3) menyebabkan benih keriput dan memiliki kualitas yang rendah karena kekurangan air pada kondisi ekstrim.

4. Panen dan Pascapanen

Pengaruh panen terhadap kualitas benih dapat ditinjau dari waktu dan metode panen. Waktu panen yang tidak tepat berpengaruh pada 1) benih belum mencapai kematangan fisiologis atau lewat matang, menyebabkan daya kecambah rendah. Contoh: Kedelai yang dipanen saat kadar air $>40\%$ memiliki vigor 20% lebih rendah (Silva et al., 2021). 2) meningkatkan risiko kerontokan biji (pada sereal) dan serangan hama lapangan akibat lambat panen. Metode panen baik secara manual atau menggunakan alat mekanisasi modern (*Combine Harvester*, *Stripper Harvesting*) dapat merusak secara fisik dan sekaligus menambah kotoran pada benih.

Teknik pascapanen (pengeringan, pembersihan dan sortasi serta penyimpanan dapat berpengaruh terhadap kualitas benih, sebagai berikut:

- A. Pengeringan
 - Temperatur pengeringan tinggi (>45 °C), menyebabkan kerusakan membran sel, mengurangi vigor (Farooq et al., 2022). Contoh: Pengeringan jagung pada 50 °C menurunkan daya kecambah 15% (Gerna et al., 2019).
 - Teknologi modern dengan pengeringan Bertahap dengan suhu turun dari 40 °C ke 35 °C) dapat mempertahankan viabilitas (ISTA, 2022). Demikian juga pada teknik pengeringan menggunakan Silika Gel dapat mempertahankan viabilitas benih rekalsitrasi (misalnya: mangga) (Ellis, 2019).
 - Pengeringan alami sinar matahari dengan kondisi kelembaban tinggi, menyebabkan kontaminasi jamur.
- B. Pembersihan dan Sortasi
 - Penyortiran berdasarkan ukuran dan berat, menunjukkan benih yang lebih berat umumnya memiliki vigor lebih tinggi.
 - Penyaringan udara (*air separator*) dapat mengurangi kotoran dan biji hampa, sehingga meningkatkan kemurnian benih.
- C. Penyimpanan, pengaruh penyimpanan benih dapat dilihat pada Tabel 7 berikut:

Tabel 7. Dampak Faktor Penyimpanan Benih

Faktor Penyimpanan	Dampak pada Benih
Kadar Air >12%	Risiko jamur dan respirasi tinggi menyebabkan benih cepat rusak
Temperatur >25 °C	Mempercepat penuaan benih akibat akumulasi radikal bebas
Kemasan Kedap (aluminium foil)	Memperpanjang umur simpan hingga 2× lipat

Sumber: ISTA (2022); Farooq et al. (2022); Bhattacharya (2023)

3.3 Standar Mutu Benih Nasional dan Internasional

Standardisasi mutu benih penting untuk menjamin kualitas, kemurnian, dan daya tumbuh benih yang beredar di pasar. Berikut perbandingan standar nasional (Indonesia) dan internasional terkait kualitas benih:

1. Standar Nasional Benih di Indonesia

Standardisasi mutu benih di Indonesia didasarkan pada Peraturan Menteri Pertanian No. 41/2019 tentang Pemantauan dan Evaluasi Mutu Benih Tanaman dan Standar Nasional Indonesia (SNI) untuk benih berbagai komoditas.

Tabel 8. Parameter Mutu Benih menurut Kementan (2023):

Parameter	Kelas Benih	Standar
Daya Kecambah	Benih Dasar (BD)	$\geq 90\%$
	Benih Pokok (BP)	$\geq 85\%$
	Benih Sebar (BS)	$\geq 80\%$
Kemurnian Fisik	Semua Kelas	$\geq 98\%$
Kadar Air	Padi/Jagung	$\leq 13\%$
	Kedelai	$\leq 12\%$
Benih varietas lain	Maksimal	0,1%

Catatan: Benih Dasar (BD): Diproduksi oleh lembaga penelitian/BPSB; Benih Pokok (BP): Turunan dari BD, diproduksi produsen terdaftar. Benih Sebar (BS): Dijual ke petani.

Sumber: 1) Kementerian Pertanian RI (2023). Pedoman Sertifikasi Benih Tanaman Pangan dan 2) Badan Standardisasi Nasional (BSN). SNI 01-6239-2000: Benih Jagung Hibrida.

2. Standar Internasional Mutu Benih

A. Standar ISTA (International Seed Testing Association)

Standar ini dipakai oleh terutama di Eropa, Amerika, Asia (termasuk Indonesia untuk ekspor).

Tabel 9. Parameter Kualitas Benih menurut Standar ISTA (2023)

Parameter	Standar ISTA
Daya Kecambah	$\geq 85\%$ (untuk kebanyakan benih)
Kemurnian	$\geq 98\%$
Kadar Air	$\leq 10-12\%$ (tergantung komoditas)
Vigor (Uji Tetrazolium)	Wajib untuk benih ekspor
Bebas Patogen	Diuji dengan PCR/ELISA

Catatan: Sertifikasi ISTA terdiri dari 1) *Orange Certificate* untuk perdagangan internasional dan *Blue Certificate* untuk pengujian laboratorium.

Sumber: ISTA (2023)

B. Standar OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development)

Sertifikasi benih ini khusus dipakai untuk negara anggota OECD. Indonesia memakai standar ini untuk dapat mengekspor benih ke Jepang dan Korea).

Tabel 10. Daya Kecambah dan Kemurniaan berdasarkan Kelas Benih

Kelas Benih	Daya Kecambah	Kemurnian
Pre-Basic	≥90%	≥99%
Basic	≥85%	≥98%
Certified	≥80%	≥97%

Sumber: OECD (2022).

C. Standar AOSA (Association of Official Seed Analysts, Amerika Serikat)

- Standar mutu benih yang digunakan di Amerika Serikat dan Kanada.
- Persyaratan mirip ISTA, tetapi lebih ketat untuk benih transgenik.

3. Perbandingan Standar Nasional vs. Internasional

Standardisasi mutu benih antar negara atau kelompok negara, tergantung pada kebijakan negara atau kelompok negara masing-masing. Standar ISTA/OECD lebih ketat untuk ekspor. Indonesia sedang menuju harmonisasi standar dengan ASEAN Seed Quality Assurance. Perbandingan standar nasional dan internasional (ISTA/OECD) sebagai berikut:

Tabel 11. Perbandingan Standar Nasional dan Internasional

Aspek	Indonesia (Kementan)	ISTA/OECD
Daya Kecambah	80–90%	85–90%
Kemurnian	≥98%	≥98–99%
Vigor testing	Tidak wajib	Wajib (ekspor)
Pengujian Patogen	Jarang	Wajib (PCR/ELISA)
Sertifikasi	Label Biru (BS)	Orange/Blue Certificate

Sumber: ISTA (2023); OECD (2022); Standar Nasional Indonesia (SNI)

4. Tantangan Penerapan Standar di Indonesia

- a. Ketidaksesuaian metode pengujian. Beberapa laboratorium di Indonesia belum terakreditasi ISTA.
- b. Rendahnya Kepatuhan Petani: masih banyak benih "lokal" tidak memenuhi SNI.
- c. Biaya sertifikasi mahal, sementara uji vigor dan PCR diperlukan untuk ekspor.

3.4 Penurunan Kualitas Benih: Penyebab dan Pencegahan

Benih merupakan faktor penting dalam pertanian yang menentukan tingkat produktivitas tanaman. Namun, kualitas benih dapat menurun karena pengaruh berbagai faktor, baik selama produksi, penyimpanan, maupun distribusi benih. Penyebab penurunan kualitas benih sebagai berikut:

1. Faktor genetik
 - a. Degradasi genetik akibat perkawinan silang yang tidak terkontrol (*inbreeding depression*).
 - b. Mutasi genetik selama penyimpanan benih dalam waktu lama (Walters et al., 2020).
2. Kondisi penyimpanan yang tidak optimal
 - a. Kelembaban tinggi (>14%) menyebabkan pertumbuhan jamur dan penurunan viabilitas benih (ISTA, 2021).
 - b. Temperatur tinggi (>30°C) mempercepat penuaan benih (seed aging) (Sano et al., 2022).
3. Serangan hama dan penyakit
 - a. Infeksi jamur (*Aspergillus* spp., *Fusarium* spp.) dan bakteri selama penyimpanan (Kumar et al., 2021).
 - b. Serangan serangga gudang seperti *Sitophilus* spp. dan *Tribolium* spp. (FAO, 2020).
4. Kesalahan dalam proses produksi
 - a. Panen tidak tepat waktu menyebabkan viabilitas rendah.
 - b. Pengeringan tidak sempurna (kadar air) sebelum penyimpanan (Copeland & McDonald, 2022).
5. Kontaminasi fisik dan kimia
 - a. Campuran benih varietas lain (*admixture*).
 - b. Paparan pestisida berlebihan merusak embrio benih (Zhang et al., 2023).

Strategi Pencegahan Penurunan Kualitas Benih

1. Penggunaan teknologi penyimpanan modern
 - Penyimpanan dalam wadah kedap udara dengan temperatur 10–15 °C dan kelembaban <10% (ISTA, 2021).
 - Penggunaan silika gel atau kemasan vakum untuk mengurangi kelembaban (Walters et al., 2020).
2. Perlakuan benih (*seed treatment*)
 - Perendaman dalam fungisida (contoh: thiram, carbendazim) untuk mencegah penyakit (Kumar et al., 2021).

- Penggunaan coating benih berbasis biopolimer untuk meningkatkan daya simpan (Zhang et al., 2023).
- 3. Pengujian kualitas benih secara berkala
 - Uji daya berkecambah (*germination test*) sesuai standar ISTA.
 - Uji vigor benih (*accelerated aging test, electrical conductivity test*) (Copeland & McDonald, 2022).
- 4. Manajemen Hama dan Penyakit
 - Fumigasi dengan fosfin untuk mengendalikan serangga gudang (FAO, 2020).
 - Penyimpanan benih dalam ruangan bersih dan bebas kontaminasi.
- 5. Pemilihan Varietas Unggul dan Benih Bersertifikat
 - Penggunaan benih bersertifikat untuk memastikan kemurnian genetik.
 - Rotasi varietas untuk mencegah penurunan genetik.

3.5 Evaluasi Kualitas Benih di Lapangan

Evaluasi kualitas benih di lapangan penting untuk memastikan daya tumbuh (vigor), kemurnian, dan produktivitas benih sebelum digunakan dalam budidaya pertanian. Evaluasi benih secara komprehensif, sebelum penanaman, dapat meningkatkan keberhasilan budidaya tanaman dan memastikan tanaman dapat tumbuh dan berproduksi secara optimal. Beberapa metode evaluasi terhadap parameter untuk menentukan tingkat kualitas benih di lapangan sebagai berikut:

1. Uji daya berkecambah (*germination test*)
 - Dilakukan dengan menanam benih di media terkontrol (kertas filter, pasir, atau tanah) dan menghitung persentase benih yang berkecambah normal (ISTA, 2021).
 - Standar minimum daya berkecambah untuk benih bermutu adalah $\geq 80\%$ (Copeland & McDonald, 2022).
2. Uji vigor benih (*seed vigor test*)
 - Uji perkecambahan cepat (*accelerated aging test*): Benih disimpan dalam kondisi temperatur tinggi (40–45 °C) dan kelembaban tinggi (95–100%) selama 48–72 jam sebelum dikecambahkan untuk menguji ketahanannya (Zhang et al., 2023).
 - Uji Daya Hantar Listrik (*Electrical Conductivity Test*): Mengukur kebocoran elektrolit dari benih yang rusak; nilai konduktivitas tinggi menunjukkan vigor rendah (Sano et al., 2022).
3. Pengamatan pertumbuhan awal di lapangan (*field emergence test*)

- Benih ditanam di lahan aktual, dan persentase munculnya kecambah (*emergence rate*) dihitung setelah 7–14 hari (Kumar et al., 2021).
- Perbedaan antara daya berkecambah laboratorium dan lapangan menunjukkan kualitas vigor benih (FAO, 2020).
- 4. Evaluasi kemurnian benih (*genetic and physical purity*)
 - Pemeriksaan visual atau DNA-based testing untuk memastikan tidak ada campuran varietas lain (ISTA, 2021).
 - Penggunaan barcode atau QR code pada kemasan benih untuk memastikan asal usul (Walters et al., 2020).
- 5. Ketahanan terhadap cekaman lingkungan (*stress tolerance test*)
 - Simulasi kondisi kering (*drought stress test*) atau genangan (*waterlogging test*) untuk menilai adaptasi benih (Sano et al., 2022).

Metode Pengambilan Sampel untuk Evaluasi

- Metode acak berstrata (*stratified random sampling*) untuk memastikan sampel representatif (Copeland & McDonald, 2022).
- Penggunaan teknologi digital seperti analisis citra (*image analysis*) untuk menilai keseragaman benih (Zhang et al., 2023).

DAFTAR PUSTAKA

- Ballesteros, D., et al. (2020). Recalcitrant Seed Preservation: Challenges and Advances.
- Baskin, C. C., & Baskin, J. M. (2011). Seeds: Ecology, Biogeography, and Evolution of Dormancy and Germination (2nd ed.). Academic Press.
- Bewley, J. D., Bradford, K. J., Hilhorst, H. W. M., & Nonogaki, H. (2023). Seeds: Physiology of Development, Germination and Dormancy (4th ed.). Springer Nature.
- Bewley, J.D., et al. (2022). Seeds: Physiology of Development, Germination and Dormancy (4th ed.). Springer.
- Bhattacharya, A. (2023). High-Temperature Impacts on Seed Biochemistry. *Journal of Crop Science*, 18(3), 112–125.
- BSN (2020). SNI Benih Jagung/Padi. <https://www.bsn.go.id>.
- Chen, X., Li, Y., Wang, Z., & Zhang, H. (2022). Advances in Seed Dormancy Mechanisms: A review. *Plant Physiology Journal*, 15(3), 45-60.
- Chen, X., Liu, S., & Huang, M. (2021). Seed Dormancy and Germination: Molecular mechanisms. Academic Press.
- Chen, H., Zhang, L., Wang, Y., Liu, X., & Li, J. (2023). CRISPR for Seed Longevity Enhancement. *Nature Plants*, 9(4), 345-358.
- Chen, J., et al. (2021). "Nanoparticle Desiccants for Seed Moisture Regulation." *ACS Agricultural Science & Technology*, 1(3), 456-465. [DOI:10.1021/acsagscitech.1c00012]
- Copeland LO, MB Mc Donald. 2001. Principles of Seed Sciences and Technology. Minnesota (US): Burgess Publishing Company.
- Copeland, L.O. and McDonald, M.B. (2022). Principles of Seed Science and Technology. 4th edn. June 2002, *Annals of Botany* 89(6):798-798 DOI: [10.1093/aob/mcf127](https://doi.org/10.1093/aob/mcf127)
- Ellis, R.H. (2019). Seed Storage and Longevity. *Seed Science Research*, 29(1), 1–15.
- Ellis, R.H., & Hong, T.D. (2019). "Seed Moisture Content and Storage Stability." *Seed Science Research*, 29(2), 1-12. [DOI:10.1017/S0960258519000034]
- FAO (2020). Seed Storage and Pest Management. Food and Agriculture Organization.
- FAO (2022). Guidelines for Orthodox and Recalcitrant Seed Storage.
- FAO (2022). Hermetic Storage for Seed Preservation. [Link: fao.org/3/cb9370en/cb9370en.pdf]

- FAO (2023). Digital Tools for Seed Quality Assurance.
- Farooq, M., et al. (2019). "Seed Priming Enhances Seedling Vigor in Crops Under Abiotic Stress." *Agronomy Journal*, 111(2), 1-15.
- Farooq, M., et al. (2022). Climate Change and Seed Quality: Impacts and Adaptation Strategies. *Frontiers in Plant Science*, 13, 901–915.
- Farooq, M., et al. (2022). Advances in Seed Drying Technologies. *Frontiers in Plant Science*, 13, 901–915.
- Fatikhasari, Z., Lailaty, I. Q., Sartika, D., dan Ubaidi, M. A. (2022). Viabilitas dan Vigor Benih Kacang Tanah (*Arachis hypogaea* L.), Kacang Hijau (*Vigna radiata* (L.) R. Wilczek), dan Jagung (*Zea mays* L.) pada Temperatur dan Tekanan Osmotik Berbeda. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 27(1), 7–17. <https://doi.org/10.18343/jipi.27.1.7>
- Gerna, D., et al. (2019). Impact of Drying Methods on Seed Viability. *Plant Cell Reports*, 38(5), 789–801.
- International Seed Testing Association, ISTA (2022). International Rules for Seed Testing. Edisi 2022.
- ISTA (2021). International Rules for Seed Testing. International Seed Testing Association.
- ISTA (2023). International Rules for Seed Testing. <https://www.seedtest.org>.
- Kementerian Pertanian Republik Indonesia. (2019). Peraturan Menteri Pertanian Nomor 41 Tahun 2019 tentang Pedoman Penyediaan dan Penyaluran Benih Tanaman Pangan Sumber. Kementerian Pertanian RI. <https://peraturan.bpk.go.id/Home/Details/138599/permentan-no-41-tahun-2019>
- Kumar, A., Singh, B., Yadav, S., Patel, M. K., & Joshi, N. (2023). Oilseed Deterioration During Storage: Role of Moisture and Temperature. *Postharvest Biology and Technology*, 195, 112123
- Kumar, R., Sharma, V., Pandey, A. K., Singh, M., & Kumar, P. (2021). Field-Based Seed Quality Assessment In Modern Agriculture. *Journal of Crop Science*, 12(3), 112-125
- Kumar, R., Gupta, A., Singh, P. K., Sharma, S., & Chakraborty, D. (2021). Seed-Borne Pathogens And Their Management. *Journal of Plant Pathology*, 103(2), 345-360.
- Liu, Y., Wang, X., Zhang, J., Chen, W., & Li, J. (2022). Large Seeds Improve Maize Yield. *Field Crops Research*, 285, 108591. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108591>

- Liu, Y., Wang, H., Zhang, L., Li, S., Chen, J., Yang, X., & Zhao, M. (2022). Seed Size Effects On Maize Yield Components. *Field Crops Research*, 276, 108376. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108376>
- Misra, B. B., Chen, S., Smith, J. P., & Johnson, A. L. (2023). Metabolomic Approaches to Seed Dormancy and Germination. *Plant Physiology*, 192(3), 145-160.
- Navarro, J. A. (2021). Seed Longevity in Dry Storage: Molecular Mechanisms and Preservation Strategies. *Journal of Experimental Botany*, 72(15), 5605-5616. <https://doi.org/10.1093/jxb/erab259>
- OECD (2022). OECD Seed Schemes. <https://www.oecd.org>.
- Rodo, A.B., & Marcos-Filho, J. (2018). "Seed Vigor and Storage: Advances in The Last Decade." *Journal of Seed Science*, 40(3), 221-235.
- Saha, R.R., et al. (2020). "Impact of Moisture on Rice Seed Longevity in Tropical Storage." *Field Crops Research*, 255, 107857.
- Sallon, S., Cherif, E., Chabrilange, N., Solowey, E., & Gros-Balthazard, M. (2020). Origins and Insights Into The Historic Judean Date Palm Based on Genetic Analysis of Germinated Ancient Seeds And Morphometric Studies. *Science Advances*, 6(6). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax0384>
- Sano, N. (2021). Seed Dormancy and Longevity: Physiological and Molecular Mechanisms. *Plant and Cell Physiology*, 62(3), 463-475. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcab016>
- Sano, N., Rajjou, L., North, H. M., Debeaujon, I., Marion-Poll, A., & Seo, M. (2022). Seed Aging and Antioxidant Mechanisms. *Plants*, 11(3), 450. <https://doi.org/10.3390/plants11030450>
- Sano, N., Rajjou, L., North, H. M., Debeaujon, I., Marion-Poll, A., & Seo, M. (2022). Seed Vigor Testing Under Abiotic Stress. *Seed Science Research*, 32(1), 45-58. <https://doi.org/10.1017/S096025852200001X>
- Silva, L. C., Almeida, R. F., Santos, H. O., Oliveira, J. A., & Von Pinho, E. V. R. (2021). Harvest Timing and Soybean Seed Quality. *Journal of Seed Science*, 43(2), e2021430201. <https://doi.org/10.1590/2317-1545v43243245>
- Sutopo L. 1988. *Teknologi Benih*. Jakarta (ID): CV Rajawali
- Vertucci, C. W., & Roos, E. E. (2021). *Seed Storage Physiology: Principles and Practices* (3rd ed.). CABI Publishing.
- Walters, C., Ballesteros, D., & Vertucci, V. A. (2020). Advances in Seed Quality Monitoring. *Frontiers in Plant Science*, 11, 567. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00567>

- Walters, C., Berjak, P., Pammenter, N., Kennedy, K., & Raven, P. (2020). Seed Longevity in Genebanks. *Seed Science Research*, 30(2), 77-89. <https://doi.org/10.1017/S0960258520000239>
- Walters, C., Ballesteros, D., & Vertucci, V. A. (2020). Seed aging: Mechanisms and Implications. In J. D. Bewley, K. J. Bradford, H. W. M. Hilhorst, & H. Nonogaki (Eds.), *Seeds: Physiology of Development, Germination and Dormancy* (5th ed., pp. 345-372). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-030-00000-0_12
- Waterworth, W. M., Footitt, S., Bray, C. M., Finch-Savage, W. E., & West, C. E. (2020). DNA Damage Checkpoint Kinase ATM Regulates Germination and Maintains Genome Stability in Seeds. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(2), 893-902. <https://doi.org/10.1073/pnas.1913242117>
- Zhang, Q., Li, W., Chen, X., Wang, Y., & Liu, Z. (2023). Deep Learning For Seed Size Classification. *Computers and Electronics in Agriculture*, 205, 107591. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107591>
- Zhang, Q., Li, J., Wang, X., Chen, Y., & Liu, H. (2023). Genetic Control of Seed Size in Crops. *Trends in Plant Science*, 28(3), 245-258. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2022.11.003>.

BAB 4

PRODUKSI BENIH

Oleh: Maemunah

4.1 Tinjauan Umum

Benih tidak hanya merupakan struktur biologis yang membawa materi genetik dan memulai pertumbuhan tanaman, tetapi juga simbol kehidupan baru dan harapan akan masa depan. Tanpa benih yang tahan cekaman iklim, pertanian akan terus mengalami kerentanan. Di sinilah pentingnya memahami bagaimana kita mengembangkan, melindungi, dan memanfaatkan benih secara bijak demi kesinambungan kehidupan. Kegiatan pengembangan benih secara bijak dan berkesinambungan akan bermuara pada kegiatan produksi benih yang berkualitas.

Produksi benih berkualitas menjadi kunci utama dalam mendukung ketahanan pangan dan produktivitas pertanian yang berkelanjutan. Benih unggul atau benih berlabel akan menghasilkan tanaman yang seragam, produktif, dan adaptif terhadap perubahan iklim serta serangan hama penyakit. Oleh karena itu, pemahaman mendalam tentang prinsip-prinsip dasar dalam produksi benih menjadi krusial bagi petani, penangkar, dan penyedia benih.

Benih bermutu ataupun disebut benih berlabel harus memenuhi persyaratan genetik, fisik, fisiologis, dan kesehatan. Ini meliputi kemurnian varietas, daya tumbuh tinggi, seragam bentuk dan ukuran, serta bebas dari patogen. Tahapan awal dalam produksi benih meliputi pemilihan benih sumber, isolasi, dan roguing. Isolasi melindungi agar varietas tidak tercemar polen asing; roguing menyingkirkan tanaman "*off-type*" agar keturunan tetap asli. Prosedur ini memastikan kemurnian benih dan meningkatkan dan mempertahankan keseragaman, keunikan dan kestabilan benih agar lolos dalam sertifikasi.

Manajemen pascapanen sangat penting meliputi: pengeringan, sortasi, dan penyimpanan optimal menjaga viabilitas dan vigor benih, jika salah satu dari proses dalam kegiatan pemanenan atau penyimpanannya tidak benar maka akan menurunkan mutu dan masa simpan benih. Produksi benih bukan hanya sekadar teknik dalam menghasilkan benih berkualitas, tetapi merupakan investasi jangka panjang untuk generasi berikutnya. Produksi benih yang benar akan menciptakan kepercayaan pasar, membuka akses teknologi baru,

dan memperkuat daya saing benih. Keberhasilan kegiatan produksi benih akan berdampak langsung terhadap pendapatan petani dan usaha tani yang berkelanjutan menuju industri di bidang perbenihan tanaman. Pemahaman prinsip-prinsip produksi benih maka, petani dan penangkar dapat menghasilkan benih yang sesuai standar nasional maupun internasional berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI) dan International Seed Test Association (ISTA), serta Association of Official Seed Certifying Agencies (AOSCA) menjembatani kebutuhan lokal, dan turut serta dalam pengembangan varietas unggul di Indonesia. Dalam rangka pengembangan dan mensosialisasikan penyediaan benih berlabel maka Tim Pengabdi Fakultas Petanian Universitas Tadulako melakukan kegiatan PKm dengan bekerjasama Kelompok Tani untuk melakukan penangkaran jagung merah sigi (MESI) seperti ditunjukkan pada Gambar 9.

PENANGKARAN BENIH KOMPOSIT JAGUNG MERAH SIGI (MESI) PADA KT. TARA'A NAGAYA



Gambar 9. Rangkaian Kegiatan Penangkaran Jagung Merah Sigi (MESI)

Prinsip-Prinsip Produksi Benih Berkualitas

- 1. Kemurnian Genetik:** Menjaga varietas melalui isolasi jarak dan waktu, serta melakukan roguing berkala.
- 2. Kesehatan Benih:** Menggunakan areal pertanian atau lahan bersih dari patogen, sanitasi alat, dan uji laboratorium.
- 3. Viabilitas dan Vigor:** Panen saat kematangan fisiologis dan perlakuan

pascapanen yang benar. **4. Kualitas Fisik:** Sortasi berdasarkan ukuran, bentuk, warna, dan kadar air yang sesuai standar. **5. Manajemen Lapangan:** Pemupukan, irigasi, dan pengendalian hama terpadu (GAP). **6. Sertifikasi dan Dokumentasi:** Pencatatan teknis, pengawasan, dan penggunaan label sertifikasi benih. Beberapa Contoh Produksi Benih Berkualitas di Indonesia. 1. Jawa – Kabupaten Tulungagung, 2. Kalimantan – Barito Kuala, 3. Sumatra – Lampung Timur, dan 4. Sulawesi Tengah – Kabupaten Sigi: **1.** Kelompok tani penangkar padi menerapkan isolasi varietas dan roguing. Hasil benih sebar bersertifikat dengan daya tumbuh > 90%, **2.** Koperasi penangkar jagung hibrida mendapatkan pelatihan mutu, menerapkan SOP pascapanen, dan berhasil lolos sertifikasi. Benih dipasarkan ke 3 kabupaten, **3.** Penangkar kedelai lokal menggunakan fungisida organik, penjadwalan tanam tepat, dan kontrol gulma. Hasil daya tumbuh naik menjadi 86%, dan **4.** Model komunitas FFS penghasil benih jagung lokal berkualitas tinggi. Didistribusikan melalui program bantu pemerintah daerah.

Tabel 12. Standar Mutu Benih (SNI dan ISTA)

Tanaman	Daya Tumbuh (%)	Kadar Air Maks (%)	Kemurnian (%)
Padi	85	13	98
Jagung	90	13	98
Kedelai	80	12	97
Bawang Merah (umbi)	85	75 (umbi)	95
Kentang (umbi)	90	80 (umbi)	98



Gambar 10. Penangkaran Benih Jagung MESI

4.2 Prinsip Produksi Benih Berkualitas

Produksi benih berkualitas merupakan pilar utama dalam sistem pertanian modern yang berkelanjutan. Benih yang baik akan menghasilkan tanaman yang seragam, produktif, dan tahan terhadap cekaman lingkungan maupun hama penyakit. Oleh karena itu, pemahaman tentang prinsip-prinsip dasar produksi benih menjadi sangat penting bagi petani, penangkar, maupun institusi penyedia benih. Benih yang berkualitas harus memenuhi kriteria kemurnian genetik, daya tumbuh tinggi, bebas dari penyakit, serta memiliki ukuran dan bentuk seragam. Proses produksinya melibatkan penerapan teknologi agronomi yang tepat, seleksi ketat, serta pengawasan berlapis dari lembaga sertifikasi.



Gambar 11. Kegiatan Penangkaran Benih Buah Naga

Prinsip produksi benih berkualitas dimulai dari pemilihan sumber benih yang bersertifikat, penggunaan lahan yang bersih dari varietas lain, serta penerapan jarak isolasi yang memadai. Praktik roguing (pembersihan tanaman menyimpang), pencatatan teknis, dan panen tepat waktu juga merupakan bagian tak terpisahkan dari prinsip mutu benih. Selain itu, perlakuan pascapanen seperti pengeringan, sortasi, pengemasan dan penyimpanan berpengaruh signifikan terhadap daya simpan dan vigor benih. Penggunaan alat yang bersih dan sesuai standar menjadi keharusan dalam menghindari kerusakan fisik atau pencampuran benih. Penerapan prinsip-prinsip ini bukan hanya menjamin mutu produk, tetapi juga meningkatkan kepercayaan konsumen terhadap benih lokal. Dalam konteks ketahanan pangan, benih berkualitas menjadi fondasi keberhasilan dalam mengatasi tantangan perubahan iklim dan peningkatan produktivitas lahan.

Prinsip-Prinsip Teknis Produksi Benih Berkualitas:

1. Kemurnian Genetik: Menjaga identitas varietas melalui isolasi, seleksi ketat, dan penggunaan benih sumber bersertifikat. 2. Kesehatan Benih: Bebas dari kontaminasi penyakit melalui pengelolaan lahan sehat dan pengawasan sanitasi tanaman. 3. Viabilitas dan Vigor: Daya tumbuh tinggi, vigor kuat, diperoleh dari panen tepat waktu dan perlakuan pascapanen yang benar. 4. Kualitas Fisik: Bentuk, ukuran, dan warna seragam dengan kadar air sesuai standar. 5. Pengelolaan Lapangan: Jarak isolasi, pemupukan seimbang, irigasi efisien, dan kontrol gulma/hama secara terpadu. 6. Sertifikasi dan Dokumentasi: Menerapkan Standar Oprasional Prosedur (SOP) dan pencatatan teknis yang diverifikasi oleh pengawas benih.

Beberapa kegiatan penangkaran benih di daerah : **Jawa – Kabupaten Tulungagung**: Kelompok tani penangkar padi menerapkan prinsip isolasi varietas dan roguing ketat, menghasilkan benih bersertifikat kelas 'benih sebar' dengan daya tumbuh tanaman > 90%. **Kalimantan – Kabupaten Barito Kuala**: Produksi benih jagung hibrida oleh koperasi penangkar difasilitasi dengan pelatihan mutu benih dan Standar Oprasional Prosedur (SOP) pascapanen. Hasil benih lolos sertifikasi dan dipasarkan ke tiga (3) kabupaten. **Sumatra – Kabupaten Lampung Timur**: Penangkar kedelai lokal mengoptimalkan jadwal tanam, kontrol gulma, dan perlakuan benih dengan fungisida organik, meningkatkan daya tumbuh tanaman hingga 86%. **Sulawesi Tengah – Kabupaten Sigi**: Penangkar jagung lokal berbasis desa menerapkan pengawasan kelompok dan dokumentasi lapangan, menghasilkan benih berkualitas yang digunakan pada program bantuan benih pemerintah daerah. Untuk penyediaan benih bawang merah varietas lembah palu (*Allium wakegi* Araki), maka Standar Oprasional Prosedur (SOP) untuk menghasilkan benih berkualitas maka dilakukan tahapan-tahapan tertentu seperti dituangkan pada Gambar 12.

4.3 Tahapan Produksi Benih: Pra-Panen Hingga Panen

Produksi benih merupakan suatu proses terstruktur yang mencakup berbagai tahapan teknis mulai dari persiapan pra-panen hingga proses panen. Tahapan ini dirancang untuk menjamin kemurnian genetik, viabilitas, dan mutu fisiologis benih. Dalam sistem produksi modern, perhatian terhadap setiap tahapan menjadi sangat penting, karena kesalahan kecil dapat berdampak besar pada kualitas hasil akhir. Tahapan pra-panen mencakup pemilihan benih sumber, persiapan lahan, penanaman, hingga pengelolaan

tanaman. Di dalamnya termasuk pemupukan, pengairan, pengendalian hama dan penyakit, serta pengawasan ketat terhadap *off-type*. Tahap ini sangat menentukan kualitas benih yang akan dipanen nantinya.



Gambar 12. Rangkaian Kegiatan Penyediaan Benih Bawang Merah Varietas Lembah Palu

Setelah tanaman memasuki fase generatif, monitoring lebih difokuskan pada kematangan benih dan tindakan isolasi yang lebih ketat. Pengamatan terhadap waktu berbunga dan pencatatan produksi sangat penting untuk memastikan keseragaman pertumbuhan dan kematangan panen. Pada saat menjelang panen, identifikasi tingkat kematangan fisiologis menjadi indikator utama untuk menentukan waktu panen yang tepat. Panen yang dilakukan terlalu awal atau terlambat dapat menurunkan daya kecambah dan vigor benih. Panen benih tidak sama dengan panen produk konsumsi. Prosesnya harus memperhatikan perlakuan khusus seperti pemanenan manual, pengumpulan dalam wadah bersih, serta perlakuan pascapanen awal di lapangan. Semua bertujuan untuk mempertahankan integritas dan mutu benih.

Tahapan Produksi Benih: Pra-Panen Hingga Panen

1. Persiapan Benih Sumber: Pengadaan benih dasar bersertifikat dari lembaga resmi, 2. Persiapan Lahan: Pengolahan tanah, pengaturan irigasi, dan pemberian pupuk dasar, 3. Penanaman: Penempatan benih dengan jarak dan kedalaman sesuai rekomendasi varietas, 4. Pengelolaan Tanaman: Meliputi pemupukan lanjutan, pengairan, sanitasi lahan, serta pengendalian hama dan penyakit, 5. Isolasi dan *Roguing*: Penyiangan tanaman *off-type* dan pemantauan jarak isolasi, 6. Pemantauan Kematangan Benih: Pengamatan fase pengisian biji, perubahan warna, dan kematangan fisiologis, 7. Panen: Dilakukan pada saat benih mencapai kematangan fisiologis maksimum, menggunakan alat manual atau mekanis yang tidak merusak benih, 8. Penanganan Pascapanen Awal: Pengumpulan dalam wadah bersih, pengeringan lapangan, dan pengangkutan ke gudang.

Kegiatan Penangkaran dilakukan di beberapa daerah: 1. Jawa – Kabupaten Grobogan: Produksi benih padi inbrida dilakukan oleh kelompok penangkar di lahan sawah irigasi teknis. Panen dilakukan secara selektif berdasarkan kematangan malai dan kadar air menggunakan sabit steril. 2. Kalimantan – Kabupaten Paser: Produksi benih jagung hibrida dilakukan oleh petani mitra Dinas Pertanian. Panen dilakukan setelah kadar air tongkol mencapai 28% dan dilakukan pengeringan dengan dryer lokal. 3. Sumatra – Kabupaten Lampung Timur: Produksi benih kedelai berbasis kelompok tani penangkar dilakukan dengan sistem cabut manual. Penanganan pascapanen awal dilakukan dengan pengeringan bertahap selama tiga (3) hari. 4. Sulawesi Tengah – Kabupaten Sigi: Produksi benih jagung lokal dilakukan melalui model FFS. Panen dilakukan saat kadar air tongkol turun di bawah 30% dengan metode pemotongan dan pengeringan selektif.



Gambar 13. Jagung Merah Sigi (MESI)

Tabel 13. Parameter Panen Benih

Tanaman	Umur Panen (hst)	Kadar Air Panen (%)	Metode Panen
Padi	110–125	20–25	Manual/Sabit
Jagung	90–105	25–30	Kupas Manual, Sekam
Kedelai	75–85	18–20	Panen Cabutan
Bawang Merah	60–70	65–70 (umbi)	Cabut Manual
Kentang	90–100	70–80 (umbi)	Gali Manual atau Alat

4.4 Sistem Produksi Benih Tanaman Imbrida, Hibrida dan Vegetatif

Produksi benih merupakan bagian penting dalam sistem pertanian modern untuk menjamin ketersediaan benih bermutu. Setiap sistem produksi benih baik inbrida, hibrida, maupun vegetatif memiliki metode tersendiri dalam menjamin kemurnian genetik, viabilitas, dan vigor benih tanaman. Benih yang bermutu tidak hanya menentukan keberhasilan pertanaman, tetapi juga mendukung efisiensi input pertanian seperti pupuk dan air, serta ketahanan terhadap cekaman biotik maupun abiotik. Oleh karena itu, keberadaan sistem produksi benih yang terorganisir merupakan fondasi utama dalam mendukung ketahanan pangan nasional.

Dalam sistem produksi benih inbrida, seperti pada padi dan kedelai, penekanan dilakukan pada kemurnian genetik melalui seleksi dan isolasi varietas. Proses ini relatif lebih sederhana karena tanaman yang menyerbuk sendiri lebih mudah dijaga kemurniannya dibanding tanaman menyerbuk silang. Namun, tantangannya tetap ada dalam memastikan tidak terjadi kontaminasi silang, serta mempertahankan daya hasil dan keseragaman fenotipe. Produksi benih inbrida memerlukan pengawasan mutu yang ketat mulai dari benih sumber hingga benih sebar.

Berbeda halnya dengan benih hibrida yang memanfaatkan keunggulan heterosis (*hybrid vigor*), yang diperoleh melalui persilangan antara dua galur murni berbeda. Sistem ini membutuhkan kontrol isolasi (jarak dan waktu) ketat dan manajemen agronomis cermat, termasuk pengelolaan barisan jantan dan betina serta proses detasseling untuk memastikan terjadinya penyerbukan silang yang diinginkan. Meski biaya produksinya relatif lebih tinggi, benih hibrida mampu menghasilkan tanaman dengan produktivitas lebih besar dan resistensi terhadap stres lingkungan lebih baik, menjadikannya pilihan utama

dalam sistem intensifikasi pertanian. Untuk memenuhi kebutuhan bibit berkualitas buah naga maka dilakukan perbanyakan secara vegetatif dan kultur jaringan melalui PKM ditunjukkan pada Gambar 14.



Gambar 14. Penyediaan Bibit Buah Naga

Sementara itu, pada tanaman dengan perbanyakan vegetatif seperti kentang, pisang, dan ubi, tantangan utama bukan pada segregasi genetik, melainkan pada akumulasi patogen dan degradasi fisiologis dari generasi ke generasi. Oleh karena itu, sistem produksi benih vegetatif memerlukan teknologi tinggi seperti kultur jaringan dan sertifikasi bebas penyakit. Tahapan multiplikasi awal di laboratorium hingga produksi massal di lapangan harus dilakukan secara bertahap dan higienis. Tanpa kontrol mutu yang baik, benih vegetatif rentan menyebarkan penyakit sistemik yang mengancam hasil dan keberlanjutan usaha tani.

A. Benih Tanaman Inbrida (Galur Murni)

Contoh tanaman: Padi, kedelai, gandum, **Ciri khas:** *Self-pollinated* (penyerbukan sendiri). **Tahapan utama:** Pemurnian galur murni. Produksi benih dasar (*foundation seed*), produksi benih pokok (*stock seed*), produksi benih sebar (*certified seed*).

B. Benih Tanaman Hibrida

Contoh tanaman: Jagung, tomat, cabai, **Ciri khas:** *Cross-pollinated*, menggunakan dua induk: tetua jantan (R) dan betina (A). **Tahapan utama:** Produksi galur induk (A, B, R), Perbanyakan induk A dan R (B digunakan untuk menjaga A), Persilangan $A \times R \rightarrow$ menghasilkan benih hibrida (F1), Seleksi ketat untuk menjamin kemurnian F1.

C. Benih Tanaman Vegetatif

Contoh tanaman: Kentang, ubi jalar, pisang, **Ciri khas:** Propagasi non-seksual. **Tahapan utama:** Seleksi tanaman induk bebas penyakit, Multiplikasi awal di laboratorium (jaringan), Adaptasi benih vegetatif di rumah kaca, Produksi massal di lapangan, grading, sanitasi, dan pengemasan. Contoh perbanyak tanaman:

1: Produksi Benih Hibrida Jagung di Jawa Tengah Galur A: CMS Line, Galur R: Restorer, Lokasi: Isolasi minimal 400 m, Teknik: Male Detasseling (membuang bunga jantan A), Hasil: 3,2 ton/ha benih F1 berkualitas tinggi, **2: Produksi Benih Vegetatif Kentang di Sumatera Utara** Varietas: Granola. Sumber benih awal: mini tuber dari kultur jaringan, Pendekatan: 2 generasi adaptasi → produksi G1 → sertifikasi, Tantangan: infeksi virus dan kebutuhan sanitasi tinggi, **3. Produksi Benih Padi Gogo Inbrida di Kabupaten Sigi:** Kabupaten Sigi merupakan salah satu daerah sentra padi gogo di Sulawesi Tengah dengan agroekosistem lahan kering dan topografi bergelombang. Ketersediaan benih bermutu merupakan tantangan utama karena petani masih sering menggunakan benih hasil panen sebelumnya. Pada tahun 2022, Dinas Pertanian Kabupaten Sigi bekerja sama dengan BPTP Balitbangtan Sulawesi Tengah dan Kelompok Tani 'Maju Jaya' di Desa Loru melakukan produksi benih inbrida varietas padi gogo lokal unggul (contoh: galur lokal 'Sigi Merah'). Benih sumber diperoleh dari hasil pemurnian galur lokal yang adaptif terhadap kekeringan dan tanah masam. Tahapan: Seleksi dan pemurnian galur lokal melalui seleksi massa; Produksi benih dasar pada musim tanam pertama; Produksi benih sebar pada musim tanam kedua dengan pengawasan POPT dan Balai Benih. Hasil: Produksi benih mencapai 1,8 ton/ha; Benih bersertifikat oleh BPSB dan disebar ke tujuh (7) kecamatan sekitar; Meningkatkan hasil panen petani sebesar 15–20% dibanding benih asal. Contoh kegiatan perbanyak tanaman:

Produksi Benih Vegetatif Bawang Merah Varietas Tinombo di Kabupaten Parigi Moutong: Bawang merah varietas Tinombo adalah varietas lokal unggul dari Parigi Moutong yang memiliki adaptasi baik di dataran rendah. Namun, produksi benih vegetatif masih belum terorganisir sehingga petani sering menggunakan benih sakit dari pasar. Tahun 2023 dilakukan kegiatan demonstration plot dan pendampingan produksi benih vegetatif bermutu oleh Program Pengabdian Universitas Tadulako bekerja sama dengan Kelompok Tani “Tara’a Nagaya”. Tahapan: Identifikasi dan seleksi umbi induk sehat dari petani; Penanaman dalam plot khusus bebas patogen dan penggunaan mulsa jerami; Monitoring, sanitasi lapangan, dan

sortasi umbi pascapanen; Penyimpanan umbi benih dengan ventilasi dan suhu optimal. Hasil: Hasil umbi benih mencapai 12,5 ton/ha; Umbi benih digunakan kembali oleh petani mitra dan dijual sebagai benih antar-kelompok; Petani mulai menyadari pentingnya penggunaan benih sehat dan sistem rotasi benih.

Produksi Benih Jagung Hibrida Lokal di Lembah Palu: Lembah Palu memiliki potensi besar untuk pengembangan jagung hibrida karena intensitas cahaya tinggi dan iklim kering sesuai untuk persilangan. Namun, mayoritas petani belum mengadopsi teknologi produksi benih hibrida karena keterbatasan pelatihan dan input. Pada tahun 2024, sebuah koperasi tani di Desa Wombo, Kecamatan Tanantovea, mencoba produksi benih jagung hibrida menggunakan galur lokal hasil seleksi massal selama tiga tahun terakhir. Strategi: Produksi galur A (CMS) dan R di lokasi terpisah; Penanaman terisolasi dengan pengaturan rasio A:R = 4:1; Pelatihan detasseling dan pemantauan bunga; Panen dan sortasi benih F1. Hasil: Hasil panen benih F1 mencapai 3 ton/ha; Benih menunjukkan vigor tinggi dan hasil tanaman lebih dari 9 ton/ha di lahan petani pengguna; Potensi pengembangan industri benih skala kecil berbasis lokal di wilayah ini (Gambar 12 dan 13).

Tabel 14. Sistem Produksi dan Hasil Perbanyakan secara Inbrida, Hibrida dan Vegetatif

Sistem Produksi	Sumber Benih Awal	Jumlah Pokok/ha	Masa Panen	Rata-rata Hasil Benih
Inbrida (Padi)	Galur Murni	30	± 110 hst	2.5 – 3 ton/ha
Hibrida (Jagung)	Tetua A × R	45	± 100 hst	2.5 – 4 ton/ha
Vegetatif (Kentang)	Mini tuber	22	± 90 hst	10 – 15 ton/ha

4.5 Manajemen Areal dan Isolasi Lahan Benih

Produksi benih yang bermutu sangat bergantung pada manajemen areal yang tepat serta isolasi lahan yang efektif. Manajemen areal mencakup pemilihan lokasi lahan, perencanaan tata letak, pengendalian gulma, hama dan penyakit, serta penerapan teknik agronomi. Isolasi lahan—baik spasial, temporal, maupun penghalang fisik merupakan elemen utama untuk menjaga kemurnian genetik dan mencegah kontaminasi silang antar varietas.

Secara spasial, jarak isolasi diperlukan untuk tanaman penyerbuk silang seperti jagung dan bunga-bunga. Standar jarak berkisar dari puluhan hingga

ratusan meter tergantung jenis tanaman dan kelas benih (benih dasar butuh jarak lebih besar dibanding benih sebar). Sementara isolasi temporal dapat dicapai dengan penanaman bergeser 15–20 hari agar masa bunga tidak bertepatan. Alternatif lain adalah menggunakan penghalang fisik seperti *border crop*, pagar, atau kemasan bunga untuk menghalangi perpindahan serbuk sari.

Manajemen lahan benih juga melibatkan perencanaan pemanfaatan lahan sebelumnya. Lahan harus bebas dari varietas sejenis sebelumnya, diolah secara menyeluruh, serta memiliki sistem irigasi dan drainase yang baik. Pengawasan terhadap rambu batas dan patok agar mudah dievaluasi saat sertifikasi juga merupakan praktik penting. Implementasi manajemen areal dan isolasi yang baik memperkecil risiko penurunan mutu genetik, menjamin kemurnian varietas, dan memudahkan pengecekan mutu oleh lembaga sertifikasi. Standar nasional maupun internasional (ISTA, AOSCA) serta regulasi lokal dijadikan acuan dalam penentuan jarak isolasi dan prosedur inspeksi.

Komponen Manajemen Areal dan Isolasi:

Pemilihan Lokasi: Pilih lahan bergizi, akses air baik, dan jauh dari kebun varietas lain. Idealnya bukan bekas penanaman varietas serupa. **Isolasi**

Spasial: Jarak standar bervariasi, misalnya padi hanya 3 m, jagung bisa mencapai 400–1.000 m tergantung kelas benih. **Isolasi Temporal:**

Penanaman varietas berbeda dilakukan ± 15 –20 hari berbeda agar masa berbunga tidak bersamaan. **Penghalang Fisik:** Gunakan *border crop*, pagar tanaman, atau kantong bunga untuk membatasi penyebaran serbuk sari.

Pengendalian Internal: Termasuk roguing (penyiangan *off-type*), sanitasi tanaman, dan penandaan batas lahan.

Tabel 15. Data Jarak Isolasi

Tanaman	Kelas Benih	Jarak Isolasi (m)
Padi, Gandum	Certified	3
Jagung	Foundation	400
Bunga Matahari	Certified	500
Buncis, Tomat	Certified	25–200
Jagung (GM vs Konv.)	Foundation	1.000

Beberapa model isolasi (Jawa, Kalimantan dan Sulawesi)

1. Kabupaten Sigi – Benih Jagung Hibrida Lokal: Kelompok tani menerapkan isolasi spasial ± 500 m dengan *border crop* gandum tinggi, serta penanaman bergilir ± 20 hari. Hasil menunjukkan kemurnian fenotip ≥ 98 %.

Palu – Produksi Benih Padi Inbrida: Produksi benih dilakukan di lahan bekas varietas berbeda, dengan buffer tanaman jagung 10 m dan jarak isolasi 5 m, serta penggunaan kantong bunga pada saat berbunga. 2. Implementasi: Pemilihan lahan minimal 200 m dari kebun kedelai lain, penanaman bergantian ± 15 hari untuk menghindari fase berbunga bersamaan, buffer crop jagung dan rerumputan, serta roguing rutin, 3. Kabupaten Barito Kuala memanfaatkan sawah rawa untuk produksi padi hibrida. Tantangan utama adalah kelembapan tinggi dan potensi silang dengan varietas lokal yang secara fenotipe mirip. Implementasi: Isolasi spasial ≥ 300 m dari varietas lain, penggunaan buffer crop jagung tinggi, penanaman varietas hibrida 20 hari lebih awal, pemasangan kantong kertas pada bunga betina, dan pengawasan oleh POPT dan BPSB. Hasil: Kemurnian benih hibrida mencapai 97%, produksi benih 3,5 ton/ha, dan benih disalurkan ke 15 desa melalui koperasi desa.

4.6 Peran Petani Penangkar dalam Produksi Benih

Petani penangkar memiliki peran vital dalam sistem perbenihan nasional sebagai ujung tombak produksi benih bermutu. Mereka tidak hanya menghasilkan benih berkualitas, tetapi juga menjaga kesinambungan suplai untuk kebutuhan lokal hingga nasional. Melalui kegiatan penangkaran, petani dapat meningkatkan pendapatan sekaligus berkontribusi terhadap kedaulatan pangan.

Berbeda dengan petani konsumsi, penangkar harus menerapkan protokol ketat seperti isolasi lahan, seleksi benih, dan sertifikasi dari lembaga resmi. Penerapan standar mutu ini mensyaratkan pengetahuan teknis dan pemahaman tentang prosedur mutu agar benih yang dihasilkan memenuhi persyaratan genetik dan fisiologis. Kelompok tani penangkar juga berperan sebagai wadah pembelajaran dan jejaring yang memfasilitasi transfer teknologi dari penelitian ke lapangan. Melalui pertemuan rutin, FFS (Farmer Field School), dan kemitraan dengan lembaga seperti Kementan atau BPSB, mereka meningkatkan kapasitas teknis dan pengelolaan usaha benih. Peran penangkar benih bukan hanya sekadar produsen, tetapi juga agen pengembangan teknologi dan penghubung pasar. Kemitraan dengan industri benih seperti PT Sang Hyang Seri menciptakan peluang berupa dukungan sarana produksi, jaminan pasar, dan harga beli yang kompetitif.

Adapun peran utama petani penangkar antara lain sebagai berikut:

1. Unit Produksi Benih Unggul: Petani penangkar menanam benih sumber dan mengelola mutu mulai dari penanaman hingga panen, sesuai standar sertifikasi.
2. Kelas Pembelajaran dan Teknologi: Kelompok penangkar berfungsi sebagai pusat pelatihan tentang kultur benih, isolasi, roguing, dan pascapanen.
3. Wahana Kerjasama dan Kemitraan: Penangkar tergabung dalam kemitraan strategis yang mendukung akses permodalan, input, hingga jaminan pasar.
4. Unit Pemasaran: Kelompok penangkar bertanggung jawab menjual benih ke petani pengguna, institusi, atau industri secara berkelanjutan. Beberapa contoh kegiatan penangkaran: Model FFS komunitas memperkuat produksi benih jagung lokal dan bawang merah lokal dengan hasil berkualitas tinggi dan distribusi lokal yang efektif.



Gambar 15. Pengembangan dan penelitian perbenihan bawang merah lokal

DAFTAR PUSTAKA

- Balai Pengawasan dan Sertifikasi Benih. (2022). Pedoman Teknis Produksi dan Sertifikasi Benih.
- Copeland, L. O., & McDonald, M. B. (2023). Principles of Seed Science and Technology. Springer.
- FAO. (2022). Seed System Development: Good Practices, Options and Tools.
- ISTA. (2024). International Rules for Seed Testing. Zurich.
- Kementerian Pertanian RI. (2023). SNI 6729: Standar Mutu Benih Pangan dan Hortikultura.
- Maemunah et al. (2024). Penangkaran Benih Jagung MESI. Jurnal AKM.
- Maemunah et al. (2015). The Influence of Storage on Shallot Seed Quality. IJARBS, 2(1): 158–164.
- McDonald, M. B., & Copeland, L. O. (2023). Seed Production Principles. Springer.
- Singh, R. K., & Chaudhary, B. D. (2020). Elements of Plant Breeding. Kalyani Publishers.
- Sopia et al. (2024). Peran Kelompok Penangkar di Ciamis. Jurnal Penyuluhan Pertanian, 14(2), 99–106.
- Zainuddin B. et al. (2018). Produksi Bibit Buah Naga. Agroland, 25(2):106–111.
- Universitas Tadulako. (2023). Laporan Pengabdian: Produksi Benih Bawang Merah Varietas Tinombo.
- Direktorat Perbenihan Hortikultura. (2022). Petunjuk Teknis Produksi Benih Kentang Bebas Penyakit.
- BPS Indonesia. (2023). Statistik Perbenihan Nasional.
- Kumar, P., & Yadav, V. K. (2017). Seed Production in Vegetables. Indian Journal of Agricultural Sciences, 87(5), 612–618.

BAB 5

TEKNOLOGI PEMULIAAN TANAMAN DAN BENIH

Oleh: Sakka Samudin

5.1 Pemuliaan Tanaman Berbasis Bioteknologi

5.1.1 Rekayasa Genetika dan Pemanfaatan CRISPR/Cas9

Pemuliaan tanaman berbasis bioteknologi telah mengalami lompatan besar sejak diperkenalkannya teknologi penyuntingan gen yang presisi seperti CRISPR/Cas9. Teknologi ini memungkinkan pemulia untuk melakukan perubahan spesifik pada genom tanaman tanpa harus melalui proses persilangan konvensional yang memakan waktu. CRISPR/Cas9 (Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats/CRISPR-associated protein 9) bekerja dengan memanfaatkan enzim Cas9 yang diarahkan oleh RNA pemandu (guide RNA) untuk memotong DNA pada lokasi target secara spesifik, sehingga dapat dilakukan editing atau penyisipan gen yang diinginkan (Impens et al., 2022).

Aplikasi CRISPR/Cas9 pada tanaman telah banyak dikembangkan untuk meningkatkan ketahanan terhadap penyakit, toleransi terhadap cekaman abiotik, serta memperbaiki kualitas gizi dan hasil panen. Sebagai contoh, pada tanaman padi, gen OsSWEET yang berperan dalam kerentanan terhadap penyakit hawar daun bakteri dapat disunting sehingga tanaman menjadi lebih tahan (Zafar et al., 2020). Keunggulan lain dari teknologi ini adalah kemampuannya menghasilkan varietas baru tanpa menyisipkan DNA asing, yang secara regulasi dapat dikategorikan berbeda dari transgenik.

5.1.2 Transfer Gen dan Tanaman Transgenik

Salah satu tonggak utama dalam bioteknologi tanaman adalah keberhasilan transfer gen lintas spesies atau antar organisme yang berbeda secara taksonomi, menghasilkan tanaman transgenik. Proses ini memungkinkan masuknya sifat-sifat unggul dari organisme lain ke dalam genom tanaman sasaran yang sebelumnya tidak tersedia secara alami dalam pool gen tanaman tersebut. Teknik ini telah diterapkan secara luas, contohnya pada kapas Bt (*Bacillus thuringiensis*) yang mengandung gen toksin terhadap hama penggerek batang.

Tanaman transgenik juga telah dikembangkan untuk tujuan lain, seperti ketahanan terhadap herbisida (misalnya kedelai tahan glifosat), peningkatan kualitas gizi (seperti Golden Rice yang diperkaya beta-karoten), dan ketahanan terhadap cekaman lingkungan. Meski memberikan potensi besar bagi ketahanan pangan dan efisiensi produksi, keberadaan tanaman transgenik masih menjadi perdebatan di beberapa wilayah, terutama terkait isu keamanan lingkungan, kesehatan, dan hak kepemilikan benih.

5.1.3 Etika dan Regulasi dalam Bioteknologi Pemuliaan

Kemajuan dalam teknologi bioteknologi tanaman juga menimbulkan berbagai implikasi etis dan regulatif yang harus ditangani secara hati-hati. Etika pemuliaan bioteknologi menekankan pentingnya prinsip kehati-hatian (precautionary principle), tanggung jawab ilmiah, serta penghormatan terhadap biodiversitas dan kearifan lokal. Kecemasan publik terhadap risiko tersembunyi, efek jangka panjang terhadap ekosistem, serta monopoli teknologi oleh korporasi besar menuntut regulasi yang ketat dan transparan (Singh et al., 2023).

Di Indonesia, pengaturan bioteknologi diatur melalui Undang-Undang No. 21 Tahun 2004 tentang Keamanan Hayati Produk Rekayasa Genetika dan diperkuat oleh Peraturan Pemerintah dan Peraturan Menteri Pertanian terkait uji keamanan hayati, pangan, dan pakan. Sementara secara global, Cartagena Protocol on Biosafety menjadi acuan penting dalam lalu lintas lintas batas GMO (organisme hasil modifikasi genetik), yang mengatur prinsip persetujuan atas dasar informasi awal (*Advance Informed Agreement*) serta manajemen risiko.

Implementasi teknologi seperti CRISPR yang tidak selalu menghasilkan DNA asing (*non-transgenic gene editing*) memunculkan tantangan baru dalam regulasi. Oleh karena itu, banyak negara sedang melakukan penyesuaian kebijakan untuk membedakan antara OGM dan hasil penyuntingan gen yang tidak melibatkan transgenesis.

5.2 Marker-Assisted Selection (MAS) dan Genomic Selection

5.2.1 Prinsip Dasar Marker Molekuler

Marker molekuler merupakan segmen DNA yang dapat digunakan sebagai penanda untuk mengidentifikasi keberadaan alel atau gen tertentu dalam genom tanaman. Prinsip dasar dari penggunaan marker ini adalah adanya keterkaitan antara marker (penanda) dengan gen target melalui hubungan *linkage disequilibrium*. Marker yang digunakan biasanya berupa

sekuens DNA spesifik, seperti *Simple Sequence Repeat* (SSR), *Single Nucleotide Polymorphism* (SNP), dan *Amplified Fragment Length Polymorphism* (AFLP), yang dapat diidentifikasi melalui teknik PCR, elektroforesis, atau *sequencing* (Collard & Mackill, 2008).

Keunggulan dari marker molekuler adalah kemampuannya untuk mendeteksi genotipe secara akurat bahkan sebelum fenotipe tanaman berkembang. Dengan demikian, pemulia dapat melakukan seleksi genetik secara lebih awal, efisien, dan bebas dari pengaruh lingkungan. Penerapan teknologi ini memfasilitasi identifikasi tanaman dengan alel unggul untuk sifat-sifat kompleks seperti ketahanan penyakit, toleransi kekeringan, dan kualitas hasil (Varshney et al., 2021).

5.2.2 Aplikasi MAS dalam Seleksi Cepat Varietas Unggul

Marker-Assisted Selection (MAS) memungkinkan pemulia untuk memilih individu yang memiliki gen atau alel unggul dengan cara mendeteksi marker molekuler yang telah diketahui asosiasinya. Dalam praktiknya, MAS digunakan pada tahap awal seleksi untuk mengurangi jumlah tanaman yang perlu diuji di lapangan. Hal ini sangat efektif dalam mempercepat proses pengembangan varietas baru, terutama untuk sifat-sifat kuantitatif yang dikendalikan oleh banyak gen (*polygenic traits*) (Xu et al., 2020).

Contoh nyata dari aplikasi MAS adalah pengembangan varietas padi IR64 yang tahan terhadap penyakit hawar daun bakteri (*bacterial blight*) dengan menyisipkan gen Xa21 menggunakan marker yang terkait langsung dengan gen tersebut. Di tanaman kedelai, gen Rhg1 dan Rhg4 yang berkontribusi terhadap ketahanan terhadap nematoda telah berhasil digunakan dalam MAS untuk meningkatkan produktivitas. Selain itu, MAS juga dapat diterapkan dalam *backcross breeding* untuk mempertahankan latar belakang genetik tanaman elite sambil memasukkan sifat spesifik dari donor.

5.2.3 Integrasi Seleksi Genomik dalam Pemuliaan Modern

Genomic Selection (GS) merupakan pendekatan lanjutan dari MAS yang memungkinkan prediksi nilai pemuliaan (*genomic estimated breeding value* atau GE BV) berdasarkan informasi dari seluruh marker genom, tanpa harus mengetahui gen target spesifik. GS menggunakan model statistik berbasis data genotipe dan fenotipe dari populasi pelatihan untuk membangun prediktor yang akurat (Crossa et al., 2017).

Dalam pemuliaan tanaman modern, GS menjadi sangat relevan terutama pada tanaman dengan siklus hidup panjang atau sifat yang sangat kompleks seperti hasil panen, kualitas, dan ketahanan terhadap cekaman iklim.

Penerapan GS telah berhasil mempercepat program pemuliaan gandum dan jagung di berbagai negara karena mampu mengidentifikasi individu dengan GEBV tinggi sejak generasi awal, sebelum evaluasi lapangan dilakukan. Integrasi GS dengan teknik *high-throughput phenotyping* dan *machine learning* menjanjikan efisiensi seleksi yang lebih tinggi dan presisi dalam mengatasi tantangan global seperti perubahan iklim dan kebutuhan pangan.

5.3 Teknologi Kultur Jaringan untuk Perbanyakan dan Regenerasi

5.3.1 Teknik Mikropropagasi dan Embriogenesis Somatik

Kultur jaringan tanaman merupakan teknik perbanyakan *in vitro* yang memanfaatkan sifat totipotensi sel tanaman. Salah satu metode yang paling luas diterapkan adalah mikropropagasi, yaitu teknik memperbanyak tanaman melalui eksplan (jaringan kecil) dalam lingkungan aseptik pada media buatan. Mikropropagasi memiliki beberapa tahapan, yaitu: inisiasi, multiplikasi tunas, elongasi, dan aklimatisasi. Proses ini memungkinkan perbanyakan tanaman dalam jumlah besar secara seragam dalam waktu singkat (Oyinkanola et al., 2023).

Di samping itu, embriogenesis somatik menawarkan metode regenerasi tanaman yang lebih efisien dengan menginduksi sel somatik untuk membentuk embrio yang menyerupai embrio zigotik. Embriogenesis ini dapat berlangsung secara langsung dari eksplan atau tidak langsung melalui tahap kalus. Keunggulannya terletak pada potensi regenerasi tinggi, kemampuan kriopreservasi, dan aplikasinya dalam sistem suspensi sel untuk produksi metabolit sekunder atau bahan genetik (Salaün et al., 2021). Dalam tanaman kelapa sawit, kakao, dan kopi, embriogenesis somatik terbukti meningkatkan efisiensi regenerasi dibandingkan teknik konvensional.

5.3.2 Peran Kultur Jaringan dalam Konservasi dan Pemuliaan

Kultur jaringan memiliki kontribusi strategis dalam konservasi sumber daya genetik tanaman, khususnya untuk spesies langka, endemik, atau yang sulit diperbanyak secara generatif. Teknik *in vitro* ini memungkinkan penyimpanan jangka panjang melalui *slow-growth storage* atau *cryopreservation*, tanpa mengganggu keutuhan genetik tanaman. Dalam upaya pelestarian plasma nutfah, kultur jaringan berfungsi sebagai sistem pendukung konservasi *ex situ* yang bersifat aman dan efisien.

Selain perannya dalam konservasi, kultur jaringan juga menjadi alat penting dalam pemuliaan tanaman modern. Misalnya, dalam pemuliaan

berbasis mutasi, kultur kalus digunakan sebagai target mutagenesis untuk meningkatkan keragaman genetik. Selanjutnya, regenerasi tanaman hasil mutasi dapat dilakukan melalui embriogenesis somatik. Teknik ini juga kompatibel dengan pemuliaan berbantuan marker (*marker-assisted breeding*) dan transformasi genetik karena mampu menyediakan bahan tanaman homogen yang siap untuk seleksi atau rekayasa (Adlak et al., 2023).

5.3.3 Manfaat Kultur Jaringan untuk Produksi Benih Bebas Penyakit

Salah satu keunggulan teknologi kultur jaringan adalah kemampuannya dalam menghasilkan benih bebas penyakit, khususnya untuk tanaman yang diperbanyak secara vegetatif seperti kentang, pisang, tebu, dan vanili. Dengan memanfaatkan meristem atau jaringan apikal yang bebas dari virus, mikroorganisme patogen, dan infeksi sistemik lainnya, kultur jaringan memungkinkan produksi benih sumber berkualitas tinggi. Proses ini juga diperkuat dengan penggunaan media selektif dan teknik termoterapi *in vitro* untuk mengeliminasi patogen internal (Gosal & Wani, 2018).

Keberhasilan produksi benih bebas penyakit sangat penting dalam sistem pertanian modern, karena secara langsung berkontribusi terhadap peningkatan produktivitas dan kualitas hasil. Di berbagai negara, sistem sertifikasi benih berbasis kultur jaringan telah diterapkan untuk menjamin ketelusuran asal-usul dan kesehatan benih. Selain itu, teknologi ini memberikan solusi bagi negara tropis yang sering menghadapi serangan penyakit tular benih.

5.4 Digitalisasi dan Otomatisasi dalam Produksi Benih

5.4.1 Penggunaan Sensor, Drone, dan Kecerdasan Buatan (AI) untuk Monitoring Pertanaman

Perkembangan teknologi digital telah menghadirkan transformasi signifikan dalam sistem pertanian, khususnya dalam pemantauan tanaman penghasil benih. Pemanfaatan sensor tanah, kamera multispektral pada drone, serta algoritma kecerdasan buatan (AI) memungkinkan monitoring pertanaman secara *real-time* dan presisi tinggi. Sensor dapat mendeteksi parameter vital seperti suhu, kelembaban, pH tanah, dan kandungan nitrogen, sementara drone dilengkapi dengan citra NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) untuk menilai vigor dan kesehatan tanaman (Sishodia et al., 2020).

Kecerdasan buatan memperkuat sistem ini dengan kemampuan menganalisis big data secara cepat untuk mendeteksi stres tanaman, mengidentifikasi penyakit dini, hingga memprediksi waktu panen optimal.

Integrasi antara AI dan Internet of Things (IoT) membentuk sistem pertanian cerdas (smart farming), yang sangat berguna dalam produksi benih karena menjamin kualitas, ketepatan waktu, dan efisiensi penggunaan input (Dhanaraju *et al.*, 2022). Dengan demikian, proses seleksi dan perbanyakan benih dapat dilakukan secara lebih adaptif terhadap kondisi lingkungan yang dinamis.

5.4.2 Otomatisasi Proses Grading, Pengemasan, dan Pelabelan Benih

Tahapan pascapanen dalam produksi benih, seperti grading, pengemasan, dan pelabelan, kini semakin mengadopsi sistem otomatis untuk meningkatkan efisiensi dan akurasi. Teknologi grading berbasis sensor optik dan kamera resolusi tinggi digunakan untuk memisahkan benih berdasarkan ukuran, bentuk, warna, dan tingkat kematangan secara presisi. Mesin-mesin ini telah dilengkapi dengan perangkat lunak berbasis AI yang mampu belajar dari data benih untuk meningkatkan akurasi klasifikasi secara berkelanjutan (Pandey *et al.*, 2013).

Dalam proses pengemasan dan pelabelan, sistem robotik dan *conveyor-based* telah digunakan secara luas untuk mengurangi ketergantungan pada tenaga kerja manual serta menekan tingkat kesalahan. Label benih kini juga mengintegrasikan kode QR dan RFID (*Radio-Frequency Identification*), yang memuat informasi tentang varietas, asal usul, nomor lot, serta tanggal kadaluwarsa benih. Inovasi ini memperkuat ketertelusuran (*traceability*) dan keamanan mutu benih di sepanjang rantai pasok (Patil & Gawande, 2022).

5.4.3 Sistem Informasi dan Manajemen Rantai Pasok Benih

Rantai pasok benih merupakan sistem kompleks yang melibatkan produsen, pengolah, distributor, hingga pengguna akhir. Untuk mengelola kerumitan ini, diterapkan Sistem Informasi Manajemen Benih (*Seed Management Information System/SMIS*) yang berbasis cloud dan terintegrasi dengan sistem logistik digital. SMIS memungkinkan pemantauan stok, prediksi permintaan, pengaturan distribusi, dan pelacakan mutu benih secara menyeluruh (Paul *et al.*, 2020).

Sistem ini juga mendukung pengambilan keputusan berbasis data (*data-driven decision making*), di mana semua entitas dalam rantai pasok (termasuk petani penangkar, balai benih, dan lembaga pengawas) dapat berinteraksi secara digital. Selain efisiensi administratif, digitalisasi rantai pasok benih juga berperan penting dalam mencegah pemalsuan benih dan memperkuat kepercayaan pasar terhadap produk benih bersertifikat. Dalam konteks

ketahanan pangan, sistem ini mendukung distribusi benih unggul secara cepat dan merata ke berbagai wilayah.

5.5 Teknologi Adaptif terhadap Perubahan Iklim

5.5.1 Pemuliaan Berbasis Iklim (*Climate-Smart Breeding*)

Perubahan iklim global telah menimbulkan dampak signifikan terhadap produktivitas pertanian, termasuk frekuensi kekeringan, suhu ekstrem, dan ketidakpastian musim tanam. Menyikapi hal ini, pendekatan *climate-smart breeding* menjadi strategi utama dalam pengembangan varietas tanaman yang tidak hanya produktif tetapi juga tangguh terhadap perubahan lingkungan. Climate-smart breeding mengintegrasikan prinsip ketahanan iklim ke dalam program pemuliaan melalui pemanfaatan data agroklimat, proyeksi iklim jangka panjang, dan pemodelan spasial untuk memilih lokasi uji yang relevan dengan skenario iklim masa depan (Ngongolo & Mmbando, 2024).

Dalam praktiknya, pendekatan ini menekankan pengujian multilokasi di zona-zona iklim rentan dan pemilihan genotipe yang menunjukkan stabilitas hasil dan efisiensi input pada lingkungan suboptimal. Penerapan teknologi pendukung seperti *Geographic Information System* (GIS), sensor pertanian presisi, dan data iklim historis memperkuat akurasi seleksi. Dengan demikian, climate-smart breeding bukan hanya reaktif terhadap dampak perubahan iklim, tetapi bersifat proaktif dan prediktif dalam menghasilkan varietas unggul yang sesuai dengan dinamika ekosistem pertanian.

5.5.2 Identifikasi Gen Ketahanan terhadap Cekaman Lingkungan

Langkah fundamental dalam pemuliaan adaptif adalah identifikasi gen atau *Quantitative Trait Loci* (QTL) yang berperan dalam ketahanan terhadap cekaman abiotik seperti kekeringan, salinitas, dan suhu tinggi. Pendekatan ini memanfaatkan teknologi *genotyping-by-sequencing* (GBS), *whole-genome sequencing*, dan *association mapping* untuk menyingkap hubungan antara keragaman genetik dengan performa agronomis di lingkungan ekstrem.

Sebagai contoh, pada tanaman padi telah diidentifikasi QTL qDTY yang berkontribusi terhadap hasil panen tinggi di bawah kondisi kekeringan. Gen DREB (*Dehydration Responsive Element Binding*) juga diketahui memainkan peran penting dalam regulasi ekspresi gen saat terjadi cekaman kekeringan dan suhu tinggi. Identifikasi dan validasi gen ini memungkinkan pengembangan marker molekuler yang sangat berguna dalam seleksi berbantuan marker (MAS), sehingga mempercepat proses pemuliaan dengan ketepatan tinggi (Xu et al., 2020).

5.5.3 Pengembangan Varietas Adaptif dan Efisien Input

Varietas adaptif adalah tanaman yang tidak hanya mampu bertahan dalam kondisi lingkungan yang tidak menentu, tetapi juga menunjukkan efisiensi dalam penggunaan input seperti air, pupuk, dan pestisida. Hal ini sangat penting dalam mendukung pertanian berkelanjutan dan memperkecil jejak lingkungan (*ecological footprint*). Pengembangan varietas seperti ini memerlukan pendekatan integratif antara genetika, agronomi, dan ekofisiologi tanaman (Gaynor et al., 2017).

Contoh konkret adalah pengembangan varietas gandum dan jagung yang memiliki efisiensi nitrogen tinggi, sehingga tetap produktif meskipun dalam kondisi pemupukan rendah. Dalam konteks kekeringan, tanaman yang memiliki efisiensi penggunaan air (*Water Use Efficiency – WUE*) tinggi menjadi prioritas. Penerapan teknologi fenotiping digital (seperti citra termal dan hiperspektral) telah mendukung seleksi karakter adaptif dengan lebih presisi. Dengan demikian, pengembangan varietas efisien input sekaligus menjadi solusi untuk ketahanan iklim dan ketahanan pangan jangka panjang.

5.6 Pemanfaatan Big Data dan Bioinformatika dalam Pemuliaan Tanaman

5.6.1 Peran Big Data dalam Pengelolaan Informasi Genetik dan Fenotipik

Dalam pemuliaan tanaman modern, data dalam jumlah besar (baik genetik maupun fenotipik) menjadi fondasi utama untuk pengambilan keputusan seleksi yang lebih presisi. Big data mencakup kumpulan informasi dari sekuensing genomik, ekspresi gen, hingga citra fenotipik beresolusi tinggi. Data ini dikumpulkan dari berbagai sumber termasuk pengamatan lapang, laboratorium molekuler, serta platform phenotyping otomatis, yang kemudian dianalisis dan diinterpretasikan untuk mengidentifikasi hubungan antara genotipe dan fenotipe.

Pengelolaan informasi tersebut memerlukan infrastruktur komputasi yang memadai, serta sistem penyimpanan dan integrasi data yang terstandar. Data lake dan database relasional digunakan untuk menyimpan data genetik seperti SNP (Single Nucleotide Polymorphisms), sementara sistem berbasis IoT dan penginderaan jauh digunakan untuk menangkap dinamika fenotip tanaman dalam lingkungan nyata. Integrasi data multisumber ini memungkinkan pemulia mengakses informasi tanaman secara holistik dalam berbagai tahap pertumbuhan dan di berbagai kondisi lingkungan.

Selain itu, kemampuan untuk mengolah dan menganalisis data berskala besar secara real-time telah meningkatkan efisiensi dalam pengambilan keputusan seleksi. Hal ini penting dalam menghadapi tantangan perubahan iklim dan kebutuhan pasar yang dinamis. Menurut (Varshney et al., 2021), pendekatan berbasis big data dapat mempercepat seleksi varietas hingga 30–40% dibandingkan metode konvensional, dengan tetap menjaga akurasi seleksi yang tinggi.

5.6.2 Analisis Data Omik (Genomik, Transkriptomik, Proteomik, dan Metabolomik)

Data omik merujuk pada kumpulan informasi yang diperoleh dari studi menyeluruh terhadap biomolekul dalam sistem biologis, mencakup genomik, transkriptomik, proteomik, dan metabolomik. Dalam konteks pemuliaan tanaman, data genomik digunakan untuk identifikasi marker molekuler dan analisis asosiasi genotipe-fenotipe. Transkriptomik, di sisi lain, memberikan gambaran ekspresi gen dalam berbagai kondisi lingkungan, yang dapat dijadikan dasar seleksi terhadap cekaman abiotik atau biotik.

Proteomik dan metabolomik memainkan peran penting dalam memahami mekanisme adaptasi tanaman terhadap stres dan respons fisiologis terhadap perlakuan tertentu. Kombinasi dari keempat pendekatan omik memungkinkan pemulia tanaman untuk menelusuri jalur biosintetik dan regulasi gen yang kompleks. Misalnya, dalam studi terhadap ketahanan kekeringan pada padi, integrasi data transkriptom dan metabolit dapat mengungkap senyawa penting yang berperan dalam toleransi air terbatas (Roychowdhury et al., 2023).

Analisis multi-omik yang terintegrasi kini difasilitasi oleh perangkat lunak bioinformatika berbasis AI dan machine learning, seperti *integrative omics viewer* (IOV) dan *Cytoscape*. Pendekatan ini memperkuat kemampuan prediktif dan menyajikan informasi sistemik yang tidak terlihat dalam satu jenis data saja. Dengan pendekatan holistik, pemulia dapat merancang strategi pemuliaan yang lebih adaptif dan berbasis fungsi biologis.

5.6.3 Pemodelan Prediktif dan Desain Varietas Berbasis Data

Pemodelan prediktif dalam pemuliaan tanaman berbasis big data kini menjadi pendekatan strategis untuk merancang varietas yang optimal di berbagai agroekosistem. Dengan menggunakan algoritma *machine learning* seperti *random forest*, *support vector machine* (SVM), dan *deep neural networks* (DNN), pemulia dapat memprediksi performa varietas dari data genotip dan lingkungan. Model ini mampu menangkap interaksi kompleks antara gen dan

lingkungan ($G \times E$), yang seringkali tidak tertangkap oleh analisis konvensional.

Selain prediksi performa, pemodelan ini juga dapat digunakan dalam desain varietas baru dengan pendekatan backward breeding, di mana target agronomis ditentukan lebih dahulu, lalu ditelusuri kombinasi genetik yang paling mendekati karakter tersebut. Teknologi ini didukung oleh pengembangan peta genom referensi dan panel genotipe besar yang digunakan dalam simulasi pemuliaan. Seperti ditunjukkan oleh Xu et al. (2020), pendekatan ini dapat meningkatkan efisiensi pemuliaan hingga 50% dalam program berbasis genomic selection.

Desain varietas berbasis data tidak hanya mempercepat siklus pemuliaan, tetapi juga memungkinkan respons cepat terhadap dinamika pasar dan perubahan iklim. Dengan memanfaatkan data agroklimat jangka panjang dan model prediksi produksi, varietas yang dirancang dapat disesuaikan dengan kebutuhan wilayah tertentu secara presisi. Ini merupakan tonggak penting dalam pengembangan pertanian presisi dan berkelanjutan.

5.7 Sistem Produksi Benih Berbasis *Community Seed Bank* dan Benih Hibrida

5.7.1 Peran *Community Seed Bank* dalam Konservasi dan Distribusi Benih Lokal

Community seed bank (CSB) merupakan inisiatif akar rumput yang dikembangkan oleh petani dan komunitas lokal untuk mengonservasi, mengelola, dan mendistribusikan benih-benih lokal yang memiliki nilai adaptif tinggi terhadap kondisi agroekologi setempat. Dalam konteks perubahan iklim dan erosi genetik, CSB menjadi sarana penting dalam mempertahankan keragaman genetik varietas tradisional, yang sering kali terabaikan dalam sistem produksi benih komersial. Dengan pendekatan partisipatif, petani diberdayakan untuk mengelola koleksi benih, melakukan seleksi, dan berbagi benih dengan sesama anggota komunitas.

Keberadaan CSB tidak hanya mendorong konservasi in situ, tetapi juga memperkuat ketahanan benih di tingkat lokal. Model ini telah terbukti efektif di berbagai negara berkembang, termasuk Indonesia, Nepal, dan Ethiopia, di mana komunitas petani mengalami peningkatan akses terhadap benih bermutu yang sesuai dengan preferensi lokal. Di sisi lain, CSB menjadi wahana penting dalam mempertahankan pengetahuan tradisional mengenai benih dan teknik budidaya yang telah terbukti secara turun-temurun (Vernooij et al., 2015).

Lebih jauh, CSB juga memainkan peran strategis dalam mendukung distribusi benih secara merata dan cepat pada saat krisis seperti gagal panen atau bencana alam. Dalam konteks ini, CSB menjadi simpul distribusi darurat yang efisien dan relevan secara lokal. Kelebihan ini menjadikan CSB sebagai mitra potensial dalam sistem produksi benih nasional yang inklusif dan berkelanjutan.

5.7.2. Pengembangan dan Produksi Benih Hibrida Skala Lapangan

Benih hibrida menjadi salah satu pilar peningkatan produktivitas pertanian melalui pemanfaatan heterosis (vigor hibrida) yang dihasilkan dari persilangan dua galur unggul. Produksi benih hibrida di lapangan memerlukan sistem yang terorganisir dengan baik, termasuk manajemen isolasi, sinkronisasi berbunga, dan kontrol mutu. Dalam konteks tanaman seperti jagung, padi, dan sayuran, produksi benih hibrida telah menunjukkan hasil yang lebih tinggi secara signifikan dibandingkan varietas inbrida (Prasanna et al., 2021).

Namun, tantangan utama dalam produksi benih hibrida adalah keterbatasan kapasitas petani lokal dalam mengakses teknologi produksi, serta kerumitan teknis dalam proses produksi benih bersertifikat. Oleh karena itu, diperlukan model kemitraan antara lembaga penelitian, swasta, dan petani produsen benih untuk memperluas skala produksi hibrida. Program pelatihan, sertifikasi, dan penyediaan sarana pendukung menjadi kunci untuk menjamin mutu dan keberlanjutan sistem produksi benih hibrida di tingkat lapangan.

Di banyak negara, termasuk Indonesia, program pemuliaan varietas hibrida diarahkan untuk menghasilkan varietas adaptif terhadap lingkungan tropis dengan potensi hasil tinggi. Pemanfaatan teknologi pemuliaan berbasis marker juga telah mulai diterapkan untuk mempercepat pengembangan parental lines unggul yang stabil. Dengan kombinasi pendekatan konvensional dan molekuler, efisiensi produksi benih hibrida dapat ditingkatkan secara signifikan di masa depan.

5.7.3 Strategi Pelestarian Varietas Lokal melalui Pendekatan Partisipatif

Pelestarian varietas lokal tidak dapat dilepaskan dari partisipasi aktif petani sebagai pelaku utama dalam sistem produksi dan penyebaran benih. Pendekatan partisipatif dalam konservasi varietas lokal menempatkan petani sebagai mitra sejajar dalam proses pemuliaan, pemilihan, dan pelestarian varietas yang sesuai dengan kondisi lokal. Strategi ini dikenal sebagai *participatory plant breeding* (PPB), yang telah diterapkan secara luas dalam berbagai sistem pertanian subsisten dan marginal.

Melalui PPB, varietas lokal mengalami proses seleksi berkelanjutan di bawah tekanan lingkungan nyata dan sistem budidaya petani sendiri, sehingga menghasilkan populasi yang adaptif dan stabil secara genetik. Selain itu, kegiatan seperti festival benih, sekolah lapang, dan pemetaan varietas lokal memperkuat peran sosial budaya dalam menjaga keberlanjutan varietas tradisional. Keberhasilan PPB sangat dipengaruhi oleh penghargaan terhadap kearifan lokal dan penguatan kelembagaan petani.

Dengan kombinasi pendekatan teknologi dan kearifan lokal, strategi pelestarian varietas lokal tidak hanya relevan untuk konservasi genetik, tetapi juga sebagai alternatif produksi benih yang berorientasi pada ketahanan pangan lokal. Integrasi antara CSB, PPB, dan sistem benih nasional menjadi kunci untuk membangun sistem produksi benih yang adil, adaptif, dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Adlak, T. *et al.* (2023) 'Biotechnological Approaches for Genetic Improvement of Crops', *Cutting Edge Research in Biology Vol. 7*, (April), pp. 64–85. Available at: <https://doi.org/10.9734/bpi/cerb/v7/5376c>.
- Collard, B.C.Y. and Mackill, D.J. (2008) 'Marker-assisted selection: An approach for precision plant breeding in the twenty-first century', *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1491), pp. 557–572. Available at: <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2170>.
- Crossa, J. *et al.* (2017) 'Genomic Selection in Plant Breeding: Methods, Models, and Perspectives', *Trends in Plant Science*, 22(11), pp. 961–975. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2017.08.011>.
- Dhanaraju, M. *et al.* (2022) 'Smart Farming: Internet of Things (IoT)-Based Sustainable Agriculture', *Agriculture (Switzerland)*, 12(10), pp. 1–26. Available at: <https://doi.org/10.3390/agriculture12101745>.
- Gaynor, R.C. *et al.* (2017) 'A two-part strategy for using genomic selection to develop inbred lines', *Crop Science*, 57(5), pp. 2372–2386. Available at: <https://doi.org/10.2135/cropsci2016.09.0742>.
- Gosal, S.S. and Wani, S.H. (2018) 'Biotechnologies of Crop Improvement', *Biotechnologies of Crop Improvement*, 1, pp. 1–497. Available at: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-78283-6>.
- Impens, L. *et al.* (2022) 'Mini-Review: Transgenerational CRISPR/Cas9 Gene Editing in Plants', *Frontiers in Genome Editing*, 4(February), pp. 1–6. Available at: <https://doi.org/10.3389/fgeed.2022.825042>.
- Ngongolo, K. and Mmbando, G.S. (2024) 'Harnessing biotechnology and breeding strategies for climate-resilient agriculture: pathways to sustainable global food security', *Discover Sustainability*, 5(1). Available at: <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00653-0>.
- Oyinkanola, L.O.A. *et al.* (2023) 'On the physical significance and di-electric response of Castor oil processed in Nigeria as transformer insulating fluid', VIII(2454), pp. 60–66. Available at: <https://doi.org/10.51584/IJRIAS>.
- Pandey, N., Krishna, S. and Sharma, S. (2013) 'Automatic Seed Classification by Shape and Color Features using Machine Vision Technology', *International Journal of Computer Applications Technology and Research*, 2(2), pp. 208–213. Available at: <https://doi.org/10.7753/ijcatr0202.1023>.
- Patil, K.P. and Gawande, M. (2022) 'Fruits and Vegetables Grading Using Digital Image Processing Techniques', *Interantional Journal of Scientific*

- Research in Engineering and Management*, 06(01), pp. 1–4. Available at: <https://doi.org/10.55041/ijsrem11471>.
- Paul, P.K. *et al.* (2020) ‘Cloud Computing Vis-à-Vis Agricultural Development towards Digital and Smarter Agricultural Informatics Practice’, *Asian Journal of Engineering and Applied Technology*, 9(1), pp. 18–24. Available at: <https://doi.org/10.51983/ajeat-2020.9.1.1083>.
- Prasanna, B.M. *et al.* (2021) ‘Beat the stress: breeding for climate resilience in maize for the tropical rainfed environments’, *Theoretical and Applied Genetics*, 134(6), pp. 1729–1752. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00122-021-03773-7>.
- Roychowdhury, R. *et al.* (2023) ‘Multi-Omics Pipeline and Omics-Integration Approach to’, *Genes* [Preprint].
- Salaün, C., Lepiniec, L. and Dubreucq, B. (2021) ‘Genetic and molecular control of somatic embryogenesis’, *Plants*, 10(7). Available at: <https://doi.org/10.3390/plants10071467>.
- Singh, K., Zeeshan, Z. and Karna, S. (2023) ‘The Regulation of Biotechnology: Ethical, Legal, and Social Implications’, *Interdisciplinary Studies in Society, Law, and Politics*, 2(3), pp. 44–50. Available at: <https://doi.org/10.61838/kman.isslp.2.3.6>.
- Sishodia, R.P., Ray, R.L. and Singh, S.K. (2020) ‘Applications of remote sensing in precision agriculture: A review’, *Remote Sensing*, 12(19), pp. 1–31. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs12193136>.
- Varshney, R.K. *et al.* (2021) ‘Designing Future Crops: Genomics-Assisted Breeding Comes of Age’, *Trends in Plant Science*, 26(6), pp. 631–649. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2021.03.010>.
- Vernooy, R., Shrestha, P. and Sthapit, B. (2015) *Community seed banks: Origins, evolution and prospects*, *Community Seed Banks: Origins, Evolution and Prospects*. Available at: <https://doi.org/10.4324/9781315886329>.
- Xu, Y. *et al.* (2020) ‘Enhancing Genetic Gain through Genomic Selection: From Livestock to Plants’, *Plant Communications*, 1(1), p. 100005. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.xplc.2019.100005>.
- Zafar, K. *et al.* (2020) ‘Precise CRISPR-Cas9 Mediated Genome Editing in Super Basmati Rice for Resistance Against Bacterial Blight by Targeting the Major Susceptibility Gene’, *Frontiers in Plant Science*, 11(June), pp. 1–11. Available at: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00575>.

BAB 6

TEKNOLOGI PENGOLAHAN BENIH

Oleh: Muhammad Sahbudin

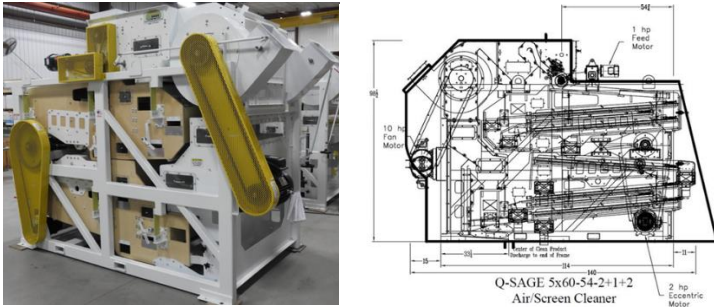
6.1 Pembersihan dan Pemisahan Benih

Pembersihan benih merupakan kegiatan yang dilakukan untuk membersihkan benih dari kotoran yang tercampur baik itu kulit, daging atau bagian benih sehingga diperoleh benih yang bersih dan berkualitas tinggi. Pembersihan dan Pemisahan benih dilakukan untuk menjamin kualitas benih sdari kotoran atau benda asing lain seperti tangkai, kulit daun atau akar yang tidak dikehendaki.

Proses pembersihan dilakukan untuk memisahkan antara benih yang berkualitas dan benih yang kualitasnya tidak sesuai dengan standar (rusak), proses pembersihan benih juga bertujuan untuk memisahkan kotoran dengan benih dan benda asing lainnya. Pembersihan dan pemisahan pada benih umumnya dilakukan untuk memisahkan antara kotoran dengan benih terutama pada benih yang berukuran kecil sehingga meminimalisir kontaminasi dengan pathogen saat berkecambah. Benih yang bermutu setelah melalui proses pembersihan dan pemisahan dengan kotoran akan menghasilkan benih yang memiliki ketahanan atau vigor tanaman di awal pertumbuhan dan produksi yang tinggi. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penggunaan benih dengan mutu yang tinggi dapat meningkatkan produksi tanaman secara signifikan.

Pada penanganan pascapanen salah satu tahap yang harus dilakukan yaitu pembersihan benih, pembersihan benih dibagi menjadi beberapa tahap yaitu *Precleaning* yaitu aktivitas yang dilakukan setelah perontokan atau ekstraksi benih karena pada tahap ini potensi benih bercampur dengan benda asing lain sangat tinggi sehingga dilakukan pembersihan atau pemisahan benda asing saja, selanjutnya *basic cleaning* alat yang digunakan untuk *basic cleaning* pada dasarnya sama dengan *precleaning* namun saringan yang digunakan lebih halus daripada sebelumnya, hal ini dilakukan untuk memisahkan materi lain yang masih bercampur pada benih. Proses terakhir yaitu *post cleaning* tahap ini dilakukan apabila pada *basic cleaning* masih ada benda asing yang masih terlewatkan karena memiliki ukuran yang sama, pada *post cleaning* alat yang digunakan memiliki parameter yang lebih teliti seperti warna dan berat jenis

pada benih. Setelah melalui tahapan proses ini maka benih akan memiliki potensi kemurnian yang sangat tinggi.



Gambar 16. Alat Pembersih benih Clipper (*the air screen cleaner*) dan *winnower machine*

Clipper (*Air-Screen Cleaner*) merupakan alat pembersih benih yang bekerja melalui kombinasi pengayakan mekanis dan pemisahan aerodinamik. Proses diawali dengan memasukkan benih kotor ke dalam hopper, kemudian benih dialirkan ke serangkaian saringan bergetar yang tersusun berlapis. Saringan atas dengan mesh besar akan menyaring kotoran berukuran besar seperti ranting atau biji yang terlalu besar, sementara saringan bawah menyaring partikel kecil seperti biji pecah atau kotoran halus. Benih dengan ukuran optimal akan lolos melalui saringan dan masuk ke tahap pemisahan udara, dimana blower menghasilkan aliran udara untuk membuang partikel ringan seperti debu, kulit benih, atau biji hampa berdasarkan perbedaan berat jenis. Benih bersih kemudian terkumpul dalam wadah khusus, sementara kotoran terbuang melalui saluran terpisah. Alat ini sangat efektif untuk benih dengan ukuran relatif seragam seperti padi, gandum, atau jagung.



Gambar 17. Alat Pembersih benih *winnower machine*

Winnower Machine adalah alat pembersih benih yang mengandalkan prinsip aerodinamika dan gravitasi untuk memisahkan benih dari kotoran. Benih kotor yang dimasukkan melalui corong akan jatuh bebas melalui aliran udara yang dihasilkan oleh kipas sentrifugal. Perbedaan berat jenis menyebabkan material terpisah secara alami, benih bernas yang lebih berat akan jatuh langsung ke wadah penampung, sementara kotoran ringan seperti sekam, debu, atau biji hampa akan terbawa aliran udara ke kompartemen terpisah. Berbeda dengan Clipper yang menggunakan saringan, Winnower tidak memiliki komponen penyaring sehingga lebih cocok untuk benih berukuran kecil dan ringan seperti biji bunga matahari, sawi, atau tanaman herbal. Kedua alat ini saling melengkapi dalam industri pembersihan benih, dimana pemilihannya tergantung pada karakteristik benih dan jenis kotoran yang perlu dipisahkan.

6.2 Pengeringan Benih: Metode dan Alat

Pengeringan benih merupakan salah satu cara untuk menurunkan kadar air benih melalui pemberian energi panas, pengeringan dapat dilakukan dengan cara konvensional dengan menggunakan energi matahari atau menggunakan mesin. Pengeringan dilakukan untuk memperoleh mutu benih yang baik. Pada proses pengeringan benih harus dilakukan sampai kadar air tertentu seperti yang ditetapkan oleh PERMENTAN 12 tahun 2018 tentang standar mutu benih. Namun, tidak semua jenis benih dapat dikeringkan. Beberapa benih dapat dikeringkan hingga kadar air rendah dan tetap dapat disimpan dalam waktu yang lama; benih seperti benih ortodoks (jenis benih yang dapat bertahan dalam kondisi kering dan dingin untuk waktu yang lama). Setelah dikeringkan, benih ortodoks akan memasuki fase dormansi, namun tetap dapat berkecambah jika berada dalam kondisi lingkungan yang sesuai.

Sebaliknya, terdapat benih yang tidak dapat dikeringkan hingga kadar air rendah dan tidak dapat disimpan lama, yang dikenal sebagai benih rekalsitran, jika benih rekalsitrans dikeringkan sampai kadar air rendah maka akan mati. Pengerangan bertujuan untuk memperpanjang masa simpan benih karena kandungan kadar air benih menentukan masa simpan benih seperti yang ditunjukkan pada Tabel 16.

Tabel 16. Jenis benih dan waktu penyimpanannya

Jenis Tanaman	Kandungan Air Saat Panen (%)	Kandungan Air untuk Penyimpanan (%)	
		1 Tahun	5 Tahun
Jagung	14 – 30	13	11
Gandum	17	13 – 14	11-12
Sorgum	10 – 20	12	10-11
Padi	16 – 24	14	-
Kedelai	20	11	10
Rumput Makanan Ternak	70 – 80	15 – 20	15

Metode pengeringan yaitu secara konvensional dengan mengandalkan cahaya alami dari matahari (*sun drying*) kerap kali digunakan karena penggunaan energi matahari memiliki kelebihan dari segi biaya yang relatif lebih murah dan memiliki kapasitas yang besar (tergantung kebutuhan) namun pengeringan konvensional masih sangat bergantung pada cuaca yang fluktuatif sehingga tidak bisa dilakukan secara kontinu. Selain itu, pengeringan langsung memiliki kelemahan yakni benih yang dikeringkan dapat terkontaminasi dengan benda asing sehingga memerlukan biaya tambahan untuk melakukan penyortiran kembali.

Pengeringan benih dengan menggunakan alat pengering (*artificial drying*) memiliki banyak kelebihan dibandingkan dengan pengering konvensional, pengering benih mekanik hanya memerlukan waktu yang lebih singkat dibandingkan dengan konvensional. Selain itu suhu dapat di control dan kadar air benih dapat merata, tidak bergantung pada iklim dan mudah diawasi dalam pelaksanaannya. Hal ini dapat meningkatkan produktivitas pengeringan benih secara konvensional. Alat dan mesin pengering mekanik dapat dilihat pada Tabel 17.

Tabel 17. Alat dan mesin pengering mekanik

No	Nama Alat	Prinsip Kerja	Kapasitas	Sumber Energi
1	Flat Bed Dryer	Aliran udara panas dihembuskan melalui lapisan benih	500-2000 kg/batch	Listrik/solar/biomassa
2	Fluidized Bed Dryer	Benih mengambang dalam aliran udara panas	1-5 ton/jam	Listrik/gas
3	Bin Dryer	Udara panas dialirkan dari bawah silo penyimpanan	5-20 ton	Listrik/biomassa
4	Tray Dryer	Benih ditaruh di baki, udara panas bersirkulasi	100-500 kg/batch	Listrik/panas matahari
5	Rotary Dryer	Drum berputar memutar benih dengan udara panas	2-10 ton/jam	Gas/solar

6.3 Sortasi, Grading, dan Pengemasan

6.3.1 Sortasi

Sortasi benih adalah kegiatan yang dilakukan untuk memisahkan antara benih yang baik (bermutu) dengan bahan lainnya berdasarkan ukuran, bentuk, berat dan kualitas benih. Dalam proses sortasi hasil panen dapat dipisahkan menjadi benih murni, kotoran benih, benih tanaman lain, dan biji gulma. Pada setiap komoditas benih memiliki standar mutu masing-masing tergantung pada jenis benih. Kegiatan sortasi memiliki peran yang krusial karena Ketika sortasi tidak dilakukan dengan optimal maka akan berakibat pada benih tidak dapat disertifikasi. Sortasi juga bertujuan untuk meningkatkan kualitas benih serta memastikan benih berkualitas tinggi sehingga pada saat penanaman benih memiliki potensi tumbuh secara optimal.

Sortasi benih merupakan tahapan penting dalam penanganan pascapanen yang bertujuan mempertahankan kualitas benih dari aspek fisik, fisiologis, maupun genetik. Proses ini melibatkan seleksi benih untuk memisahkan benih berkualitas baik (bernas) dengan benih rusak serta material pengotor. Pada benih makro, proses sortasi relatif lebih mudah dilakukan karena ukuran benih yang besar. Metode konvensional seperti pemilihan

manual masih efektif digunakan, sementara pemisahan kotoran dapat dibantu dengan alat sederhana seperti blower atau teknik pengipasan. Berbeda dengan benih makro, sortasi benih mikro menghadapi tantangan lebih kompleks. Kesulitan utama terletak pada ukuran benih yang sangat kecil dan massa jenis material pengotor yang hampir mirip dengan benih itu sendiri, sehingga memerlukan teknik dan alat khusus untuk proses pemisahannya.

Metode sortasi konvensional dapat dilakukan dengan memanfaatkan aliran udara lingkungan dan prinsip perbedaan densitas, di mana benih akan terpisah dari kotoran yang lebih ringan akibat pengaruh gravitasi dan kecepatan udara.



Gambar 18. Sortasi padi secara konvensional

Selain secara konvensional, proses sortasi juga dapat dilakukan menggunakan alat mekanis seperti seed cleaner, yang mampu memisahkan benih dari kotoran berdasarkan ukuran, berat jenis, dan sifat aerodinamisnya.



Gambar 19. Alat sortasi mekanis *seed cleaner*

6.3.2 Grading

Grading merupakan proses pemilahan atau pengelompokan benih berdasarkan kualitas, bentuk, dan ukuran benih, sehingga benih dapat

diklasifikasikan berdasarkan mutu dan kualitasnya. Proses ini sangat penting dalam industri perbenihan karena membantu memastikan bahwa hanya benih terbaik yang digunakan untuk penanaman. Dengan melakukan grading, petani atau produsen benih dapat memisahkan benih unggul dari benih yang cacat atau kurang baik, sehingga hasil produksi lebih optimal.

Tahapan grading biasanya dilakukan setelah proses sortasi, yaitu pemilihan benih berdasarkan kriteria dasar seperti kebersihan dan keutuhan benih. Setelah sortasi selesai, benih kemudian dikelompokkan lebih lanjut melalui grading berdasarkan sifat fisik benih, seperti bobot, warna, ukuran, panjang, dan bentuk. Pengelompokan ini memungkinkan distribusi benih yang lebih merata dan sesuai dengan standar kualitas yang ditetapkan. Misalnya, benih dengan ukuran seragam cenderung memiliki daya tumbuh yang lebih konsisten dibandingkan benih yang ukurannya bervariasi.

a) Pengelompokan atas dasar panjang benih

Tujuan pengelompokan ini yaitu untuk mendapatkan benih benih yang panjangnya sesuai dengan standar dan memisahkan benih yang lebih pendek, pecah atau patah, serta menghilangkan biji gulma yang masih ada, pengelompokan panjang benih menggunakan alat pemisah seperti *indented cylinder separator*, *disk separator*. Alat-alat pengelompok ini mampu mengangkat benih atau benda-benda yang lebih pendek dari benih. Alat *indented cylinder separator* biasanya digunakan untuk benih sereal sedangkan *disk separator* digunakan untuk benih jagung.

b) Pengelompokan benih berdasarkan lebar dan tebal benih

Pada pertanian modern kebutuhan benih menjadi spesifik seperti lebar dan tebal benih, hal ini dilakukan untuk metode penanaman benih menggunakan alat mekanik pada pertanian skala besar. Pengelompokan benih menggunakan alat *graders* atau *sizers*. *Graders* biasa digunakan untuk benih yang kecil sedang maupun besar. Alat ini pada dasarnya memiliki lubang pada ayakan yang dapat disesuaikan dengan lebar dan ketebalan dari benih tersebut.

c) Pengelompokan benih berdasarkan tekstur permukaan benih

Pada pembersihan benih (*seed cleaning*) kemungkinan benih yang pecah kulitnya atau benih yang keriput belum terpisah dari benih. Benih dengan permukaan seperti ini perlu dipisahkan sehingga benih dengan susunan permukaan kulit yang baik sesuai dengan standar. Alat pengelompokan ini biasanya menggunakan alat *velvet roll separator*.

d) Pengelompokan benih berdasarkan berat

Pada tahap ini benih yang masih tercampur dengan kotoran seperti gumpalan tanah dan kerikil yang masih bercampur karena ukuran dan warnanya yang sama akan dipisahkan menggunakan alat gravity separation.

e) Pengelompokan benih berdasarkan warna

Pengelompokan benih berdasarkan warna bertujuan untuk menyeragamkan benih dengan warna tertentu untuk menjamin kualitas benih dan menjadi daya tarik bagi konsumen, alat yang digunakan untuk pengelompokan benih berdasarkan warna yaitu *color separation*. Alat ini dilengkapi dengan empat sensor pemotret yang dapat bekerja secara otomatis untuk mengklasifikasikan benih berdasarkan warna, dengan alat ini akan dapat mengelompokkan benih dengan warna baik, sedang dan kurang baik.

Tujuan utama dari grading adalah untuk menghasilkan benih yang seragam dan berkualitas tinggi. Benih yang seragam memudahkan dalam penanaman, perawatan, dan panen, sehingga meningkatkan produktivitas pertanian. Selain itu, benih berkualitas juga memiliki viabilitas dan vigor yang lebih baik, yang pada akhirnya berpengaruh terhadap hasil panen. Dengan demikian, grading tidak hanya bermanfaat bagi produsen benih, tetapi juga bagi petani dan konsumen yang menginginkan hasil pertanian yang optimal.

Dengan adanya proses grading, industri perbenihan dapat menjaga standar mutu benih yang dihasilkan, sekaligus mendukung keberlanjutan sektor pertanian. Oleh karena itu, penerapan teknik grading yang tepat sangat diperlukan untuk memastikan benih yang beredar di pasaran memenuhi kriteria kualitas yang diharapkan.

6.3.3 Pengemasan

Pengemasan benih merupakan tindakan yang dilakukan untuk membungkus benih dengan tujuan untuk memberikan lingkungan mikro yang optimal agar benih terhindar dari pengaruh faktor lingkungan selama proses penyimpanan benih berlangsung. Pada prinsipnya pengemasan dilakukan untuk menjaga kadar air dan proses respirasi benih tetap rendah dan tidak dipengaruhi oleh perubahan lingkungan disekitar (suhu dan kelembaban).

Pengemasan benih dapat diartikan juga sebagai perlakuan untuk melindungi fisik benih supaya daya tumbuh dan berkecambah benih tetap baik., oleh karena itu bahan pengemasan benih harus tahan terhadap kerusakan dan tidak mudah robek sehingga tidak menimbulkan kerugian dalam proses penyimpanan benih. Teknologi pengemasan biasanya

menggunakan bahan seperti karton, katun, kertas pembungkus bertimah, film, dan logam atau seng, dengan bahan tersebut dapat dibuat dalam bentuk kotak atau kantong-kantong pengemas yang memenuhi persyaratan. Pengemasan bisa dilakukan dengan beberapa alat mekanis seperti *automatic seed packing machine*, *vertical form fill seal (VFFS) machine for seeds*, dan *vacuum sealing machine for seeds*.

6.4 Teknologi Pengolahan Modern dan Tradisional

Seiring berkembangnya teknologi pengolahan benih mengalami transformasi yang signifikan, proses yang sebelumnya dilakukan secara manual dan sederhana kini telah bertransformasi menjadi system yang lebih efisien dan terintegrasi melalui penggunaan teknologi modern.

6.4.1 Teknologi Tradisional

Teknologi tradisional dalam pengolahan benih biasanya dilakukan oleh petani atau pengusaha UMKM yang memiliki keterbatasan modal atau akses terhadap peralatan modern. Pengolahan benih secara tradisional umumnya masih mengandalkan tenaga manusia dalam berbagai tahapan proses seperti, pengeringan, sortasi, grading, dan pengemasan.



Gambar 20. Pengeringan secara konvensional

Kegiatan ini dilakukan secara manual tanpa bantuan mesin, sehingga sangat bergantung pada keterampilan dan ketelitian pekerja. Pengeringan benih biasanya dilakukan secara alami dengan cara menjemurnya di bawah sinar matahari, yang meskipun ekonomis, sangat dipengaruhi oleh kondisi cuaca. Sortasi benih dilakukan secara manual menggunakan ayakan sederhana atau berdasarkan pengamatan visual untuk memisahkan benih dari kotoran atau benih yang tidak memenuhi standar mutu. Selain itu, proses pemisahan dan pembersihan benih juga dilakukan dengan metode tradisional seperti

menampi atau mengayak, yang meskipun efektif dalam skala kecil, memiliki keterbatasan dalam hal efisiensi dan konsistensi hasil.

6.4.2 Teknologi Modern

Teknologi modern dalam pengolahan benih telah merevolusi industri perbenihan dengan mengintegrasikan peralatan mekanis canggih, sistem otomatis, dan solusi digital yang secara signifikan meningkatkan efisiensi operasional dan konsistensi mutu produk. Berbagai inovasi teknologi seperti *seed processing plant* terintegrasi, mesin grading otomatis berbasis *computer vision*, pengering mekanis dengan kontrol suhu presisi, serta sistem pembersihan benih berkecepatan tinggi telah menjadi standar baru dalam industri. Teknologi mutakhir ini tidak hanya mampu meningkatkan kapasitas produksi hingga skala industri tetapi juga memberikan efisiensi waktu yang luar biasa melalui proses yang terotomatisasi dan mengurangi ketergantungan pada tenaga kerja manual. Selain itu, sistem kontrol kualitas digital yang terintegrasi memungkinkan monitoring real-time dan penjaminan mutu yang lebih akurat dan konsisten. Namun demikian, implementasi pendekatan modern ini menghadapi tantangan utama berupa biaya investasi awal yang sangat tinggi, termasuk biaya peralatan, instalasi, pelatihan operator, dan pemeliharaan sistem, yang seringkali menjadi kendala bagi usaha kecil dan menengah di sektor perbenihan.

Tabel 18. Perbandingan Teknologi tradisional dan modern

Aspek	Teknologi Tradisional	Teknologi Modern
Efisiensi	Rendah	Tinggi
Biaya awal	Rendah	Tinggi
Skala produksi	Kecil	Besar
Mutu hasil	Variatif	Seragam

Dalam praktiknya, kombinasi antara pendekatan tradisional dan modern dapat digunakan secara strategis, terutama di daerah yang sedang berkembang. Adaptasi teknologi secara bertahap menjadi solusi ideal agar efisiensi dan mutu benih dapat ditingkatkan tanpa mengabaikan konteks lokal.

6.5 Keselamatan dan Higienitas dalam Pengolahan

Keselamatan dan higienitas dalam pengolahan benih merupakan proses kritis yang menentukan kualitas dan produktivitas benih. Untuk memastikan

benih yang diproduksi bebas dari kontaminasi dan kerusakan maka diperlukan penerapan prinsip keselamatan dan higienitas yang ketat.

6.5.1 Keselamatan dalam pengolahan benih

Keselamatan merupakan prioritas utama dalam proses pengolahan benih, terutama ketika melibatkan penggunaan bahan kimia berbahaya seperti fungisida, herbisida, pestisida, atau zat pengawet benih. Penerapan standar keamanan yang ketat sangat penting untuk melindungi pekerja dari risiko keracunan, iritasi kulit, gangguan pernapasan, atau paparan jangka panjang yang dapat membahayakan kesehatan.

Pekerja wajib menggunakan Alat Pelindung Diri (APD) atau peralatan K3 (Kesehatan dan Keselamatan Kerja) yang lengkap sesuai dengan standar OSHA (Occupational Safety and Health Administration) dan peraturan lokal. Selain itu, setiap pekerja harus mendapatkan pelatihan K3 sebelum menangani bahan kimia, termasuk:

- Cara penggunaan APD yang benar.
- Teknik pertolongan pertama jika terjadi paparan berbahaya.
- Prosedur darurat saat terjadi tumpahan atau kecelakaan kerja.

6.5.2 Higienitas dalam pengolahan Benih

Benih yang baru dipanen atau belum dibersihkan dapat membawa kotoran, patogen, atau biji gulma. Oleh karena itu, harus ada pemisahan yang jelas antara benih kotor dan benih yang sudah diproses untuk mencegah kontaminasi silang. Wadah penyimpanan harus dalam kondisi steril dan tertutup rapat. Monitor kelembaban dan suhu ruang penyimpanan (ideal: RH 40-60%, suhu 10-15 °C untuk benih ortodoks). Alat-alat pengolahan seperti mesin pembersih, pengering, dan pengayak harus dicuci dan disterilkan sebelum digunakan untuk mencegah transfer penyakit dari satu batch benih ke batch lainnya.

Beberapa benih juga memerlukan perlakuan kimia seperti fungisida atau pestisida untuk mencegah serangan penyakit. Penggunaan bahan kimia harus sesuai dosis yang direkomendasikan dan dihindari pencampuran bahan yang berpotensi berbahaya. Penyimpanan bahan kimia harus dilakukan di tempat tertutup, jauh dari jangkauan pekerja dan area pengolahan benih untuk mencegah kontaminasi tidak sengaja.

DAFTAR PUSTAKA

- Alfarabi, E.A., Diaguna, R. and Suhartanto, M.R. (2024) 'Sortasi Ukuran Benih Jagung Manis Varietas Arinta IPB dan Verona IPB untuk Meningkatkan Mutu Fisiologis', *Jurnal Agrosains Dan Teknologi*, 9(2), pp. 70–79.
- Despita, R. and Nizar, A. (2019) 'Teknologi Produksi Benih Tanaman.
- Kartasapoetra A, G. 2003. 'Teknologi Benih Pengolahan Benih dan Tuntunan Praktikum'. Jakarta: Rineka Cipta.
- Santoso, E., Depriansyah, A.Y. and Lestari, A.T. (2020) 'Perakitan Portable Seed Cleaner Pada Benih Berukuran Kecil', *Prosiding Seminar Nasional Penerapan IPTEKS II*, 1(1), pp. 113–117.
- Setiawan, R.B., Indarwati., R. Fajarfika., M. Asril., R. Jumawati., Purwaningsih., E. Joeniarti., E.P.R. dan A. (2021) 'Teknologi Produksi Benih, *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952. Available at: <https://medium.com/@arifwicaksanaa/pengertian-use-case-a7e576e1b6bf>.
- Soekarno, S. et al. (2024) 'Proses Pengeringan Benih Semangka Non-Biji Dengan Memanfaatkan Panas Tray Dryer', *Jurnal Ilmiah Rekayasa Pertanian dan Biosistem*, 12(1), pp. 136–146. Available at: <https://doi.org/10.29303/jrpb.v12i1.580>.
- Wahyuni, A. et al. (2021) *Teknologi dan Produksi Benih, Yayasan Kita Menulis*. Available at.
- Widajati Eny; Endang Murniati; Endah R. Palupi; Tatiek Kartika; M.R. Suhartanto; Abdul Qadir. (2013). *Dasar ilmu dan teknologi benih* (1st ed.). IPB Press.

BAB 7

PENGUJIAN MUTU BENIH

Oleh: Khansa Amara

7.1 Pengantar: Pentingnya Pengujian Mutu Benih dalam Produksi Benih

Mutu benih merupakan kunci keberhasilan produksi pertanian karena benih menjadi titik awal dari seluruh siklus hidup tanaman. Benih yang bermutu tinggi, diharapkan mampu menghasilkan tanaman sehat, seragam serentak, dan produktif. Oleh sebab itu, pengujian mutu benih memiliki peran penting dalam menjamin kualitas benih, sebelum benih diedarkan kepada petani (ISTA, 2025). Adapun tujuan pengujian mutu benih terdiri dari beberapa macam.

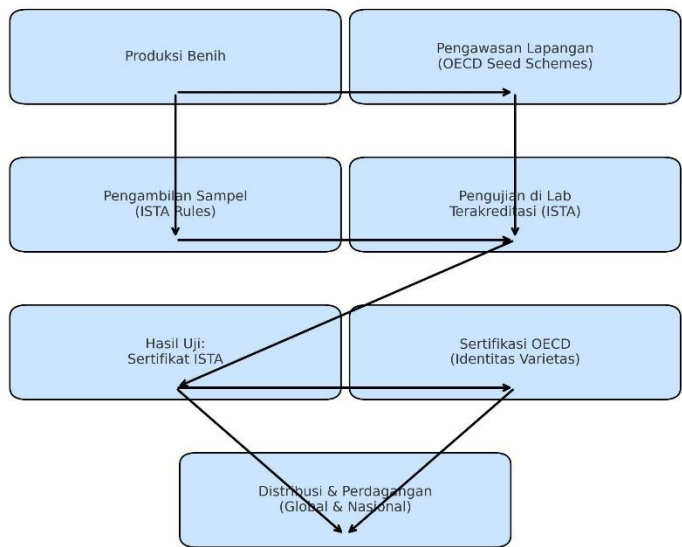
Pengujian mutu benih dilakukan untuk memastikan viabilitas, vigor, kemurnian, dan kesehatan benih, sehingga hasil produksi pertanian dapat diprediksi dengan lebih akurat. Namun, sebaliknya, jika pengujian tidak dilakukan, maka akan beresiko terhadap penurunan hasil panen, penyebaran penyakit, dan peningkatan kontaminasi genetik. Hal penting yang perlu digarisbawahi dalam kegiatan pengujian mutu benih adalah prinsip utama pengujian benih.

Prinsip utama pengujian benih adalah representativitas sampel, akurasi hasil, reproduktibilitas, dan penggunaan metode standar. Dengan demikian, hasil pengujian dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah maupun legal, baik di tingkat nasional maupun internasional (Oregon Seed Certification Service, 2024). Selain aspek teknis, pengujian mutu benih juga mendukung sistem perdagangan global, karena penentuan standar mutu benih mengikuti standar uji internasional, seperti ISTA dan OECD.

Standar uji ISTA (International Seed Testing Association) berperan dalam memberikan jaminan teknis hasil uji, kemudian didukung oleh OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) dalam memberikan jaminan legal perdagangan benih. Keduanya saling melengkapi untuk memastikan benih yang beredar di pasar internasional berkualitas, murni, dan sesuai varietas. Sedangkan pada taraf nasional, terdapat SNI maupun regulasi nasional yang merupakan adaptasi ISTA dan OECD dalam konteks nasional. Hubungan alur pengujian mutu benih hingga benih tersebut siap diedarkan di pasar disajikan pada Gambar 21. Dengan adanya alur

tersebut, mutu benih dapat diakui secara ilmiah (ISTA), legal dalam perdagangan (OECD), dan regulatif nasional (SNI/Permentan).

Alur Hubungan ISTA, OECD, dan Standar Nasional dalam Pengujian Mutu Benih



Gambar 21. Alur hubungan ISTA, OECD, dan standar nasional dalam pengujian

Standar uji yang diterapkan oleh ISTA juga menjamin bahwa benih yang diperdagangkan memenuhi kriteria mutu dan aman dari resiko penyebaran organisme pengganggu tumbuhan (OPT). Dalam 6 tahun terakhir, perkembangan teknologi digital, citra, dan bioinformatika telah mempercepat proses pengujian mutu benih. Teknologi ini mendukung penilaian vigor, kemurnian genetik, juga deteksi penyakit dengan akurasi tinggi dan waktu yang lebih singkat (Singh et al., 2025)

Pengujian mutu benih tidak hanya penting untuk kepentingan produksi saat ini, tetapi juga untuk menjaga keberlanjutan sumber daya genetik pertanian. Bank gen dan lembaga pemuliaan memanfaatkan hasil untuk memastikan bahwa varietas yang disimpan tetap murni dan bebas patogen. Aspek efisiensi biaya juga menjadi pertimbangan dalam penerapan pengujian. Laboratorium benih dituntut untuk menyeimbangkan penggunaan metode

klasik yang memakan waktu dengan teknologi cepat yang memerlukan investasi lebih tinggi (Vicario, 2022). Dengan demikian, bab ini akan menguraikan secara komprehensif prinsip, metode, dan interpretasi pengujian mutu benih yang meliputi viabilitas, vigor, kemurnian fisik dan genetik, kesehatan benih, serta sertifikasi hasil pengujian. Hal ini diharapkan dapat menjadi rujukan akademis dan praktis bagi mahasiswa, peneliti, dan praktisi perbenihan.

7.2 Prinsip dan Tujuan Pengujian Benih

Pengujian mutu benih didasarkan pada prinsip representativitas dan sampling statistik, maksudnya adalah sampel benih yang diambil harus mencerminkan keseluruhan lot benih agar hasil uji menjadi valid dan dapat digeneralisasi. Salah satu tantangan teknis adalah menghindari bias sampling, baik dari variasi fisik (misal: ukuran dan kepadatan), maupun distribusi patogen atau kontaminan. Kontaminan terbagi menjadi beberapa jenis, yaitu fisik, biologis, kimia, dan genetik. Contoh yang termasuk kontaminan fisik, biologis, kimia, dan genetik disajikan pada Tabel 19. ISTA sebagai organisasi internasional berperan dalam menetapkan prosedur sampling yang ketat agar validitas dan *reproducibility* hasil uji dapat terjaga.

Prinsip diagnostik untuk uji viabilitas dan vigor menuntut kontrol kondisi lingkungan uji (suhu, kelembaban, substrat) agar hasil perkecambahan atau vigor yang didapat benar-benar mencerminkan potensi fisiologis benih. Standar uji ini penting agar hasil antar laboratorium dapat dibandingkan. Begitu pula prinsip kontrol mutu laboratorium yang juga tidak kalah esensial, termasuk penggunaan kontrol positif dan positif, kalibrasi peralatan, dan pelatihan staf. Laboratorium uji benih idealnya mengikuti prosedur audit atau *proficiency testing internasional* untuk menjaga konsistensi hasil pengujian dari waktu ke waktu.

Tujuan pengujian benih secara umum adalah untuk memastikan bahwa benih yang diedarkan atau digunakan memenuhi klaim label (varietas, kualitas, dan kemurnian), dapat berkecambah, serta tumbuh sesuai spesifikasi. Pengujian ini menjadi dasar bagi penerbitan sertifikat mutu benih, yang digunakan dalam perdagangan, distribusi benih, dan regulasi. Pengujian benih juga mendukung perlindungan konsumen dan petani dengan memberikan data yang dapat diandalkan tentang kemungkinan kegagalan perkecambahan, keberadaan patogen, atau kontaminasi varietas. Dengan demikian, pengujian benih secara langsung membantu mengurangi risiko gagalnya usaha tani di lapangan.

Tabel 19. Jenis kontaminan pada benih beserta contoh dan dampaknya

Jenis kontaminan	Contoh	Dampak	Referensi
Fisik	Pasir, kerikil, tanah, sekam, potongan jerami, gulma	Menurunkan kemurnian fisik, menyulitkan proses pengolahan, menurunkan daya tumbuh	ISTA, 2025
Kimia	Residu pestisida (imidacloprid), fungisida, logam berat, mikotoksin (aflatoksin)	Risiko toksik bagi konsumen, pencemaran lingkungan, penurunan viabilitas benih	Hahne et al., 2024; Kaium et al., 2024
Biologis	Jamur (Fusarium, Aspergillus, Alternaria), bakteri (Xanthomonas, Pseudomonas), virus (CMV, TMV), nematoda	Penurunan viabilitas, sumber penyakit tanaman, masalah karantina	Dell’Olmo et al., 2023; Eleblu, 2023
Genetik	Benih varietas lain, hasil polinasi silang tidak terkendali, kontaminasi GMO	Penurunan kemurnian varietas, menurunkan performa hasil, hilangnya identitas varietas unggul	Alemu et al., 2021

Pengujian yang mengikuti standar, dalam hal ini ISTA *international rules*, menjadi prasyarat penting untuk ekspor-impor benih antar negara dalam perspektif perdagangan internasional. Hasil uji dari laboratorium bersertifikasi

ISTA lebih mudah diakui oleh otoritas karantina dan badan sertifikasi di negara tujuan. Prinsip transparansi dan *traceability* dalam pengujian benih mensyaratkan dokumentasi lengkap, seperti data sampling, kondisi uji, hasil penghitungan, dan metode analisis. Di mana seluruh tahapan tersebut, harus dicatat secara rinci agar proses pengujian dapat diverifikasi dan diaudit, serta memfasilitasi penelusuran sumber masalah bila ditemukan kegagalan mutu.

Tujuan teknis pengujian benih mencakup masa simpan (*shelf-life*) an estimasi penurunan kualitas benih (*aging*) dalam penyimpanan. Data vigor dan viabilitas dari pengujian laboratorium memungkinkan prediksi tentang umur simpan dan kebutuhan penyimpanan yang optimal (Iradukunda et al., 2024). Selain itu, pengujian benih juga berperan dalam pelestarian (konservasi) materi genetik dan bank benih, dengan verifikasi kemurnian genetik dan kesehatan benih, institusi maupun badan berwenang terkait pemulia dan bank benih dapat menjamin bahwa materi yang disimpan tidak terkontaminasi, dan potensi penyebaran patogen tular benih (*seed borne pathogen*) dapat diminimalisir.

Hal ini bermuara pada strategi pengujian modern yang semakin mengintegrasikan metode tradisional dengan teknologi berbasis protein dan inti sel (serologi dan molekuler) maupun digital, agar hasil uji tidak hanya cepat dan akurat, tetapi juga relevan dengan kebutuhan penelusuran varietas, keamanan hayati, dan adaptasi terhadap kondisi lingkungan yang bervariasi. Pendekatan terpadu ini menjadi sangat penting dalam konteks perubahan iklim dan kebutuhan pertanian yang semakin kompleks.

7.3 Uji Viabilitas dan Vigor

Uji viabilitas (*germination test*) bertujuan mengukur persentase benih yang dapat berkecambah dan menghasilkan calon tanaman normal di bawah kondisi optimal. Uji ini tetap menjadi tolak ukur dasar dalam pengujian mutu benih karena memberikan indikasi langsung tentang daya hidup benih dalam kondisi ideal, meski tidak selalu mencerminkan kinerja di lapangan. Selain uji viabilitas, terdapat uji vigor (kekuatan tumbuh) yang mencerminkan kemampuan benih untuk berkecambah dan tumbuhan di bawah kondisi tercekam (*stress*) atau suboptimal. Benih dengan viabilitas tinggi, berpotensi memiliki vigor rendah, sehingga performa di lapangan, terutama di kondisi lingkungan yang kurang ideal, dapat menurun drastis (Reed et al., 2022).

Metode klasik untuk mengukur vigor beberapa diantaranya adalah *accelerated aging* (AA), *cold test*, dan *electrical conductivity* (EC) (Iradukunda et al.,

2024). Perbedaan ketiganya terletak pada faktor stress yang digunakan dan organel sel sasaran yang menjadi titik kritis pengujian. *Accelerated aging* mempercepat proses penuaan benih untuk mengevaluasi ketahanan benih terhadap stres penyimpanan. *Electrical conductivity* mengukur kebocoran ion dari biji yang telah direndam, sebagai indikator kerusakan membran sel. *Cold test* mensimulasikan kondisi dingin dan lembab yang sering dihadapi benih saat perkecambahan di lapangan.

Penelitian terkini telah menunjukkan bahwa AA dapat menjadi prediktor yang lebih baik untuk kegagalan munculnya bibit di lapangan di bawah kondisi stres dibandingkan uji germinasi standar. Studi genetika juga mengaitkan hasil AA dengan gen-gen terkait umur simpan dan vigor benih (Kannababu et al., 2025). Inovasi terbaru dalam pengujian vigor meliputi metode berbasis citra dan laser, seperti *biospeckle laser imaging* (BSL) dan teknik pengolahan citra multispektral. Sebagai contoh, studi yang dilakukan Vicentini et al. (2025) pada biji kacang (*Phaseolus vulgaris*) menggunakan BSL mampu membedakan kelompok benih ber-vigor tinggi dan rendah secara non-destruktif. Selain pada kacang, juga terdapat pengujian modern pada benih menggunakan pendekatan multispektral dan model pembelajaran mesin (MsiFormer yang menggabungkan deteksi objek dan transformer visi).

Qiao et al. (2023) mengusulkan pendekatan tersebut untuk memperkirakan vigor benih dan menilai potensi germinasi tanpa merusak biji. Model tersebut membuktikan bahwa akurasi varietas padi berkecambah mampu mencapai lebih dari 94%. Selain kedua metode modern tersebut, terdapat beberapa pendekatan lain yang mampu membantu produsen benih dan petani dalam pengambilan keputusan tentang penggunaan dan penyimpanan benih. Karena hasil yang diharapkan dari uji viabilitas maupun vigor adalah data yang dapat digunakan untuk penentuan masa simpan optimal, kebutuhan perlakuan pra-tanam (priming benih, perlakuan suhu/kelembaban), dan strategi penanaman (misalnya memilih benih dengan vigor tinggi untuk tanam langsung di lahan kering atau dingin).

Tantangan dalam pengujian vigor termasuk kekritisian dalam standarisasi prosedur (durasi dan kondisi *accelerated aging*, durasi dan metode imbibisi untuk EC, *threshold interpretation* untuk *rupture test*), serta kebutuhan validasi untuk berbagai spesies dan varietas. Oleh sebab itu, kalibrasi dan validasi lokal terhadap metode vigor menjadi penting sebelum generalisasi data pengujian dari literatur internasional ke konteks lokal.

7.4 Uji Kemurnian Fisik dan Genetik

Kemurnian fisik mengacu pada proporsi benih dari varietas yang diklaim dalam sebuah lot, dibandingkan dengan kotoran (*seeds of other crops, weed seeds*, bukan biji) dan bahan lain (debris, hibrida atau benih jenis berbeda). Penilaian kemurnian fisik biasanya dilakukan dengan menggunakan teknik *sifting/sieving*, pemisahan berdasarkan berat jenis (*water or air separation*), dan inspeksi visual manual. Hasil ini menilai seberapa bersih lot benih secara fisik dan mempengaruhi komersialitas dan harga benih (ISTA, 2025). Selain kemurnian fisik, juga terdapat kemurnian genetik yang juga menjadi parameter penting pada uji kemurnian benih.

Kemurnian genetik berkaitan dengan identitas varietas dan bebasnya kontaminasi oleh benih lain atau off-types (tanaman yang secara fenotip berbeda dari varietas yang diklaim). *Growing on Test* (GOT) konvensional, telah lama menjadi metode standar untuk mendeteksi off-types dan verifikasi varietas. Namun, metode ini bersifat memakan waktu dan sumber daya.

Penggunaan metode molekuler dengan penanda molekuler seperti SSR (*microsatellites*), SNP, RAPD, dan DNA barcoding telah menjadi alternatif atau pelengkap GOT dalam pengujian kemurnian genetik. SSR bersifat multialelik dan memberikan resolusi yang baik untuk membedakan varietas, sementara SNP umumnya lebih banyak dan lebih cocok untuk analisis *throughput* tinggi. ISTA dan kelompok varietas sedang mengembangkan standar untuk menggunakan *marker*/penanda molekuler dalam verifikasi varietas dan pengujian kemurnian (Dadlani dan Yadava, 2023).

Tantangan dalam penerapan metode molekuler menggunakan marker, beberapa diantaranya adalah penentuan marker yang cocok untuk varietas tertentu, risiko interpretasi yang salah karena residual heterozigositas dalam garis induk, dan kemungkinan *false positives/negatives* yang disebabkan oleh heterozigositas atau degradasi DNA. Untuk itu, validasi marker dan prosedur laboratorium yang ketat sangat diperlukan, salah satu objek yang digunakan untuk uji validitas ini adalah varietas rumput (*Lolium*). Selain faktor-faktor maupun tantangan dalam praktik penerapan metode molekuler pada pengujian benih, juga terdapat faktor-faktor yang menjadi penyebab adanya kontaminasi fisik maupun genetik.

Faktor-faktor yang menyebabkan kontaminasi fisik atau genetik pada benih termasuk polinasi silang (*cross-pollination*), kontaminasi benih dari varietas berbeda saat panen atau pemrosesan, kesalahan dalam pemurnian benih, dan penyimpanan benih yang tidak terpisah secara varietas.

Pengelolaan kebun pemulia dan penggunaan isolasi varietas menjadi kunci untuk mencegah kontaminasi.

7.5 Uji Kesehatan Benih

Uji kesehatan benih merupakan langkah kritis dalam pengujian mutu benih yang fokus pada deteksi dan identifikasi organisme patogen (jamur, bakteri, virus, nematoda) atau vektor penyakit yang dapat ditularkan via benih. Tanpa uji kesehatan, benih yang tampak sehat secara fisik dan fenotipik bisa membawa infeksi laten yang menyebabkan kegagalan produktivitas tanaman. Oleh karena itu, keberadaan mikroorganisme merugikan pada benih harus memiliki nilai rendah/minimal bahkan nol. Metode dalam pengujian kesehatan benih dapat dilakukan secara konvensional maupun modern. Baik, metode konvensional maupun modern, memiliki kelemahan dan kelebihan (Tabel 20).

Metode konvensional untuk menguji kesehatan benih meliputi *blotter test*, *agar plate cultures*, dan *growing on test* (GOT) untuk mengamati gejala penyakit. Teknik ini berguna untuk jamur dan bakteri yang dapat tumbuh dan menunjukkan gejala, namun memiliki keterbatasan, terutama pada patogen yang bersifat laten atau yang tidak tumbuh pada media buatan. Untuk virus tanaman dan patogen non-kultur lainnya, teknik serologis seperti ELISA dan metode molekuler seperti PCR, qPCR, atau LAMP sangat berguna.

Tabel 20. Jenis kontaminan pada benih beserta contoh dan dampaknya

Aspek	Metode Konvensional	Metode Modern
Prinsip Dasar	Deteksi patogen berdasarkan pertumbuhan pada media, pengamatan morfologi, dan gejala pada kecambah.	Deteksi berbasis molekuler atau serologi, mengidentifikasi DNA/RNA atau antigen spesifik patogen.
Kelebihan	1. Relatif murah dan sederhana 2. Tidak membutuhkan peralatan canggih	1. Tingkat sensitivitas dan spesifisitas tinggi 2. Hasil lebih cepat dan akurat

	3. Bisa dilakukan di laboratorium dasar 4. Cocok untuk pelatihan dasar dan screening awal.	3. Bisa mendeteksi patogen laten atau dalam jumlah sangat sedikit 4. Dapat mengidentifikasi hingga tingkat spesies/strain.
Kelemahan	1. Waktu lama (7–14 hari) 2. Hanya mendeteksi patogen yang bisa tumbuh pada media 3. Sulit membedakan patogen yang morfologinya mirip 4. Sensitivitas rendah untuk patogen laten.	1. Membutuhkan peralatan khusus (PCR machine, ELISA reader) 2. Biaya reagen dan operasional lebih tinggi 3. Memerlukan tenaga ahli dengan keterampilan molekuler 4. Risiko kontaminasi sampel tinggi jika tidak steril.
Contoh Patogen	Jamur <i>Fusarium spp.</i> , <i>Aspergillus spp.</i> , <i>Alternaria spp.</i>	Virus (<i>Rice tungro virus</i>), Bakteri (<i>Xanthomonas oryzae</i>), Jamur spesifik (<i>Pyricularia oryzae</i>).
Aplikasi	Screening awal di laboratorium pengujian benih skala lokal.	Diagnostik cepat untuk sertifikasi benih, program eradikasi, serta penelitian molekuler.

Teknik molekuler ini memungkinkan deteksi spesifik dan sensitif dari infeksi laten, serta dapat mengidentifikasi strain atau varian virus atau bakteri yang sulit diisolasi melalui kultur. Namun demikian, tantangan signifikan dalam penggunaan teknik molekuler meliputi validasi metode, risiko deteksi *false-negative* akibat degradasi asam nukleat atau inhibitor PCR, dan *false-positive* yang disebabkan oleh kontaminasi silang. Oleh karena itu, validasi silang

dengan metode kultur atau grow-out seringkali direkomendasikan sebagai verifikasi. Selain metode diagnostik, pra-analisis seperti pengambilan sampel, sanitasi, kondisi penyimpanan benih, dan persiapan benih untuk uji sangat mempengaruhi keandalan hasil uji kesehatan. Penanganan dan penyimpanan yang buruk dapat menyebabkan degradasi patogen atau materi genetiknya, yang mempersulit deteksi, atau memperkenalkan kontaminan baru yang mengaburkan interpretasi hasil. Standarisasi internasional pengujian kesehatan benih, seperti yang diatur oleh ISTA (seperti *ISTA Handbook on Seed Health Testing*), menetapkan protokol dan ambang deteksi untuk berbagai patogen benih. Hal ini penting terutama untuk memenuhi persyaratan karantina dan perdagangan benih antar negara.

Inovasi terkini dalam deteksi patogen benih mencakup pendekatan metagenomik dan *next-generation sequencing* (NGS) yang memungkinkan surveilans patogen secara menyeluruh, termasuk virus atau endofit yang sebelumnya tidak terdeteksi atau baru muncul. Pendekatan ini memberikan potensi untuk identifikasi patogen tak terduga, tetapi interpretasi data memerlukan bioinformatika yang cermat dan validasi laboratorium. Uji kesehatan benih adalah bagian integral dari sistem manajemen penyakit tanaman. Data dari pengujian benih dapat digunakan untuk menentukan perlakuan sanitasi pra-tanam (misal *hot water treatment*, *fungicidal treatment*), strategi karantina, dan pengelolaan benih yang mengurangi risiko penularan penyakit dari benih ke lapangan.

Dalam konteks regulasi, uji kesehatan benih dibutuhkan untuk mendapatkan sertifikat kesehatan benih yang menyatakan bahwa satu lot benih bebas dari patogen tertentu atau berada di bawah ambang risiko. Sertifikat ini menjadi syarat penting untuk ekspor benih dan untuk perdagangan dalam sistem benih bersertifikasi. Rekomendasi praktik terbaik mencakup penggunaan kontrol patogen referensi, validasi metode molekuler terhadap metode kultur/tradisional untuk patogen lokal, serta partisipasi laboratorium pengujian kesehatan dalam program *proficiency testing* antar-lab agar kualitas diagnostik tetap terjaga dan hasil uji dapat dipertanggungjawabkan. Beberapa diantaranya yang termasuk tantangan pengujian kesehatan benih adalah pembawa tanpa gejala dan infeksi laten, masa dormansi patogen, beban inokulum rendah (dalam hal ini *quorum sensing* patogen), sensitivitas dan spesifitas tes, morfologi jamur yang saling tumpang tindih, asosiasi antara patogen pada tanaman *non-host*, kurang tepatnya penyimpanan benih, adanya potensi ancaman jamur tular benih, kerusakan

(distorsi benih, busuk pada benih, dan lain-lain) dan rendahnya viabilitas benih, serta kehilangan hasil.

Safitri et al. (2025) menyarankan beberapa strategi untuk memerangi implikasi yang memiliki hubungan dengan kesehatan benih, seperti identifikasi area bebas inokulum, sertifikasi benih yang memiliki sifat dan mutu unggul, upaya peningkatan sensitivitas protokol diagnostik, pencegahan penyebaran kontaminasi patogen dengan memastikan kebersihan di laboratorium, adanya penetapan jalur yang menentapkan pergerakan benih sebagai upaya pencegahan patogen pada benih melalui perpindahan benih dari satu tempat ke tempat lain, dan yang paling penting adalah setiap lembaga maupun industri berbasis benih wajib untuk memenuhi persyaratan peraturan mengenai kesehatan dan kualitas benih.

7.6 Metode Laboratorium dan Lapangan

Metode laboratorium dalam pengujian mutu benih (seperti uji germinasi, vigor, kemurnian, dan kesehatan) biasanya dilakukan dalam kondisi terkontrol dan standar sehingga menghasilkan data yang konsisten dan dapat direproduksi. Laboratorium benih menggunakan inkubator, media kultur, peralatan PCR, dan perangkat analitik lainnya untuk mengukur parameter mutu secara sistematis.

Data hasil pengujian di laboratorium seringkali menunjukkan perbedaan hasil dengan data di lapangan. Kondisi lingkungan seperti suhu, kelembaban tanah, tekanan patogen, dan interaksi tanaman dapat berbeda dari kondisi laboratorium, sehingga performa benih di lapangan terkadang berbeda dari yang diprediksi oleh uji laboratorium. Oleh karena itu, penting juga untuk melakukan pengujian benih di lapangan.

Uji lapangan, melibatkan penanaman benih dalam kondisi lapangan (atau semi-kontrol) untuk mengamati germinasi nyata, munculnya bibit (*emergence*), serangan penyakit (dalam hal ini salah satunya diukur menggunakan persentase infeksi patogen pada tanaman), pertumbuhan tanaman, dan fenotipik varietas. Pengamatan ini membantu memvalidasi data laboratorium dan memberikan gambaran nyata tentang keberhasilan benih dalam kondisi agronomis nyata.

Kombinasi antara metode laboratorium dan lapangan memungkinkan validasi silang misalnya, benih yang lulus uji germinasi dan vigor di laboratorium diuji di lapangan untuk mengkonfirmasi bahwa mereka benar-benar berkecambah dan tumbuh dengan baik, serta mempertahankan karakter

varietas. Hasil lapangan dapat mengungkap masalah latent yang tidak terdeteksi di laboratorium.

Penggunaan alat digital dan teknologi mobile di lapangan, seperti aplikasi pencatatan data, pemetaan lokasi tanam, dan foto perkembangan bibit, dapat memperkaya data uji lapangan dan mempercepat analisis. Data lapangan yang dihubungkan dengan metadata benih, kondisi cuaca, dan praktik agronomi dapat meningkatkan kualitas interpretasi hasil uji. Beberapa metode yang dimaksud adalah teknik non-destruktif seperti pencitraan sinar-x, penginderaan jauh, pencitraan multispektral, pencitraan hiperspektral, dan spektroskopi inframerah dekat (NIR) di mana metode tersebut terhitung lebih murah dan mampu menghemat waktu dan/atau tenaga kerja (Singh et al., 2025).

Protokol sampling lapangan harus memperhatikan distribusi heterogen benih, variasi mikro-lokasi, dan kondisi tanah. Sampling yang tidak representatif atau penanaman dalam lahan yang terfragmentasi dapat menghasilkan bias atau kesalahan interpretasi. Oleh sebab itu, prosedur sampling lapangan harus ditetapkan secara cermat.

Metode laboratorium yang baru dan efisien, misalnya uji biomekanik pada biji jagung (*rupture test*) atau pengujian vigor berbasis pencitraan, memerlukan validasi lapangan untuk memastikan bahwa sinyal yang diukur di laboratorium benar-benar mencerminkan kemampuan benih di lapangan. Tanpa validasi lapangan, interpretasi data laboratorium dapat mengalami bias (Li et al., 2024). Selain itu, perbedaan dalam metode perlakuan benih pra-tanam (*priming*, sanitasi, penyimpanan) dapat mempengaruhi performa lapangan, sehingga uji laboratorium harus mempertimbangkan efek perlakuan tersebut. Laboratorium pengujian benih perlu mencatat perlakuan pra-tanam dan menyertakan kondisi kontrol agar interpretasi hasil menjadi lebih sesuai untuk menggambarkan kondisi *real* yang terjadi.

Uji lapangan juga digunakan untuk verifikasi isolasi varietas, penilaian daya tumbuh awal, kecepatan munculnya bibit, dan resistensi terhadap stres lingkungan atau penyakit. Ini menjadi bagian dari evaluasi kualitas benih untuk produksi benih kelas dasar (*foundation seed*) dan benih baku (*seed stock*). Ujung dari pengujian ini berupa, dokumentasi hasil uji laboratorium dan lapangan, termasuk data sampling, kondisi uji, hasil pengamatan, dan metadata lingkungan, yang berperan sangat penting untuk audit sertifikasi benih dan *traceability*. Sistem manajemen data yang baik mendukung transparansi dan kepercayaan terhadap sertifikasi mutu benih.

7.7 Interpretasi dan Setifikasi Hasil Uji

Interpretasi hasil uji benih tidak hanya melihat angka mentah (misalnya persentase germinasi atau vigor), tetapi juga mempertimbangkan ambang batas (*thresholds*) yang berlaku untuk penggunaan benih tertentu, sebagai contoh apakah benih dimaksudkan untuk produksi, penelitian, atau perdagangan internasional. Ambang batas ini tergantung pada spesies, tujuan penggunaan, dan standar sertifikasi. Dokumen terkait tiap-tiap jenis benih dapat diakses pada laman resmi milik ISTA.

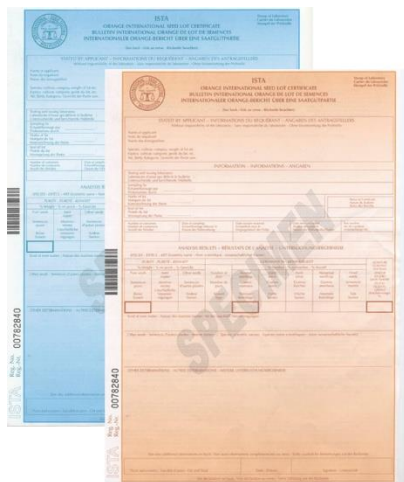
Hasil laboratorium harus diinterpretasikan dengan memperhatikan konteks metodologis, misalnya kondisi uji, waktu penyimpanan benih, dan perlakuan pra-tanam. Karena faktor-faktor ini dapat mempengaruhi viabilitas dan vigor secara signifikan, dan hasil uji bisa berubah jika benih berada di kondisi berbeda dari saat uji (Iradukunda et al., 2024).

Sertifikasi benih merupakan proses formal (atau resmi) di mana laboratorium uji yang terakreditasi menerbitkan sertifikat mutu benih yang menyatakan bahwa lot telah diuji dan memenuhi standar tertentu (viabilitas, kemurnian, kesehatan, dan kemurnian genetik). Sertifikat ini seringkali menjadi dokumen wajib untuk perdagangan benih, ekspor, dan penggunaan benih dalam kegiatan pemuliaan atau program pangan.

Validitas sertifikat tergantung pada akreditasi laboratorium, keandalan metode uji, dan integritas rantai pengambilan sampel dan pelaporan hasil. Laboratorium yang memperoleh akreditasi ISTA memiliki otoritas untuk menerbitkan ISTA International Seed Lot Certificates, yang secara global diakui. ISTA menerbitkan sertifikat benih dengan dua warna berbeda, yaitu oranye dan biru, dan masing-masing memiliki fungsi khusus dalam sistem pengujian dan sertifikasi mutu benih internasional. Namun, secara garis besar yang membedakan keduanya adalah sertifikat berwarna oranye/*orange certificate* (OIC) merupakan sertifikat hasil pengujian lot benih yang bersifat resmi dan sah untuk perdagangan internasional, sedangkan sertifikat berwarna biru/*blue certificate* (BIC) merupakan sertifikat hasil pengujian sampel benih dan hanya sebagai informasi juga tidak mewakili seluruh lot. Visualisasi sertifikat oranye dan biru ditunjukkan pada Gambar 22.

Uji kesehatan benih dalam hal ini merupakan interpretasi hasil uji penyakit benih yang seringkali melibatkan ambang kuantitatif atau kualitatif—misalnya jumlah spora, nilai Ct (*cycle threshold*) dalam qPCR, atau perbandingan kehadiran atau ketidakhadiran patogen tertentu. Keputusan sertifikasi dapat mencakup penolakan lot, penerapan perlakuan sanitasi, atau penggunaan terbatas tergantung pada tingkat infeksi. Dalam konteks kemurnian genetik,

interpretasi molekuler (misalnya dari SSR atau SNP marker) harus dilengkapi dengan analisis statistik dan pertimbangan heterozigositas atau residual segregasi. Laporan kemurnian genetik idealnya menyertakan metode marker yang digunakan, ukuran sampel, dan ambang toleransi untuk *off-type*.



Gambar 22. ISTA International Seed Lot Certificates yang terbagi menjadi dua warna

Transparansi laporan hasil uji, beberapa diantaranya termasuk dokumentasi metode, kontrol, kondisi laboratorium, dan hasil mentah, berperan sangat penting agar sertifikat dapat diaudit dan validitasnya dipertanggungjawabkan. Tanpa transparansi, hasil uji bisa dipertanyakan atau disengketakan oleh pihak pengguna atau regulator.

Beberapa yurisdiksi telah mulai menerapkan *e-certification* atau sertifikasi elektronik, yang memungkinkan pelacakan (*tracing*) dan verifikasi online atas sertifikat mutu benih. Sistem *e-certification* mempermudah distribusi dan validasi sertifikat, meminimalkan pemalsuan dokumen dan mempercepat proses perdagangan internasional.

Tantangan dalam harmonisasi sertifikasi global meliputi perbedaan standar nasional, variasi metode pengujian, dan peraturan karantina. Sebuah lot benih yang disertifikasi di satu negara mungkin perlu diuji ulang atau ditolak di negara lain jika standar atau persyaratan kesehatan berbeda.

Rekomendasi untuk praktik sertifikasi benih meliputi: penggunaan pendekatan berlapis (fenotipik, molekuler, dan audit lapangan), validasi lokal

terhadap prosedur uji, pelatihan teknisi laboratorium, dan dokumentasi lengkap agar hasil uji dan sertifikasi dapat dipertanggungjawabkan serta diterima secara nasional dan internasional.

DAFTAR PUSTAKA

- Iradukunda, M., et al. (2024). *The Use of Imaging to Quantify the Impact of Seed Aging*. *Frontiers in Plant Science / PMC*.
- Kannababu, N., et al. (2025). Role of functional genes for seed vigor related traits: implications for accelerated aging and longevity. *Scientific Reports*.
- Li, H., et al. (2024). A New Method for Evaluating Maize (*Zea mays*) Seed Vigour. *Plants*, 13(13), 1847.
- Qiao, J., et al. (2023). Vigour testing for the rice seed with computer vision-based multispectral image analysis. *Frontiers in Plant Science*.
- Sandra, N. (2023). Molecular Techniques for Testing Genetic Purity and Seed Health. In *Seed Science and Technology*. Springer.
- Vicentini, B., Braga, R. A., Contado, J. L., Gomes, J. E. d. S., & Gonzalez-Peña, R. d. J. (2025). A Seed Vigor Test Through a Biospeckle Laser: A Comparison of Local and Global Analyses. *Agriculture*, 15(14), 1553.
- International Seed Testing Association. (n.d.). *ISTA Handbook on Seed Health Testing*. Retrieved from ISTA website.
- International Seed Testing Association. (n.d.). *International Seed Testing Association: Seed Quality Testing and Accreditation*. Retrieved from ISTA website.
- Indam Seeds. (n.d.). *Seed Purity and Health Testing Services*. Retrieved from Indam Seeds website.

BAB 8

FISIOLOGI DAN BIOKIMIA BENIH

Oleh: Jeki

8.1 Tinjauan Umum

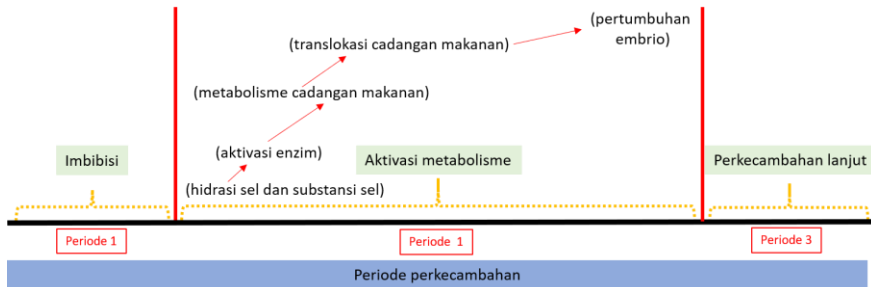
Sebagai salah satu fase hidup dari tumbuhan, benih mengalami berbagai proses fisiologi dan mekanisme biokimia. Proses-proses tersebut diantaranya mencakup perkecambahan benih, viabilitas benih, dan dormansi benih. pemahaman yang baik terkait fisiologi dan biokimia benih merupakan dasar bagi pengembangan teknologi benih, mulai dari tahap produksi, penyimpanan, pemrosesan, pengemasan, dan transportasi atau distribusi benih. dengan demikian, memahami fisiologi dan biokimia benih memungkinkan bagi setiap pelaku perbenihan untuk dapat mengoptimalkan perlakuan terhadap induk benih selama tahap pra panen di lapangan produksi, dan meminimalkan penurunan mutu benih selama masa pasca panen.

Berdasarkan sumbernya, benih terbagi menjadi dua macam yaitu benih generatif berupa biji, dan benih vegetatif berupa organ-organ dari tanaman induk. Bab ini tidak dapat menguraikan proses fisiologi dan mekanisme biokimia kedua jenis benih tersebut, sehingga pembahasan masih terbatas pada benih generatif.

8.2 Perkecambahan

Perkecambahan benih dapat didefinisikan secara berbeda. Berdasarkan aspek morfologi, perkecambahan benih merupakan perubahan bentuk dari benih menjadi kecambah. Secara teknologi, perkecambahan benih merupakan peristiwa terbentuk dan tumbuhnya struktur penting dari embrio benih, yang menjadi indikator akan tumbuh menjadi tanaman yang normal dan berproduksi tinggi pada kondisi lingkungan yang optimum. Secara fisiologi, perkecambahan benih merupakan proses dimulainya proses-proses metabolisme yang mendorong pertumbuhan struktur penting dari embrio hingga menembus kulit benih. Secara biokimiawi, perkecambahan benih merupakan tahap-tahapan biosintesis dan oksidatif yang berlangsung secara berurutan dan saling terkait.

Perkecambahan benih terbagi dalam tiga periode yakni periode pertama, imbibisi; periode kedua; aktivasi metabolisme, yang terdiri atas tahap hidrasi sel dan substansi di dalam sel, tahap aktivasi enzim, tahap metabolisme cadangan makanan, translokasi, dan tahap pertumbuhan embrio, periode ketiga; keluarnya radikula serta pertumbuhan struktur kecambah.



Gambar 23. Periode perkecambahan benih

Imbibisi

Proses imbibisi merupakan tahapan penyerapan air dari lingkungan benih kedalam benih. Peristiwa ini merupakan awal penyerapan air yang berlangsung secara pasif. Air berpindah dari lingkungan benih ke dalam benih akibat perbedaan potensial air antara benih dengan lingkungan benih. Proses imbibisi terutama berlangsung pada benih kering dengan potensial air (-100 MPa). Kondisi tersebut bukan berarti bahwa kandungan air benih adalah 0%, melainkan benih tetap mengandung air namun air yang terkandung dalam benih tersebut tidak cukup untuk memulai proses perkecambahan.

Air dari lingkungan benih akan berpindah ke dalam benih ketika potensial air lingkungan benih lebih tinggi dari potensial air benih. Proses tersebut akan terus berlangsung hingga potensial air benih dan potensial air lingkungan benih berada dalam kondisi seimbang atau memiliki nilai potensial air yang sama. Proses imbibisi dibutuhkan setidaknya hingga potensial air benih mencapai $-1,5$ MPa yang merupakan potensial air minimal yang dibutuhkan untuk proses perkecambahan. Perlu dipahami bahwa, potensial air tidak identik dengan jumlah air. Melainkan terkait dengan kemampuan air dalam benih untuk bergerak yang ditentukan oleh komposisi dan daya ikat

substansi benih terhadap air. Dua benih dengan kandungan jumlah air yang sama dapat memiliki potensial air yang berbeda.



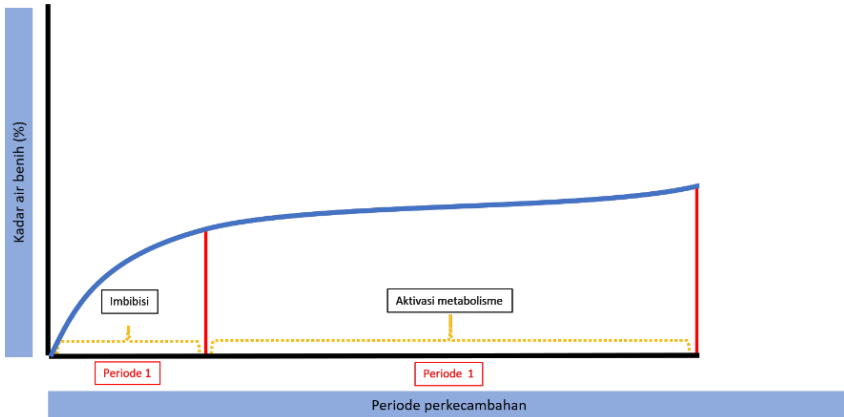
Gambar 24. Hubungan perkecambahan benih dengan kadar air benih pada periode pertama

Periode imbibisi merupakan periode peningkatan kadar air benih yang sangat tajam, karena penyerapan air disebabkan oleh perbedaan potensial air yang sangat tinggi. Namun, periode imbibisi berlangsung dalam masa yang relatif singkat karena penambahan kadar air cenderung menurun, akibat potensial air benih semakin mendekati kesetimbangan dengan potensial air lingkungan benih.

Aktivasi metabolisme

Periode aktivasi metabolisme terdiri atas hidrasi sel dan substansi di dalam sel, tahap aktivasi enzim, tahap metabolisme cadangan makanan, translokasi, dan tahap pertumbuhan embrio. Pada periode ini penyerapan air masih berlangsung namun dengan peningkatan kadar air yang sangat rendah karena potensial air benih semakin mendekati kesetimbangan dengan potensial air lingkungan benih. Akan tetapi, aktivitas metabolisme benih dapat dimulai saat atau sebelum potensial air benih mencapai kesetimbangan dengan potensial air lingkungan benih. Kandungan atau kadar air benih dapat menjadi penyebab dimulai atau tertundanya perkecambahan. Setiap benih dapat memiliki kadar air yang berbeda-beda untuk memulai aktivitas metabolisme

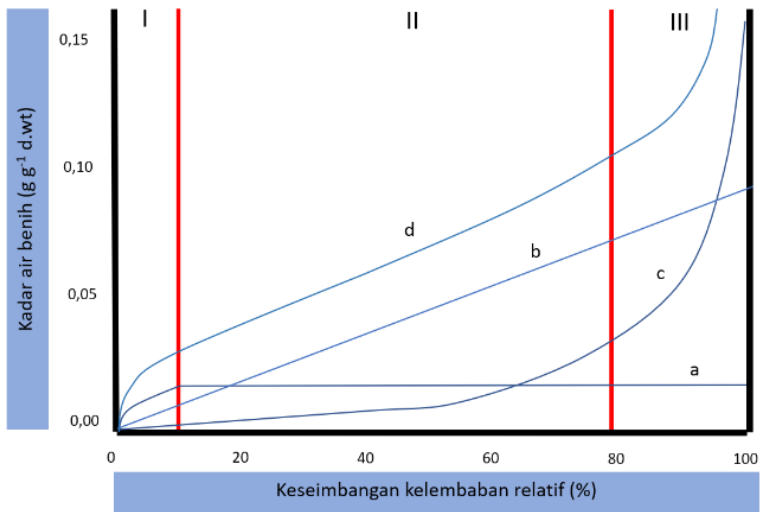
perkecambahannya. Contohnya pada benih padi, kandungan air lebih dari 25% merupakan tanda dimulainya aktivitas metabolisme perkecambahan.



Gambar 25. Hubungan perkecambahan benih dengan kadar air benih pada periode 1 dan 2.

Tahap hidrasi substansi sel benih

Gambar 26 menunjukkan bahwa air yang terserap benih melalui proses imbibisi akan menyebabkan hidrasi sel dan substansi di dalam sel yang mengalami peningkatan seiring waktu (kurva d sebagai hasil penjumlahan kurva a+b+c). Kadar air dalam benih tersebut terbagi dalam tiga level hidrasi, yaitu : level 1; hidrasi rendah, air terikat (*bound water*, kurva a) yang sangat kuat oleh bidang substansi sel benih. jumlah air dalam level ini tidak akan mengalami peningkatan meski kelembaban relatif lingkungan benih terus meningkat karena bidang substansi sel benih yang dapat mengikat air dengan ikatan sangat kuat bersifat tetap. level 2; hidrasi sedang, air terikat lemah (*weakly bound water*, kurva b) oleh bidang substansi sel benih. Jumlah air pada level ini dapat mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya kelembaban relatif lingkungan benih, namun daya ikat bidang substansi sel benih terhadap sejumlah air tambahan dalam level ini tidak sekuat ikatan bidang substansi sel benih terhadap air pada hidrasi level 1. level 3; hidrasi tinggi, air bebas (*free water*, kurva c), yang mudah menguap karena tidak terikat oleh bidang substansi sel benih dan tersedia untuk metabolisme aktif selama perkecambahan.



Gambar 26. Hubungan kadar air benih dengan kelembaban relatif (Bewley J.D et al, 2013)

Benih hanya akan mengalami hidrasi level 1 saat kelembaban relatif lingkungan benih berada pada kisaran 0-10% dimana benih hanya dapat menyerap air dalam jumlah yang sangat rendah. Kelembaban relatif lingkungan benih yang mencapai 10-80% dapat meningkatkan kadar air dalam benih hingga melebihi kadar air benih pada hidrasi level 1 dan menjadi hidrasi level 2. Selanjutnya, benih akan mengalami hidrasi level 3 saat kelembaban udara lingkungan benih sangat tinggi yaitu lebih dari 80%, memungkinkan benih menyerap banyak air, sehingga kadar air dalam benih mencapai tingkat tertinggi.

Tabel 21. Hubungan ketersediaan air benih (hasil tabulasi data sekunder)

Aspek	Kurva a	Kurva b	Kurva c
Zona kelembaban relatif lingkungan benih (%)	0 – 10 (I)	10 – 80 (II)	> 80 (III)
Kategori air	Air terikat kuat	Air terikat lemah	Air bebas
Lokasi penyerapan air	Situs bermuatan (ionik) gugus karboksil (-COO-), gugus amino bermuatan positif (-NH ₃ ⁺), dan gugus hidroksil (-OH) pada polisakarida	Situs polar netral (-OH dan -C=O)	Di atas air lain / dalam pori
Kekuatan ikatan	Sangat kuat (adesi air dengan molekul substansi sel benih)	Sedang	Lemah (kohesi antar air)
Potensi mobilitas air	Tidak bergerak	Mobilitas terbatas	Sangat mobil/mudah menguap
Fungsi biologis air	Stabilitas struktur benih	Aktivasi enzim benih	Reaksi biologis, perkecambahan

Mekanisme hidrasi benih diatas menjelaskan mekanisme internal benih dalam metode meningkatkan daya simpan benih dengan menghambat peningkatan kadar air, yaitu dengan menempatkan benih pada penyimpanan dengan kelembaban yang rendah. Selain itu, mekanisme diatas juga menjelaskan mekanisme internal benih dalam metode mempercepat perkecambahan benih dengan cara meningkatkan kadar air benih, yaitu dengan menempatkan benih pada wadah dengan kelembaban tinggi bahkan mencapai 100% dan atau merendam benih pada wadah dengan potensial air 0 MPa sebelum perendaman benih. Kelembaban benih sangat mempengaruhi

kadar air benih, dan kadar air benih mempengaruhi daya simpan benih. Harrington menyatakan bahwa setiap kenaikan 1% kadar air benih akan menurunkan daya simpan benih hingga 50% dari daya simpan awalnya. Berdasarkan hal tersebut, maka setiap penurunan 1% kadar air benih akan meningkatkan daya simpan benih hingga dua kali lipat dari daya simpan awalnya.

Contoh 1 :

Suatu benih memiliki daya simpan hingga 1 tahun pada kadar air 13%. Jika kadar air benih meningkat 1% menjadi 14%, maka daya simpannya yaitu ;

$$DS = DS_0 \times (1/2)^{(KA-KAo)}$$

Keterangan :

DS = Daya simpan

DS₀ = Daya simpan awal

KA = Kadar air

KA₀ = Kadar air awal

$$DS = 1 \times (1/2)^{(14-13)} = 1 \times (1/2) = 0.5$$

Daya simpan benihnya berubah menjadi 0,5 tahun, dengan asumsi kadar air masih dalam rentan kadar air kritisalnya, dan dalam kondisi lingkungan lainnya masih sama.

Contoh 2 :

Suatu benih memiliki daya simpan hingga 1 tahun pada kadar air 13%. Jika kadar air benih menurun menjadi 11%, maka daya simpannya yaitu ;

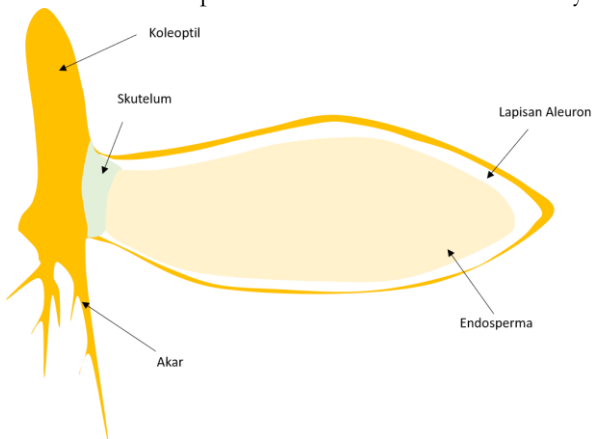
$$\begin{aligned} DS &= 1 \times (1/2)^{(11-13)} = 1 \times (1/2)^{(11-13)} = 1 \times (1/2)^{-2} \\ &= 1 \times (2/0.5) = 1 \times 4 = 4 \end{aligned}$$

Daya simpan benihnya berubah menjadi 4 tahun, , dengan asumsi kadar air masih dalam rentan kadar air kritisalnya, dan dalam kondisi lingkungan lainnya masih sama.

Tahap aktivasi enzim

Proses perkecambahan merupakan proses pemanfaatan cadangan makanan sebagai sumber energi dan atau bahan baku pembentukan organ-

organ penting embrio. Kecepatan dan volume perombakan cadangan-cadangan makanan tersebut sangat ditentukan oleh enzim-enzim di dalam benih. Sebagian besar proses sintesis enzim untuk penguraian cadangan makanan benih berlangsung di aleuron benih, yang merupakan satu-satunya jaringan hidup yang terletak pada bagian luar dari endosperma benih. setiap jenis benih tanaman memiliki variasi struktur aleuron yang berbeda, jelai memiliki aleuron setebal tiga lapis sel, pada jagung dan gandum hanya setebal satu lapis sel, dan aleuron beras bervariasi dari satu hingga beberapa lapis sel. Selain aleuron, sebagian enzim juga disintesis di bagian skutellum benih, bahkan perkecambahan diawali dengan pelepasan enzim pengurai dinding sel, yaitu β -glukanase, yang disintesis di skutellum ke dalam lapisan perantara sel epitel skutellum dan endosperma benih. Penguraian dinding sel tersebut memungkinkan terjadinya pelepasan hormon giberelin dari skutellum ke bagian aleuron untuk menstimulasi pembentukan enzim-enzim lainnya.



Gambar 27. Ilustrasi benih

Sel-sel skutellum kaya akan triasilgliserol yang akan dimobilisasi oleh enzim lipase. Pada sel lapisan aleuron jelai, diproduksi sekitar 60% α -amilase. Enzim fitase disintesis dalam aleuron untuk mobilisasi globoid yang mengantungi fitin. Enzim-enzim protease, fosfatase, dan nuklease juga disintesis di lapisan aleuron. Enzim limit dextrinase dan maltase diproduksi di bagian aleuron untuk menyertai α -amilase dalam hidrolisis cadangan pati. Enzim-enzim tersebut tidak dapat dilepaskan ke endosperma kecuali dinding sel aleuron dan dinding sel endosperma telah terurai. Hormon giberelin dalam

aleuron menstimulasi pembentukan enzim pentonase seperti β -xilanase dan α -arabidofuranosidase yang berperan melemahkan dinding sel aleuron dan endosperma, sehingga memudahkan pelepasan enzim-enzim dari sel aleuron ke endosperma.

Pengecualian terhadap pola sintesis dan pelepasan di atas ditunjukkan oleh β -amilase, setidaknya pada gandum, gandum hitam, beras, dan sorgum. Enzim ini disintesis dalam endosperma selama perkembangan endosperma, hadir dalam biji-bijian kering yang matang hingga 1% dari total protein di dalamnya, dan terikat pada protein di pinggiran butiran pati, dan mungkin pada protein endosperma lainnya, selama pematangan benih. Enzim ini diaktifkan ketika dilepaskan oleh enzim pemecah protein selektif yang disintesis dan dilepaskan dari lapisan aleuron, atau dengan mengurangi ikatan disulfida yang mengikatnya ke protein lain. Biji jagung tidak mengakumulasi β -amilase selama perkembangannya, namun disintesis secara *de novo* (disintesis dari tahap awal seperti proses sintesis α -amilase dll) di lapisan aleuron setelah perkecambahan.

Tahap metabolisme cadangan makanan

Biji merupakan sumber pangan utama di dunia yang mencapai 70% (sebagian besar dalam jenis sereal dan legum) dari sumber makanan yang dikonsumsi oleh manusia. Sumber lain menyebutkan bahwa sereal memasok 56% energi dari makanan dan 50% protein secara global. Selain itu, biji-bijian juga banyak yang menjadi bahan baku bukan makanan seperti biodiesel, plastik biodegradable, tekstil, sabun, dan lain-lain. Kajian-kajian untuk mendukung perkembangan industri-industri produk ramah lingkungan bukan makanan tersebut terus dilakukan sebagai respons terhadap perubahan iklim global. Sebagian dari jenis biji-bijian yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku industri produk-produk ramah lingkungan juga merupakan sumber makanan utama manusia di dunia. Perkembangan tersebut dapat meningkatkan kebutuhan benih tanaman-tanaman sereal dan legum karena kebutuhan budidaya untuk tujuan yang semakin beragam, bukan hanya untuk kebutuhan makanan.

Pemanfaatan biji-bijian sebagai bahan baku produk industri bukan makanan merupakan tindak lanjut dari berbagai kajian yang menunjukkan bahwa telah terjadi akumulasi senyawa-senyawa organik di dalam benih selama pembentukannya pada tanaman induk. Akumulasi berbagai senyawa

organik tersebut diduga merupakan mekanisme biologis yang dilakukan oleh tanaman induk untuk mempertahankan spesiesnya, karena berbagai kajian menunjukkan bahwa senyawa-senyawa organik dalam benih akan dimanfaatkan oleh embrio sebagai cadangan makanan yang menjadi sumber energi dan bahan baku dalam pertumbuhannya menjadi kecambah. Beragam kajian mutu benih menunjukkan bahwa porsi cadangan makanan dalam benih mempengaruhi kemampuan benih untuk tumbuh menjadi tanaman normal, baik dalam lingkungan optimum maupun lingkungan suboptimum.

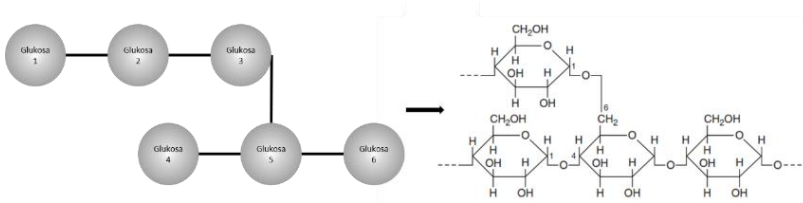
Genetik merupakan faktor utama yang menentukan komposisi kimia benih. hal tersebut menimbulkan keberagaman komposisi kimia benih berdasarkan spesies, varietas, dan kultivar. Tindak-tandak agronomi seperti waktu tanam, dosis pupuk, jenis pupuk, metode aplikasi pupuk, dan pemangkasan daun, terutama selama periode pengisian biji dapat mempengaruhi komposisi kimia benih antar varietas atau kultivar dari satu spesies yang sama. Peran pemulia tanaman menjadi sangat penting melalui persilangan dan seleksi, untuk memanipulasi komposisi kebanyakan benih tanaman, sehingga memudahkan ketersediaan biji dengan kualitas dan kuantitas komposisi kima yang optimal bagi kebutuhan makanan manusia, industri, dan atau bagi ketersediaan benih bermutu. Secara garis besar, terdapat empat macam senyawa kimia dalam benih yaitu karbohidrat, protein, lemak/minyak, dan fitin.

Karbohidrat

Karbohidrat dalam benih/biji merupakan hasil translokasi dari sel-sel organ fotosintetik ketika sel-sel dari organ-organ tersebut tidak mengalami pertumbuhan lagi. Sehingga, hasil fotosintesisnya yang berupa glukosa harus disimpan pada organ penyimpanan baru yaitu biji. Dalam sel-sel biji, glukosa-glukosa akan disintesis menjadi saling berikatan membentuk pati pada bagian amiloplas (organel penyimpan pati). Pati hasil sintesis dapat berbentuk amilosa dan atau amilopektin.



Gambar 28. Struktur pati dalam bentuk amilosa



Gambar 29. Struktur pati dalam bentuk amilopektin

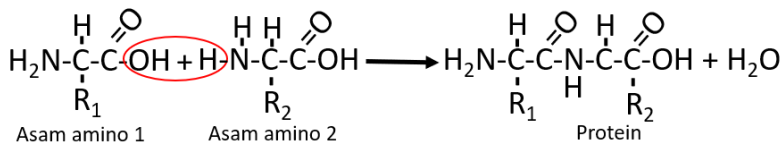
Amilosa adalah polimer rantai lurus dengan panjang sekitar 100-10.000 unit glukosa yang dihubungkan oleh ikatan glukosidik 1-4. Amilopektin jauh lebih besar (10^2 - 10^3 kali lipat); terdiri dari banyak rantai amilosa yang menghasilkan molekul bercabang banyak, setiap rantai cabang memiliki panjang 6-80 unit glukosa yang dihubungkan oleh ikatan 1-6.

Pada biji monokotil, karbohidrat merupakan cadangan penyimpanan utama. Telah didokumentasikan dengan baik bahwa α -amilase dalam lapisan aleuron biji monokotil memainkan peran penting dalam menghidrolisis pati endosperma menjadi gula, yang menyediakan energi untuk pertumbuhan akar dan koleoptil. Pati yang tersimpan dalam endosperma dilaporkan terhidrolisis dengan cepat selama perkecambahan, pada benih *Oryza sativa*, *Sorgum bicolor*, dan *Avena sativa*. Pada benih-benih ini, sebagian besar enzim hidrolitik diproduksi di aleuron atau skutellum sebagai respons terhadap sinyal perkecambahan. Sintesis GA aktif penting untuk ekspresi α -amilase di endosperma. Selain itu, peran kalsium mungkin diharapkan melibatkan stabilitas amilase, dan memiliki keterlibatan yang jauh lebih kompleks dalam mengatur aktivitas enzim. Aktivitas amilase diatur oleh konsentrasi gula pereduksi secara *in vivo* pada kotiledon dan aksis yang meningkat secara bertahap, sementara pati menurun.

Protein

Protein (polipeptida) adalah polimer yang terdiri dari sekitar 20 asam amino yang berbeda, dan dapat terdiri dari rantai tunggal (peptida), atau sejumlah rantai terkait dengan ukuran yang sama atau berbeda. Oleh karena itu, jumlah kandungan asam amino menjadi penentu ukuran setiap molekul protein. Klasifikasi T.B Osborne telah digunakan untuk membagi protein biji menjadi empat kelas berdasarkan kelarutannya, yaitu: (1) albumin, larut dalam air dan buffer encer pada pH netral; (2) globulin, larut dalam larutan garam

tetapi tidak larut dalam air; (3) glutelin, larut dalam asam encer atau larutan alkali; (4) prolin (prolamin), larut dalam alkohol encer (70-90%).



Gambar 30. Ikatan peptida protein

Cadangan protein memiliki peran sebagai penyimpan karbon, nitrogen, dan sulfur untuk mendukung pertumbuhan awal kecambah. Cadangan protein sebagian besar sereal seperti jagung, barley, gandum hitam, gandum, dan sorgum didominasi oleh jenis prolamin, sedangkan globulin mendominasi cadangan protein beras. Globulin merupakan cadangan protein yang banyak tersimpan di embrio dan lapisan aleuron benih, dengan porsi yang sangat kecil dari total cadangan protein seluruh benih/biji.

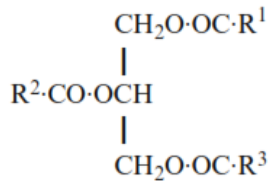
Cadangan protein benih biasanya disimpan di dalam organel seluler khusus yang disebut vakuola penyimpan protein (PSV), yang sebelumnya disebut badan protein. Umumnya, organel ini menyimpan lebih dari satu jenis protein, jenis legum tertentu memiliki PSV dengan hanya satu jenis cadangan protein. Diameter PSV berkisar antara 0,1 hingga 25 μm . Selama perkembangan benih, organel ini dikelilingi oleh membran yang berasal dari sistem endomembran seluler. Beberapa jenis benih/biji tidak memiliki membran yang lengkap bahkan ada yang tidak memiliki membran ini, menyebabkan protein hanya tersimpan di bagian sitoplasma. Berbagai enzim mungkin terdapat di dalam PSV pada biji yang sudah matang, dan selama mobilisasi cadangan protein, enzim-enzim lain ditambahkan sehingga pada akhirnya menjadi vakuola autolitik (terbentuk sebagai hasil dari proses autolisis, yaitu penghancuran sel atau komponen sel yang disebabkan oleh enzim yang ada di dalam sel itu sendiri).

Selama perkecambahan benih dan perkembangan bibit, hidrolisis protein dari bahan makanan cadangan menghasilkan asam amino bebas, yang digunakan sebagai bahan penyusun sintesis protein dalam endosperm dan embrio. Selain itu, karboksipeptidase yang dikombinasikan dengan sistein proteinase memfasilitasi aliran hidrolisis protein. Enzim kunci lainnya yang

mengkatalisis hidrolisis protein dan biosintesis pada benih yang berkecambah adalah proteinase, protease, proteinase mirip leguminosa, metaloproteinase, dan aminopeptidase.

Lipida

Cadangan makanan benih dalam bentuk lipida biasanya tersimpan sebagai senyawa triasilgliserol (TAG, sebelumnya disebut trigliserida). Secara umum, lipida terdapat dalam dua bentuk yaitu minyak atau lemak. Sebagian besar lipida benih tersimpan dalam bentuk minyak, karena berbentuk cair di atas suhu sekitar 20 °C. Beberapa benih juga mengandung fosfolipid, glikolipid, dan sterol dalam jumlah yang cukup besar. Ketiganya dikenal sebagai bentuk ester dari gliserol dan asam lemak.



Gambar 31. Struktur kimia triasilgliserol atau trigliserida

Organel subseluler yang disebut badan minyak (juga disebut badan lipid, oleosom, sferosom atau; pada jojoba, badan lilin) merupakan organel yang bertanggungjawab dalam penyimpanan cadangan TAG dalam biji. Memiliki ukuran yang berbeda antar spesies dan varietas antar spesies, yaitu sekitar 0,2 hingga 6 µm. Setiap badan minyak dikelilingi atau dibungkus oleh lapisan tipis yang disebut membran fosfolipid. Di dalam fosfolipid terdapat beberapa protein unik, terutama oleosin. Itu sebabnya, ukuran badan minyak memiliki korelasi dengan jumlah oleosin. Pada biji dengan kandungan minyak yang tinggi, badan minyak menempati volume sel yang cukup besar, seperti pada endosperma biji jarak.

Saat perkecambahan berlangsung, TAG dihidrolisis menjadi asam lemak bebas dan molekul gliserol. Gliserol yang dilepaskan selanjutnya dimetabolisme menjadi glikolitik intermediet dihidroksiaseton fosfat (DHAP) untuk sintesis gula, asam amino (terutama asparagin, aspartat, glutamin, dan glutamat), serta rantai karbon yang diperlukan untuk makromolekul lain untuk mempertahankan pertumbuhan embrio. lipase adalah kelompok enzim hidrolitik terpenting yang terkait dengan metabolisme lipid selama

perkecambahan yang mengkatalisis hidrolisis ikatan ester karboksilat yang melepaskan asam lemak dan alkohol organik.

Fitin

Tumbuhan dan atau tanaman membutuhkan mineral untuk mendukung seluruh proses pertumbuhan dan perkembangannya. Benih memiliki molekul asam fitat (myo-inositol-6-phosphate atau InsP_6 atau IP_6 atau $\text{C}_6\text{H}_{18}\text{O}_{12}\text{P}_6$) yang merupakan molekul yang berperan sebagai cadangan fosfat (ion PO_4^{3-}). Molekul ini merupakan hasil reaksi antara myo-inositol ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) dengan ATP, dimana ATP berperan sebagai penyedia gugus fosfat. Ketersediaan gugus fosfat dalam molekul asam fitat memungkinkannya untuk mengikat mineral-mineral lainnya bagi perkecambahan. Asam fitat yang sudah mengikat mineral dan menyimpannya dalam biji/benih disebut sebagai fitin.

Tabel 22. Kandungan unsur anorganik utama fitin dalam biji dari berbagai spesies, dan lokasinya (Bewley et al, 2013)

Spesies	Mg	Ca	K	P	Fe	Mn	Cu
Barlei (A,E)	0,16	0,03	0,56	0,43			
Kacang panjang (C)	0,11	0,05	1,13	0,51			
Kapas (C)	0,4	0,13	2,18	0,79	0,059	0,003	0,005
Gandum (A,E)	0,4	0,19	1,1	0,96	0,035	0,008	0,005
Kedelai (C)	0,22	0,13	2,18	0,71			
Bunga matahari (C)	0,4	0,2	1	0,01			

Keterangan : A Lapisan aleuron. E embrio, termasuk skutellum. C kotiledon (mungkin ada sejumlah kecil di radikula/aksis hipokotil). Nilai dinyatakan sebagai % dari berat kering biji. Variabilitas kandungan ion mineral terjadi antara kultivar dan galur dari spesies yang sama, dan juga dipengaruhi oleh kandungan mineral tanah tempat tanaman induk tumbuh (Weber & Neumann, 1980).

Pada benih yang berkecambah, fitin dihidrolisis oleh fitase, enzim fosfatase asam melepaskan fosfat, kation, dan inositol yang digunakan oleh bibit yang sedang berkembang. Selain itu, senyawa yang berhubungan dengan IP_6 seperti pirofosfat yang mengandung inositol fosfat (PP-IP) memainkan peran penting dalam menyediakan P_i untuk sintesis ATP selama tahap awal perkecambahan.

Translokasi

Tahap translokasi merupakan tahapan yang memastikan bahwa hasil hidrolisis cadangan makanan benih dapat dimanfaatkan oleh embrio untuk proses pertumbuhan selanjutnya. Pati yang terhidrolisis menjadi glukosa dan maltosa akan ditranslokasi ke scutellum untuk diubah menjadi sukrosa, yang merupakan molekul karbohidrat yang paling mudah ditranslokasikan ke embrio.

Asam lemak hasil hidrolisis TAG masuk ke peroksisom/glioksisom embrio benih untuk diubah menjadi asam oksaloasetat (OAA), lalu masuk ke mitokondria kemudian ke sitosol untuk diubah menjadi sukrosa untuk digunakan dalam proses metabolisme selanjutnya.

Asam amino, dipeptide, dan sejumlah oligopeptide kecil hasil hidrolisis protein benih, dengan cepat diserap oleh embrio, melalui skutellum. Dipeptida dan tripeptide diserap lebih efisien dibandingkan asam amino. Peptida yang terserap akan diurai oleh peptidase menjadi asam amino, karena hanya asam amino bebas yang terakumulasi dalam embrio yang sedang tumbuh.

Hidrolisis fitin menghasilkan fosfat, kation terikat, dan myo-inositol. Fosfat dan ion terikat yang dilepaskan diduga diserap oleh scutellum dan didistribusikan pada kecambah yang sedang tumbuh. myo-inositol yang dilepaskan dapat digunakan oleh untuk sintesis dinding sel kecambah yang sedang tumbuh.

Pertumbuhan embrio

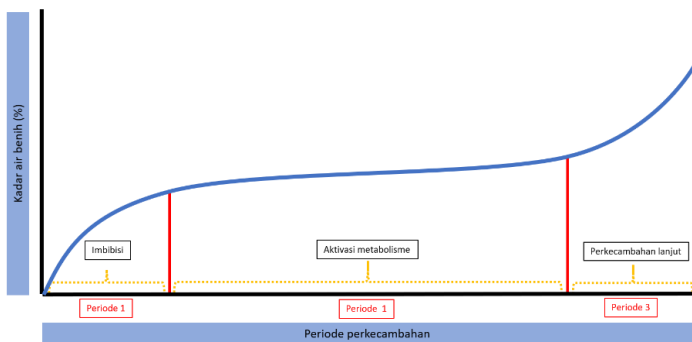
Sukrosa yang diperoleh embrio dari skutellum akan dihidrolisis menghasilkan glukosa dan fruktosa. Keduanya akan masuk ke siklus glikolisis dan siklus krebs, yang merupakan tahap untuk menghasilkan energi bagi proses pertumbuhan embrio, termasuk pemanfaatan hara hasil perombakan fitin. Pertumbuhan diawali dengan pembelahan dan perluasan sel, pembentukan jaringan, hingga terbentuknya organ-organ awal kecambah.

Keluarnya radikula serta pertumbuhan struktur kecambah (perkecambahan lanjut)

Setelah embrio memperoleh sumber energi dan atau bahan pembentukan organ-organ kecambah, organ-organ yang terbenyuk tersebut akan menembus bagian terluar dari benih yang disebut testa. Pembentukan dan atau peningkatan ukuran organ mengindikasikan bahwa semakin banyak

jumlah sel dan ruang antar sel baru yang memiliki potensial air yang rendah. Oleh karena itu, kemunculan organ seperti radikula dan plumula (pada monokotil dilindungi oleh koleoptil) akan diikuti penyerapan air. Sehingga, kandungan air total dari seluruh bagian benih mengalami peningkatan seiring dengan pertumbuhan organ kecambah. Semakin besar organ kecambah yang terbentuk maka akan semakin banyak air yang diserap.

Kemunculan radikula sangat dipengaruhi oleh faktor internal dan eksternal benih. Faktor internal benih yang mempercepat kemunculan radikula yaitu proses-proses katabolisme dalam endosperma atau kotiledon dan proses-proses anabolisme dalam sel-sel embrio. Cepat lambatnya kedua proses metabolisme tersebut menentukan cepat lambatnya pembentukan dan pertumbuhan radikula. Selain itu, kualitas senyawa penyusun struktur sel dan struktur jaringan embrio juga menentukan kekuatan struktur kecambah dalam menembus testa. Faktor eksternal benih yang mempengaruhi kecepatan kemunculan radikula dalam menembus testa yaitu faktor-faktor lingkungan yang dapat melunakkan testa, sehingga lebih mudah terdegradasi oleh radikula.



Gambar 32. Hubungan perkecambahan benih dengan kadar air benih pada periode 1,2, dan 3 (Bewley and Black, 1994)

8.3 Viabilitas benih

Viabilitas benih adalah daya hidup benih. Benih yang memiliki nilai daya hidup yang baik disebut benih viabel, sedangkan benih yang tidak memiliki nilai daya hidup yang baik disebut benih non viabel. Nilai penurunan viabilitas benih (menjadi lebih non viabel) bersifat irreversible, nilai viabilitasnya tidak

bisa dikembalikan. Penilaian viabilitas benih dapat dilakukan melalui pendekatan langsung dan tidak langsung.

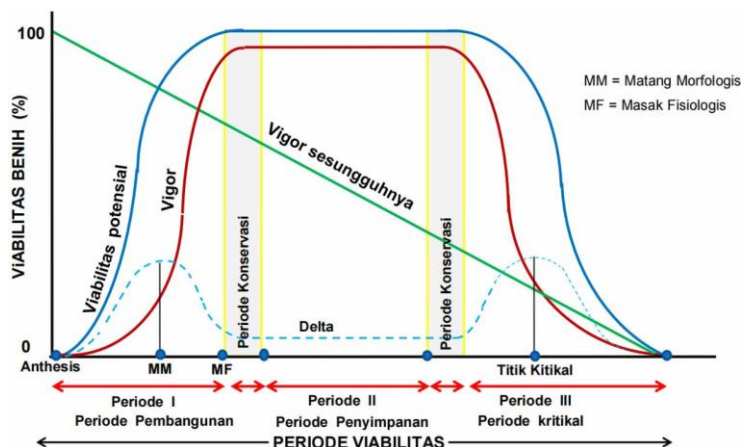
Pendekatan langsung merupakan pendekatan yang menggunakan parameter fisiologis. Pendekatan ini melakukan penilaian terhadap pertumbuhan kecambah, dengan tolok ukur seperti daya berkecambah, kecepatan tumbuh, potensi tumbuh maksimum, kemunculan radikula, persentasi kecambah pada hitungan pertama, dan kemunculan radikula. Pendekatan tidak langsung terbagi atas dua bentuk pendekatan yaitu :1). Pendekatan biokimiawi; penilaian aktivitas metabolisme benih, dengan tolok ukur aktivitas enzim dalam proses respirasi benih, sintesis ATP benih, kandungan cadangan makanan benih, dan sebagainya; 2). Pendekatan sitologis; penilaian pada kondisi kromosom, membran sel, mitokondria, dan sebagainya.

Terdapat satu pendekatan lagi, yang disebut pendekatan matematis, yaitu pendekatan yang menggunakan hasil pengamatan dari suatu tolok ukur viabilitas benih (langsung maupun tidak langsung), lalu menjabarkannya ke dalam suatu model matematika yang dapat digunakan untuk pendugaan viabilitas secara cepat dan atau untuk membentuk model sistem dinamis viabilitas benih, yang dapat digunakan dalam proses prediksi viabilitas benih pada kondisi lingkungan yang dinamis, khususnya selama periode penyimpanan benih.

Pengujian-pengujian viabilitas benih sebagai suatu nilai daya hidup benih bersifat relatif apabila dinilai pada suatu momen periode viabilitas (MPV), sehingga hanya berfungsi komparatif. Nilai ini berfungsi untuk membandingkan antara suatu lot benih/perlakuan dengan lot benih/perlakuan lainnya dalam suatu penelitian atau pengujian, sehingga nilai viabilitas yang terukur tidak dapat digunakan untuk tujuan simulatif. Simulasi perubahan nilai viabilitas hanya dapat dilakukan jika nilai viabilitas absolut telah ditetapkan. Nilai viabilitas absolut merupakan nilai viabilitas berbasis potensi genetik dari suatu spesies atau varietas. Oleh sebab itu, kajian mengenai potensi genetik terkait nilai viabilitas absolut sangat membantu dalam upaya simulasi perubahan nilai viabilitas benih akibat perubahan kondisi lingkungan dan atau penanganan benih.

Sadjad (1993) telah membuat sebuah model hipotetik viabilitas benih yang merupakan hasil pengembangan dari model viabilitas benih yang

dikembangkan oleh Steinbauer. Model tersebut kemudian disempurnakan oleh Abdul qadir hingga menjadi seperti dibawah ini.



Gambar 33. Model konsepsi steinbauer-sadjad; Viabilitas benih pada setiap periode viabilitas (Qadir, 2024)

Garis-garis viabilitas pada periode I dan III mengikuti fungsi Gane dengan ketentuan pada periode I terjadi proses invigorasi (proses yang menyebabkan peningkatan mutu benih), sedangkan pada periode III terjadi proses devigorasi (proses yang menyebabkan penurunan mutu benih). Mengikuti garis nilai delta, maka baik pada periode I maupun periode III terjadi titik anomali. Garis viabilitas potensial yang digambarkan pada model tersebut merupakan model nilai viabilitas terbaik yang dapat dicapai oleh benih pada setiap periode viabilitas dalam kondisi lingkungan yang paling sesuai bagi ekspresi gen-gen yang terlibat dalam perkecambahan, hingga membentuk kecambah dengan kondisi terbaik. Sedangkan garis vigor merupakan model nilai viabilitas yang dapat dicapai oleh benih pada setiap periode viabilitas ketika satu atau lebih kondisi lingkungan menyebabkan terjadinya mekanisme biokimia yang merubah kondisi benih dari kondisi optimalnya, sehingga membentuk kecambah dengan kondisi dibawah dari kecambah terbaik.

Periode I merupakan periode yang paling menentukan nilai viabilitas dan vigor benih karena selama periode ini terjadi pembentukan benih yang

diawali dengan terbentuknya seluruh struktur benih atau disebut sebagai fase matang morfologi (MF) hingga akumulasi cadangan makanan maksimum atau disebut sebagai fase masak fisiologis (MF⁺). oleh sebab itu, teknik budidaya dan kondisi lingkungan tanaman induk benih harus diupayakan dalam kondisi yang optimal agar memperoleh benih dengan nilai viabilitas yang tidak berbeda signifikan dengan nilai viabilitas potensialnya. Vigor benih cenderung akan mengalami penurunan setelah fase MF akibat tekanan lingkungan. Pada tahap ini diperlukan penanganan benih dengan menggunakan teknologi yang dapat mempertahankan kondisi benih setelah fase MF hingga fase konservasi sebelum periode III. Periode II menuju periode III akan semakin panjang jika penanganan benihnya dilakukan dengan tepat, dan begitu pula sebaliknya.

8.4 Dormansi Benih

Dormansi merupakan suatu keadaan yang menunjukkan benih yang viabel tidak atau belum memulai proses-proses fisiologi dan mekanisme biokimia perkecambahan. Keadaan ini disebabkan oleh kurang atau tidak adanya satu atau lebih syarat-syarat faktor internal dan atau faktor eksternal benih untuk berkecambah. Penyebab dormansi dari faktor-faktor internal benih dapat bersumber dari testa, endosperma atau kotiledon, dan embrio. Jika salah satu dari ketiga bagian benih itu tidak memenuhi syarat perkecambahan benih, maka benih akan mengalami dormansi. Testa menyebabkan dormansi melalui hambatan pertukaran gas, hambatan penyerapan air, dan menjadi hambatan mekanis karena sulit ditembus oleh plumula dan radikula. Endosperma atau kotiledon menjadi sumber dormansi apabila mekanisme perombakan dan transportasi cadangan makanan tidak berlangsung secara optimal. Embrio menjadi sumber dormansi apabila pertumbuhannya lambat atau mati.

Faktor-faktor eksternal benih yang dapat menyebabkan dormansi yaitu apabila benih tidak menempati ruang dengan pencahayaan yang optimal, suhu yang tepat, oksigen yang cukup, dan potensial air yang tinggi. Kondisi-kondisi eksternal atau lingkungan benih seperti itu menyebabkan proses fisiologis dan mekanisme biokimia benih tidak dapat berlangsung. Diantara peran dari masing-masing faktor-faktor eksternal benih yaitu, cahaya dapat mempengaruhi aktivitas hormonal benih, suhu berperan dalam mengatur laju atau lambatnya proses fisiologi dan mekanisme biokimia dalam benih, oksigen

mempengaruhi aktivitas respirasi seluler benih, sedangkan air berperan dalam memaksimalkan fungsi-fungsi enzimatis dalam benih.

Dormansi memiliki keuntungan sekaligus kerugian secara agronomis, yaitu :

Keuntungan :

1. Merupakan mekanisme untuk mempertahankan eksistensi spesiesnya.
2. Mencegah terjadinya perkecambahan selama penyimpanan dan atau di lapangan pada waktu yang tidak diinginkan oleh petani, peneliti benih, produsen benih, dan pihak lain.
3. Meningkatkan daya simpan benih pada beberapa spesies.
4. Memastikan proses penyebaran dan distribusi benih dapat berlangsung dengan baik.

Kerugian :

1. Memperpanjang waktu perkecambahan setelah penanaman.
2. Waktu berkecambah atau kemunculan di lapangan menjadi tidak seragam.
3. Ketidak seragaman dalam waktu berkecambah dapat menyebabkan ketidak seragaman dalam waktu panen.
4. Menimbulkan masalah dalam interpretasi hasil pengujian benih, boleh jadi benih tidak berkecambah karena dormansi atau tidak berkecambah karena mati.

Daftar keuntungan dan kerugian dari dormansi benih diatas dapat bertambah seiring dengan perkembangan penelitian dan atau pengalaman yang dialami oleh pihak-pihak yang terkait dengan penelitian, produksi, penyimpanan, distribusi, dan penggunaan benih. Terkhusus pada kerugian yang ditimbulkan oleh dormansi benih, hingga saat ini telah banyak dikembangkan penelitian metode mematahkan dormansi benih, baik metode dengan pendekatan fisiologis maupun pendekatan fisik. Prinsip dari metode pematahan dormansinya yaitu harus disesuaikan dengan penyebab dormansi. Jika penyebabnya terletak pada testa maka metodenya harus dikaitkan dengan testa, jika penyebabnya terletak pada endosperma atau kotiledon maka metodenya harus terkait dengan fisiologi atau biokimia endosperma atau kotiledon, dan jika penyebab dormansinya terletak pada embrio maka metode pematahan dormansinya harus terkait dengan pertumbuhan embrionya.

DAFTAR PUSTAKA

- Bewley, J.D. Bradford, K.J. Hilhorst, H.W.M. Nonogaki H. 2013. Seed physiology of development, germination and dormancy third edition. Springer.
- Black, M. Bradford, K.J. Ramos, J.V. 1999. Seed biology advances and application. CABI publishing
- Cordain, L., 1999. *Cereal grains: humanity's double-edged sword*. World Review of Nutrition and Dietetics, 84, pp.19–73.
- Dadlani, M. Yadava, D.K. 2023. Seed science and technology biology, production, quality. Springer
- Dubey, A.N., Verma, S., Goswami, S.P. and Devedee, A.K., 2018. *Effect of temperature on different growth stages and physiological process of rice crop – a review*. Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences, 7(11), pp.129–136.
- Komy, Z.R., 2004. Determination of acidic sites and binding toxic metal ions on cumin surface using nonideal competitive adsorption model. *Journal of Colloid and Interface Science*, 270(2), pp.281–287.
- Ma, J., Liu, H., Han, C., Zeng, S., Xu, X., Lu, D. and He, H., 2020. Extraction, characterization and antioxidant activity of polysaccharide from *Pouteria campechiana* seed. *Carbohydrate Polymers*, 229, p.115409.
- Qadir, A. 2024. Kuantifikasi Metabolisme Benih. Bogor: Bahan Ajar Mata Kuliah Kuantifikasi Metabolisme Benih.
- Samoraj, M. and Michalak, I., 2015. FTIR analysis and potentiometric titration in identification of functional groups on the surface of new biosorbents – strawberry and raspberry seeds.
- Sadjad, S. 1994. Kuantifikasi Metabolisme Benih. Jakarta: Gramedia Widayarsana Indonesia.
- Tapia-Quiroz, G.E., Valencia-Leal, S.A., Vázquez-Guerrero, A., Alfaro-Cuevas-Villanueva, R., Escudero-García, R. and Cortés-Martínez, R., 2025. Surfactant-enhanced guava seed biosorbent for lead and cadmium removal: kinetics, thermodynamics, and reusability insights.
- Widajati, E. Murniati, E. Palupi, E.R. Kartika, T. Suhartanto, M.R. Qadir, A. 2017. Dasar Ilmu dan Teknologi Benih. Bogor: IPB Press
- Widajati, E. 2024. Fisiologi dan Biokimia Benih. Bogor: Bahan Ajar Mata Kuliah Fisiologi Dan Biokimia Benih
- Yudono, P. 2012. Perbenihan Tanaman Dasar Ilmu, Teknologi, dan Pengelolaan. Yogyakarta: UGM Press

Shewry, P., Miflin, B., Forde, B. and Bright, S., 1981. *Conventional and novel approaches to the improvement of the nutritional quality of cereal and legume seeds.*

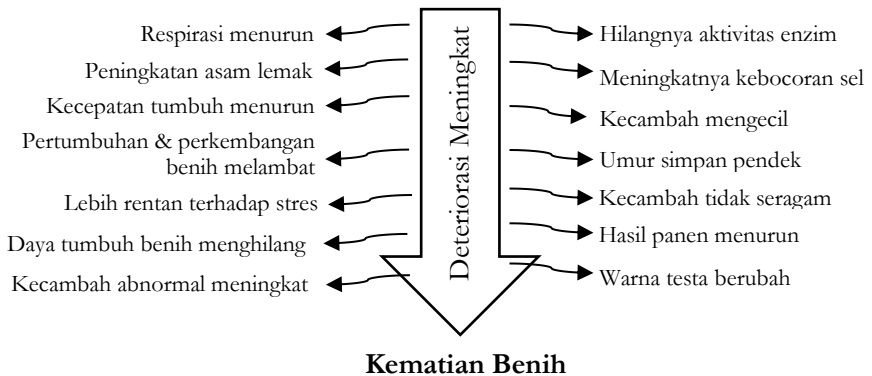
BAB 9

TEKNOLOGI PENYIMPANAN BENIH

Oleh: Indri Fariroh

9.1 Prinsip Penyimpanan Benih untuk Viabilitas Jangka Panjang

Penyimpanan benih bertujuan untuk menyediakan benih bermutu tinggi untuk musim tanam selanjutnya sehingga produksi tanaman dapat terjaga. Penyediaan benih bermutu tinggi umumnya terkendala oleh penurunan viabilitas benih selama proses penyimpanan. Salah satu upaya yang bisa dilakukan untuk mempertahankan viabilitas benih selama penyimpanan adalah menurunkan laju respirasi pada benih. Tingginya laju respirasi pada benih menyebabkan peningkatan kehilangan energi serta cadangan makanan di daerah embrio, sehingga menurunkan kemampuan benih untuk berkecambah. Adanya penurunan kemampuan benih dalam berkecambah merupakan indikator awal pada benih yang mengalami kemunduran viabilitas. Proses kemunduran viabilitas ini dikenal dengan istilah deteriorasi (Widajati *et al.*, 2008). Beberapa gejala yang timbul pada benih yang sudah mengalami deteriorasi diilustrasikan pada Gambar 34 (Copeland, 1976):



Gambar 34. Gejala kemunduran benih

Proses deteriorasi pada benih merupakan proses yang tidak dapat balik (*irreversible*), yang berarti benih bermutu rendah tidak dapat dipulihkan lagi menjadi benih bermutu tinggi. Benih bermutu rendah bisa ditingkatkan

viabilitasnya melalui teknik invigorasi melalui *seed priming* atau *preconditioning*. Peningkatan mutu benih menggunakan teknik invigorasi hanya meningkatkan potensi benih untuk berkecambah, namun tidak meningkatkan mutu fisiologi benih yang sesungguhnya (Widajati et al., 2008). Meskipun deteriorasi benih merupakan proses yang *irreversible*, namun deteriorasi benih dapat diperlambat melalui teknologi penyimpanan yang baik.

9.2 Faktor – Faktor yang Mempengaruhi Umur Simpan

Setiap spesies memiliki umur benih (*seed longevity*) yang berbeda tergantung variasi genetiknya. Umur benih bisa dihitung dari periode masak fisiologis atau masak panen hingga benih mati, dari pre-prosesing hingga benih mati, atau dihitung dari viabilitas awal hingga viabilitas benih < 80%. Beberapa faktor utama yang mempengaruhi umur simpan benih adalah faktor internal dan eksternal pada benih.

9.2.1 Faktor internal pada benih

a. Genetik benih

Adanya variasi antar spesies menyebabkan perbedaan umur simpan pada benih. Benih dari famili Leguminosae memiliki variasi simpan yang berbeda mulai dari penyimpanan setahun hingga bisa disimpan selama ratusan tahun. Benih tanaman kehutanan seperti *albizia* bisa disimpan hingga 147 tahun, *cassia* hingga 158 tahun, *goodia* hingga 105 tahun, dan *trifolium* hingga 100 tahun (Gambar 35). Sementara itu, benih tanaman pangan yang juga termasuk Leguminosae seperti kedelai hanya bisa disimpan selama satu tahun, bahkan benih kacang tanah hanya bisa disimpan selama 6 bulan. Beberapa contoh lainnya yaitu benih dari famili Poaceae atau Gramineae yang memiliki umur simpan yang berbeda seperti benih barley yang paling tahan simpan hingga 32 tahun. Benih oats bisa disimpan hingga 11 tahun, benih jagung dan gandum hanya bisa disimpan selama 3 tahun, sebaliknya benih rye hanya bisa bertahan selama 15 minggu saja (Gambar 36) (Justice & Bass, 1990).



Gambar 35. *Albizia julibrissin*, *Cassia fistula*, *Goodia medicaginea*, *Trifolium fragiferum*

Tingkat ketebalan testa serta komposisi benih yang berbeda merupakan faktor genetik yang mempengaruhi umur simpan benih. Benih dengan testa

yang tebal mempunyai dormansi fisik sebagai mekanisme alami benih dalam mempertahankan viabilitasnya dari kondisi lingkungan yang sub-optimum, sehingga bisa disimpan selama bertahun-tahun. Sebaliknya, benih dengan testa yang tipis memiliki umur simpan pendek karena memiliki permeabilitas membran yang tinggi.



Gambar 36. Benih kedelai, kacang tanah, barley, benih oat, benih rye

Perbedaan variasi umur simpan benih juga ditemukan di dalam kultivar atau varietas. Benih pepaya var. Callina hanya bisa disimpan selama 4 bulan, pepaya var. Sukma hanya 3 bulan, sementara itu pepaya var. Arum Bogor hanya bisa disimpan selama satu bulan saja. Perbedaan umur simpan di dalam varietas pepaya disebabkan karena adanya perbedaan respon benih terhadap kondisi ruang simpan dan kadar air benih (Rosyad et al., 2017). Perbedaan genetik pada warna testa benih juga mempengaruhi umur simpan benih. Benih kedelai hitam var. lokal Ciwalen mampu disimpan selama 6 bulan sementara benih kedelai kuning var. Wilis hanya bisa disimpan selama satu bulan. Kedelai hitam mempunyai permeabilitas membran yang lebih rendah karena kandungan lignin yang lebih tinggi. Permeabilitas testa yang rendah mampu menghambat masuknya air dan oksigen ke dalam benih, sehingga bisa menunda respirasi benih. Terhambatnya proses respirasi benih menyebabkan benih bisa disimpan lebih lama (Purwanti, 2004). Perbedaan umur simpan juga terjadi di dalam satu lot benih. Benih di dalam satu lot tidak akan mati secara bersamaan. Meskipun benih diproduksi dan diproses dalam waktu bersamaan, karakter ketahanan benih lebih bersifat individual (Kuswanto, 2003).

b. Struktur dan komposisi benih

Benih berukuran besar lebih rentan mengalami kerusakan jika dibandingkan dengan benih berukuran kecil. Hal ini disebabkan karena pada benih besar seperti pada Leguminosae, embrio terletak di dekat testa sehingga lebih rentan rusak jika dibandingkan dengan benih kecil yang letak embrionya berada di tempat yang lebih dalam (Kuswanto, 2003). Benih jagung berukuran besar dan pipih, namun mempunyai perikarp yang kuat, bagian benih melekat dengan kuat, serta lokasi embrio di bagian dalam menyebabkan

benihnya lebih terlindungi dari kerusakan mekanis. Benih dengan ujung akar embrio yang lebih panjang dari ukuran benih juga rentan terhadap kerusakan mekanis, seperti benih bawang (Justice & Bass, 1990).

Ada atau tidaknya gluma atau sekam (lemma dan palea) pada benih dari famili Gramineae diketahui mempengaruhi umur simpan benih. Benih gandum Red Winter Speltz dengan kondisi bersekam lebih mampu mempertahankan viabilitasnya dibandingkan dengan benih yang dihilangkan sekamnya sebelum disimpan. Rata-rata persentase daya berkecambah 6 lot benih timothy yang masih bersekam lebih tinggi (78%) jika dibandingkan dengan benih tanpa sekam (40%) meskipun setelah disimpan selama dua tahun. Setelah 11 tahun penyimpanan, persentase daya berkecambah benih bersekam turun dari 98 menjadi 52%, sedangkan benih tanpa sekam turun dari 97% menjadi 16%. Sekam pada benih berperan penting dalam menghambat infeksi cendawan sehingga proses deteriorasi yang disebabkan oleh aktivitas mikroorganisme dapat dihambat. Penurunan viabilitas benih tanpa sekam selama penyimpanan berkaitan dengan terjadinya pelukaan mekanis pada benih karena tidak terlindungi (Justice & Bass, 1990).

Benih dengan testa yang keras (*hard seed*) dan impermeable terhadap air lebih tahan simpan. Testa yang keras melindungi benih dari perubahan kandungan air benih yang mampu mempengaruhi laju respirasi dan proses deteriorasi selama penyimpanan (Kuswanto, 2003). Sebagian besar benih dengan testa keras berasal dari famili Leguminosae, ada juga yang berasal dari famili Malvaceae seperti tanaman okra dan tanaman kapas, catnip dari famili Lamiaceae, geranium dari famili Geraniaceae, ganyong dari famili Cannaceae, kangkung dari famili Convolvulaceae, serta lotus dari famili Nymphaeaceae. Benih dengan testa keras bermanfaat dalam menjaga keberlangsungan plasma nutfah secara alamiah, namun menimbulkan masalah ketika akan ditanam untuk tujuan budidaya. Benih yang keras memerlukan perlakuan khusus sebelum dikecambahkan untuk menghasilkan perkecambahan yang seragam di lapang (Justice & Bass, 1990). Untuk melunakkan benih keras, (Harrington, 1972) merekomendasikan untuk menggunakan ruang simpan dengan suhu 21 °C, RH 50% atau sedikit lebih tinggi.

Benih sorgum var. Kawali bisa disimpan selama 2 tahun, sementara benih sorgum var. Numbu hanya satu tahun (Syahrani, 2024). Kandungan karbohidrat yang lebih tinggi pada Kawali (87,87%) dibandingkan dengan Numbu (84,58%) berperan penting dalam menyediakan cadangan makanan selama penyimpanan. Selain itu, kadar lemak yang rendah pada Kawali (1,97%) jika dibandingkan dengan Numbu (3,94%) berpotensi menurunkan

terbentuknya asam lemak bebas yang berperan pada proses deteriorasi selama penyimpanan (Aryani et al., 2022). Benih dengan kandungan lemak yang dominan mempunyai umur simpan pendek jika dibandingkan dengan benih yang dominan pati atau karbohidrat (Syamsuwida et al., 2016).

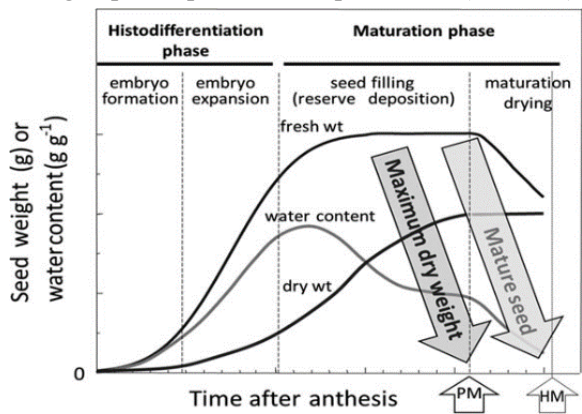
c. Tingkat kemasakan benih

Setiap tanaman memiliki periode pembungaan yang berbeda, dimana periode pembungaan dimulai dari inisiasi bunga, fertilisasi, pembentukan dan perkembangan benih, pematangan benih, hingga pemanenan benih. Mekanisme perlindungan pada benih terbentuk selama fase akhir pematangan benih, sehingga tahapan panen menjadi hal yang kritis dalam menentukan mutu dan umur simpan benih. Benih yang dipanen lebih awal menghasilkan benih bermutu rendah karena struktur penting benih dan mekanisme perlindungan benih belum berkembang sempurna. Sebaliknya, benih yang terlambat dipanen menurunkan mutu benih karena benih rentan rusak dan sudah mengalami deteriorasi. Penundaan panen benih berpotensi menghasilkan benih yang berkecambah karena terkena hujan dan kelembaban lingkungan yang tinggi. Selain itu, kondisi lingkungan yang lembab menyebabkan peningkatan infeksi cendawan sehingga merubah warna testa pada benih (Sripathy & Groot, 2023). Benih dengan viabilitas awal tinggi akan memiliki umur simpan yang lebih lama dibandingkan benih dengan viabilitas awal rendah (Widajati et al., 2008). Oleh karena itu, penentuan indeks panen benih perlu dilakukan untuk mendapatkan benih bermutu tinggi.

Pada saat masak fisiologis, benih menghasilkan bobot kering maksimum, namun belum mencapai vigor maksimum. Benih bervigor tinggi mampu menghasilkan perkecambahan yang baik di lapang pada saat kondisi sub-optimum. Untuk mendapatkan benih bervigor tinggi, benih dipanen setelah masa pematangan kering (*maturational drying*) sudah berakhir, yaitu saat masak panen. Masak panen adalah masa berakhirnya pengeringan biji yang masak ditandai dengan kadar air biji yang lebih rendah dari kadar air saat masak fisiologis (Sripathy & Groot, 2023). Vigor dan umur simpan benih mengalami peningkatan selama periode akhir pemasakan benih dan mencapai maksimum setelah memasuki masak panen (Gambar 37).

Benih yang dipanen dalam jumlah besar selalu heterogen karena mempunyai tingkat kemasakan yang berbeda. Panen benih sebaiknya dilakukan pada saat sebagian besar benih telah masak, yang ditandai dengan peningkatan diameter maupun bobot benih (Kuswanto, 2003). Benih wortel dengan diameter yang lebih besar menghasilkan perkecambahan yang lebih tinggi dibandingkan dengan benih berdiameter kecil. Benih yang dipanen pada

panenan ketiga menghasilkan persentase perkecambahan yang paling tinggi, dibandingkan dengan panen pertama maupun kedua (Tabel 23).



Gambar 37. Perkembangan bobot segar benih, bobot kering benih, dan kadar air benih selama perkembangan dan pematangan benih. PM (physiological maturity), masak fisiologis, indeks panen untuk konsumsi; HM (harvest maturity), masak panen, indeks panen untuk mutu benih (Sripathy and Groot, 2023)

Tabel 23. Diameter dan perkecambahan benih wortel pada umur panen yang berbeda (Austin and Longden, 1967)

Diameter benih (mm)	Perkecambahan (%)		
	Panen I	Panen II	Panen III
1,00 – 1,25	34	45	66
1,75 – 2,00	82	84	90

Tabel 24. Hubungan antara tingkat kemasakan benih dengan perkecambahan benih squash yang disimpan (Kuswanto, 2003)

Parameter	Saat Panen		4 Bulan Simpan		7 Bulan Simpan	
	Mature	Immature	Mature	Immature	Mature	Immature
Bobot 100 butir (g)	7,8	5,3	8,1	6,2	10,9	7,0
Perkecambahan (%)	90,8	19,0	98,4	67,2	97,0	77,0

Benih squash yang dipanen pada saat masak (*mature*) menghasilkan bobot 100 butir dan perkecambahan yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan benih belum masak (*immature*). Benih masak menghasilkan bobot 100 butir

dan perkecambahan yang lebih tinggi di penyimpanan dibandingkan dengan benih yang belum masak (Tabel 24). Kondisi cuaca sebelum dan saat panen juga mempengaruhi umur simpan benih. Benih yang dipanen pada saat cuaca kering memiliki umur simpan yang lebih baik dibandingkan dengan benih yang dipanen pada saat kondisi hujan. Untuk mendapatkan benih dengan umur simpan yang baik diperlukan perencanaan yang tepat supaya panen benih bertepatan dengan awal musim kemarau.

d. Dormansi benih

Benih yang sudah mencapai masak fisiologis tidak semuanya siap berkecambah. Beberapa benih membutuhkan waktu tertentu supaya dapat berkecambah secara alami setelah dipanen atau bahkan membutuhkan perlakuan tertentu supaya berkecambah. Benih yang mempunyai masa dormansi umumnya lebih mampu disimpan dalam jangka waktu yang lama (Kuswanto, 2003). Pada beberapa kondisi, dormansi bisa dihilangkan melalui proses penyimpanan pada suhu dan kelembaban nisbi yang terkendali, asalkan suhunya di sekitar atau di atas suhu titik beku. Dormansi pada benih barley, oat, rye dan gandum yang belum masak berlangsung lebih lama jika dibandingkan dengan benih yang sudah masak pada kondisi penyimpanan dengan suhu 0 hingga -35 °C. Kondisi penyimpanan dengan suhu rendah berpotensi memperpanjang masa dormansi pada benih (Justice & Bass, 1990). Pada suhu 2,2 °C, dormansi pada benih barley dan oat bisa bertahan selama 3 tahun. Sementara itu, dormansi bisa dipatahkan ketika benih disimpan pada suhu 40 °C (Brown et al., 1948).

Proses penyimpanan kering bisa menghilangkan dormansi pada benih selada (Harrington, 1972) dan padi. Benih padi tidak bisa langsung berkecambah setelah proses panen, namun harus melewati proses penyimpanan kering selama beberapa minggu supaya bisa berkecambah. Varietas padi Gilirang memiliki periode penyimpanan kering yang paling singkat yaitu satu minggu, sementara Inpari 42 dan Inpari 43 memiliki periode penyimpanan kering berturut-turut selama 2 dan 3 minggu supaya bisa berkecambah (Rini et al., 2025).

e. Kadar air benih (KA)

Kadar air benih merupakan salah satu faktor yang sangat mempengaruhi umur simpan benih. Waktu panen benih menjadi krusial karena akan mempengaruhi kadar air benih. Panen benih harus dilakukan pada saat benih sudah masak panen, dimana kadar air lebih rendah dari kadar air saat masak fisiologis. Benih yang dipanen pada kondisi kadar air tinggi, membutuhkan

proses pengeringan hingga benih mencapai kadar air yang aman simpan. Desikasi merupakan proses pengeringan yang bertujuan untuk mengurangi kandungan air di dalam benih. Secara fisiologis, proses desikasi menyebabkan penurunan asam absisat (ABA) sehingga memungkinkan terjadinya perkecambahan jika lingkungan mendukung. Kasus seperti ini terjadi pada benih dengan dormansi *after ripening* yaitu benih padi. Suhu maksimum pengeringan benih adalah 40 ± 3 °C. Batas penurunan kadar air benih terendah adalah 6%. Jika kadar air benih lebih rendah dari 6%, benih mudah retak (*desiccation injury*) sehingga uap air lebih mudah masuk dan mempermudah infeksi cendawan (Justice & Bass, 1990).

Faktor lingkungan yang paling mempengaruhi laju deteriorasi pada benih adalah kelembaban udara (RH) yang mempengaruhi kadar air benih dan suhu yang mempengaruhi kecepatan proses biokimia di dalam benih. Dua aturan praktis tentang pengaruh kadar air benih dan RH terhadap laju deteriorasi benih yaitu (Harrington, 1972):

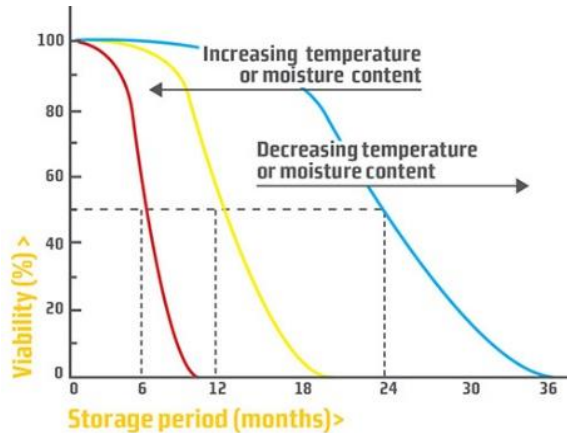
- **Umur simpan benih turun setengahnya setiap peningkatan kadar air sebesar 1% dan suhu 5 °C**
- **Umur simpan benih meningkat dua kali lipat setiap penurunan kadar air sebesar 1% dan suhu 5 °C**

Ketentuan ini berlaku pada kadar air benih antara 5 hingga 14%. Benih dengan kadar air di bawah 5% mengalami peningkatan laju deteriorasi karena auto-oksidasi lipid. Benih dengan kadar air di atas 14% rentan mengalami serangan cendawan Gudang sehingga merusak kapasitas benih untuk berkecambah. Aturan ini berlaku untuk suhu 0 hingga 50 °C, dengan RH ruang simpan 15 hingga 70%. Ketentuan ini juga hanya berlaku untuk benih ortodoks (Harrington, 1972).

Proses deteriorasi yang terjadi selama penyimpanan benih dapat dihambat melalui penurunan kadar air benih, dimana proses desikasi akan menentukan kadar air benih yang dihasilkan. Benih yang mengalami peningkatan kadar air selama penyimpanan, juga meningkatkan proses deteriorasi benih. Benih bersifat higroskopis, dimana benih mempunyai kecenderungan untuk menyeimbangkan kadar airnya dengan kelembaban nisbi di udara. Sifat inilah yang menyebabkan pengaruh kadar air lebih dominan dibandingkan dengan suhu penyimpanan (Widajati et al., 2008).

Untuk memperpanjang umur simpan benih dengan viabilitas sebesar 50%, dari 12 bulan ke 24 bulan maka suhu penyimpanan harus diturunkan 5 °C dari suhu awal, sementara kadar air benih harus diturunkan 1% dari kadar air awal. Sebaliknya, benih dengan viabilitas sebesar 5% akan turun umur

simpannya dari 12 bulan menjadi 6 bulan saja ketika suhu penyimpanan meningkat 5 °C dari suhu awal dan kadar air meningkat 1% dari kadar air awal (Gambar 38).



Gambar 38. Kaidah Harrington

Berdasarkan respon terhadap kadar air dan suhu penyimpanan, benih dikategorikan ke dalam 3 golongan, yaitu:

Benih Ortodoks

Karakter dari benih ortodoks adalah bisa disimpan pada kadar air dan suhu ruang simpan yang rendah. Kadar air benih bisa diturunkan hingga 5–10%. Umumnya berukuran lebih kecil, mempunyai testa yang tebal, dan ukuran embrio yang lebih besar. Berdasarkan umur simpannya, benih ortodoks dibagi menjadi:

- *Micro-biotic* (penyimpanan hingga 3 tahun): umumnya pada benih tanaman pangan dan sayuran, masih mengandung lemak dan testa lebih tipis
- *Meso-biotic* (penyimpanan 3–15 tahun): benihnya tidak mempunyai kandungan lemak, yang lebih dominan adalah pati (karbohidrat)
- *Macro-biotic* (penyimpanan lebih dari 15 tahun): benih legum dengan struktur benih yang impermeable terhadap air dengan testa tebal. Umumnya pada benih tanaman kehutanan seperti albisia, saga pohon, lamtoro, kemiri, kaliandra, johar, atau mindi.

Benih Rekalsitran

Sifat dari benih rekalsitran adalah rentan terhadap proses desikasi dan mempunyai umur simpan yang pendek. Proses desikasi yang terlalu lama

menyebabkan kadar air benih terlalu rendah sehingga mematikan poros embrio. Sementara itu suhu penyimpanan yang rendah menyebabkan membran sel pada benih rusak karena mengalami *freezing injury*. Ketentuan kadar air benih kritikal pada benih rekalsitran adalah 12-31%. Benih kakao yang disimpan dengan kadar air awal 36-42% selama 4 minggu viabilitasnya lebih baik dibandingkan dengan benih kakao yang diturunkan kadar airnya menjadi 27-31%. Berdasarkan toleransi terhadap desikasi dan suhu rendah, benih rekalsitran digolongkan ke dalam 3 tipe, yaitu:

- Rekalsitran ringan (*minimally recalcitrant*): toleran terhadap desikasi dan suhu rendah, namun perkecambahannya lambat. Contohnya yaitu benih *Quercus* spp. (oak), *Araucaria hunsteinii* (pinus klinki), *Podocarpus benkelii* (lohansung)
- Rekalsitran sedang (*moderately recalcitrant*): tidak cukup toleran terhadap kehilangan air dan relatif peka terhadap suhu rendah. Contohnya yaitu benih *Theobroma cacao* (kakao) dan *Hevea brasiliensis* (karet)
- Rekalsitran berat (*highly recalcitrant*): tidak toleran terhadap penurunan kadar air dan peka terhadap suhu rendah. Contohnya yaitu benih *Syzygium* sp. (jambu2an) dan *Avicennia marina* (api-api).

Benih Intermediet

Benih intermediet mempunyai sifat yang sedikit tahan terhadap penurunan kadar air benih hingga 5-10%, namun tidak tahan terhadap suhu rendah mulai dari 15-20 °C. Respon benih intermediet terhadap umur simpan bisa berbeda di dalam satu spesies, bahkan di dalam satu lot benih yang ada di dalam satu varietas. Diketahui bahwa benih jeruk besar memiliki kecenderungan intermediet, sementara benih jeruk siam bersifat rekalsitran. Benih intermediet seperti benih kopi, pepaya, kelapa sawit, dan mahoni bisa diturunkan kadar airnya hingga 20%, namun jika kadar airnya diturunkan lebih rendah lagi akan rusak. Hasil penelitian (Rosyad *et. al.*, 2017) menunjukkan bahwa benih pepaya Callina dan Sukma bersifat ortodoks, sementara pepaya Arum Bogor bersifat intermediet.

9.2.2 Faktor eksternal pada benih

a. Suhu ruang penyimpanan

Semakin rendah suhu ruang penyimpanan, maka laju deteriorasi benih semakin lambat sehingga benih bisa lebih lama disimpan (Harrington, 1972). Benih yang disimpan di bawah suhu titik beku tidak berpengaruh buruk terhadap daya kecambahnya, asalkan kadar airnya tidak terlalu tinggi. Benih

dengan kadar air tinggi rentan mengalami *freezing injury* ketika disimpan pada suhu di bawah titik beku, seperti benih jagung, barley, rye, dan gandum. Benih berkadar air 12-14% mampu mempertahankan viabilitasnya selama minimal 3 bulan ketika disimpan pada suhu -13,3 hingga -15,6 °C (Justice & Bass, 1990).

Pada suhu tinggi, benih sayuran yang disimpan selama 11 bulan menunjukkan penurunan daya berkecambah meskipun memiliki kadar air yang rendah. Daya berkecambah benih kubis turun 19% ketika disimpan pada suhu 0–28 °C, sedangkan pechay dan sitao daya berkecambahnya turun secara berturut-turut sebesar 2 dan 3%. Viabilitas dan vigor benih turun seiring dengan peningkatan suhu dan kadar air benih. Benih lobak dengan kadar air 45% aman disimpan pada suhu < 50 °C dan mati pada suhu 55-60 °C. Pada kadar air benih yang lebih rendah (4%), benih lobak aman disimpan pada suhu 75 °C dan mati pada suhu 95-100 °C (Justice & Bass, 1990). Suhu ruang penyimpanan yang tinggi dapat meningkatkan laju respirasi sehingga perombakan cadangan makanan semakin besar. Penurunan cadangan makanan pada benih menyebabkan penurunan persentase kecambah normal serta waktu munculnya kecambah.

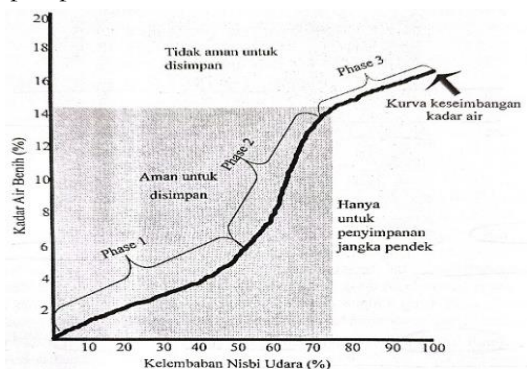
b. Kelembaban nisbi (RH) ruang penyimpanan

Kelembaban nisbi dinyatakan dalam persentase dan dihitung dengan cara membagi jumlah uap air di udara dengan jumlah uap air maksimum yang dapat diikat di udara pada suhu yang sama, lalu dikalikan 100. Udara panas dapat menahan uap air lebih banyak dibandingkan dengan udara dingin. Jika jumlah uap air yang ada di udara tetap dan suhunya meningkat, maka kelembaban nisbinya turun. Sebaliknya, jika suhu udara diturunkan maka kelembaban nisbinya akan meningkat. Sifat benih yang higroskopis atau mudah menyerap air menyebabkan benih selalu berusaha mencapai kondisi yang seimbang dengan lingkungannya. Keseimbangan tercapai jika tidak ada lagi uap air yang bergerak dari udara ke dalam benih atau sebaliknya dari benih ke udara (Justice & Bass, 1990).

Kelembaban nisbi ruang simpan yang tinggi menyebabkan peningkatan kadar air benih, sehingga laju respirasi benih juga meningkat. Peningkatan laju respirasi benih mengaktifkan proses perombakan cadangan makanan pada benih sehingga menghasilkan panas dan terjadi peningkatan suhu di sekitar benih. Berkurangnya cadangan makanan pada benih menyebabkan perkecambahan menurun. Benih yang mengandung banyak protein dan karbohidrat umumnya lebih mudah menyerap air dibandingkan benih yang mengandung lemak. Proses penyerapan air pada benih (imbibisi) dipengaruhi

oleh ketebalan kulit benih (testa) dan komposisi kimia benih (Justice & Bass, 1990).

Secara umum, hubungan antara kadar air keseimbangan benih dengan beberapa tingkat RH dibagi menjadi 3 fase. Fase I dan II aman digunakan untuk penyimpanan jangka pendek, sementara itu fase III tidak aman digunakan untuk penyimpanan benih. Zona benih untuk aman simpan berada pada rentang KA benih 0-14% dan RH 0-75%. Benih dengan KA > 14% jika disimpan pada RH >75% sudah tidak aman untuk disimpan (Gambar 39).



Fase I: RH 0-50%,
KA 0-6%

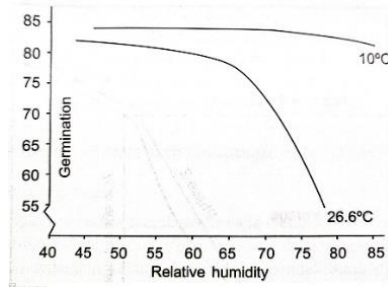
Fase II: RH 50-75%,
KA 6-14%

Fase III: RH 75-
100%, KA 14-18%

Gambar 39. Kadar air keseimbangan benih pada beberapa tingkat RH

Pada fase I (RH 0-50%, KA 0-6%), air terikat kuat secara kimia sehingga kandungan air di dalam benih hanya dapat diuraikan dengan menghancurkan massa benih. **Pada fase II (RH 50-75%, KA 6-14%),** ikatan air mudah dilepas atau ditukar melalui proses desikasi, sehingga merupakan kondisi seimbang yang bisa dicapai oleh benih dimana air terikat sangat kuat dan sulit dilepaskan sehingga aman digunakan untuk penyimpanan. **Pada fase III (RH 75-100%, KA 14-18%),** ikatan air sangat mudah dilepaskan karena air berada di antara jaringan benih (interseluler) sehingga mudah hilang saat desikasi dan memicu deteriorasi.

Pada suhu tinggi (26,6 °C), benih mampu mempertahankan perkecambahannya di atas 80% jika RH ruang simpan dipertahankan sebesar 45-60%. Sebaliknya pada suhu rendah (10 °C), perkecambahan benih tetap di atas 80% dan lebih stabil meskipun RH ruang simpan mencapai 85% (Gambar 40).



Gambar 40. Pengaruh RH dan suhu ruang simpan terhadap perkecambahan benih

Tabel 25. Kehilangan viabilitas benih yang disimpan di berbagai suhu dan RH

Kondisi Penyimpanan	Lama Simpan (bulan)					
	0	6	12	18	24	30
Bawang merah						
30 °C; RH 75%	96	-	-	-	-	-
7 °C; RH 45%	96	96	96	95	94	94
Kedelai						
30 °C; RH 75%	94	-	-	-	-	-
7 °C; RH 45%	94	94	85	60	42	-
Selada						
30 °C; RH 75%	96	61	-	-	-	-
7 °C; RH 45%	96	90	82	68	-	-
Lobak						
30 °C; RH 75%	98	80	13	-	-	-
7 °C; RH 45%	98	98	98	98	95	95
Jagung						
30 °C; RH 75%	98	95	30	-	-	-
7 °C; RH 45%	98	98	98	98	98	98

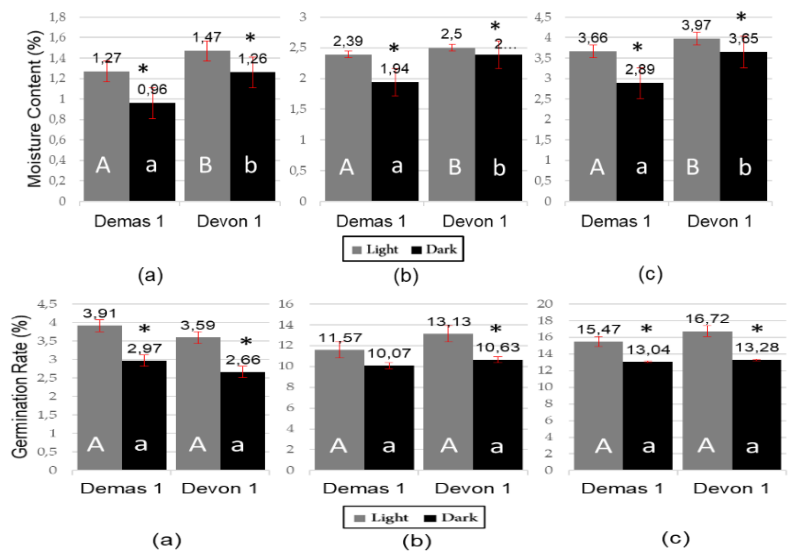
Benih bawang merah dan kedelai yang disimpan pada suhu 30 °C dan RH 75% kehilangan viabilitasnya dalam waktu kurang dari 6 bulan simpan, sementara itu penyimpanan benih pada suhu (7 °C) dan RH yang lebih rendah (45%) mampu mempertahankan viabilitas benih hingga tetap di atas 80% hingga 30 bulan simpan pada benih bawang merah dan 12 bulan pada benih kedelai. Penyimpanan benih pada suhu dan RH tinggi menyebabkan umur simpan benih yang lebih pendek (Tabel 25).

c. Cahaya

Ekspose cahaya selama penyimpanan benih kedelai menyebabkan peningkatan asam lemak, peroksida, malondialdehyde, dan daya hantar listrik. Respon benih terhadap kondisi cahaya di ruang penyimpanan berbeda pada

masing-masing spesies. Kondisi gelap selama penyimpanan dapat menunda deteriorasi benih kedelai Demas 1 dan Devon 1. Penyimpanan benih dengan kondisi terdapat cahaya menyebabkan peningkatan kadar air benih dan RH, hal ini disebabkan karena cahaya dapat meningkatkan aktivitas respirasi dan enzim sehingga memicu deteriorasi pada benih (Muhamad et al., 2024).

Benih kedelai Demas 1 maupun Devon 1 menunjukkan penurunan persentase kadar air di penyimpanan gelap, sehingga laju penurunan perkecambahan benih (laju deteriorasi) juga rendah (Gambar 41). Penyimpanan benih pada kondisi terang memicu deteriorasi pada benih yang menyebabkan penurunan cadangan makanan benih seperti karbohidrat, protein, dan lipid yang sangat penting dalam mendukung perkecambahan benih (Tatipata et al., 2004). Penelitian terkait pengaruh cahaya terhadap umur simpan benih masih terbatas, sehingga perlu dilakukan pengujian terhadap benih dari komoditas tanaman lain.



Gambar 41. Respon kadar air dan laju penurunan perkecambahan benih kedelai Demas 1 dan Devon 1 terhadap penyimpanan terang dan gelap; a) berbeda pada 0 & 1 bulan simpan, b) berbeda pada 1 & 3 bulan simpan, c) berbeda pada 0 & 3 bulan simpan; huruf kapital menunjukkan perbedaan respon kultivar di kondisi terang; huruf kecil menunjukkan perbedaan respon kultivar di kondisi gelap.

d. Pengaruh gas terhadap umur simpan benih

Jika dibandingkan dengan pengaruh kadar air, suhu, dan RH, pengaruh gas tidak terlalu signifikan terhadap umur simpan benih. Beberapa jenis gas yang pernah digunakan untuk menguji umur simpan benih adalah nitrogen, oksigen, helium, argon, dan karbon dioksida. Kadar oksigen yang tinggi selama penyimpanan benih barley menyebabkan viabilitasnya turun dengan cepat, terutama pada benih berkadar air tinggi (Justice & Bass, 1990). Di antara jenis gas tersebut, yang lebih banyak menunjukkan pengaruh adalah gas karbon dioksida (CO₂). Penyimpanan benih kacang hijau menggunakan CO₂ mampu menghambat laju respirasi, sehingga proses perombakan cadangan makanan dapat dihambat, yang akhirnya dapat menghambat laju deteriorasi. Gas CO₂ juga mampu menekan tingkat serangan *Callosobruchus maculatus* serta mempertahankan kadar air benih tetap konstan. Penyimpanan benih menggunakan 40% CO₂ selama 6 bulan mampu mempertahankan daya berkecambah benih sebesar 97,7% (Raghupathi et al., 2021).

e. Faktor biotik

Pada saat panen, benih berpeluang membawa cendawan, bakteri, virus, maupun serangga yang tidak dapat dipisahkan melalui prosesing benih. Virus terbawa benih umumnya berada dalam kondisi dorman selama di penyimpanan dan baru menyerang ketika benih dikecambahkan. Sementara itu bakteri dan aktinomisetes tidak aktif di penyimpanan karena memerlukan RH yang tinggi selama pertumbuhannya. Organisme yang sering menyerang pada saat penyimpanan benih adalah cendawan gudang, hama gudang, dan tikus. Seluruh siklus hidup cendawan gudang berada di gudang dan mampu hidup pada RH yang cukup rendah dan beberapa diantaranya bersifat **osmofilik** (mampu menyerang benih berkadar air rendah; 13-14%).

Serangan cendawan gudang menyebabkan penurunan daya berkecambah benih, terjadinya perubahan warna testa benih dan busuk, terjadinya peningkatan suhu di spot tertentu, terbentuknya asam lemak bebas penyebab bau tengik, serta terbentuknya aflatoksin yang mematikan bagi manusia dan hewan. Cendawan gudang yang paling sering ditemukan adalah *Aspergillus* dan *Penicillium* yang menyerang pada RH 65-90% dan suhu 30-32 °C. Perkembangan cendawan gudang dapat dihambat jika kadar air benih diturunkan hingga di bawah 13%. Kadar air benih pada saat penyimpanan merupakan faktor yang sangat penting dalam menentukan keberadaan, perkembangan, dan pertumbuhan cendawan gudang.

Penyebab serangan hama di penyimpanan adalah hama ikut ke dalam benih pada saat panen, karung yang tidak bersih, benih retak, alat dan mesin

panen atau prosesing yang tidak bersih, serta hama terbawa oleh tanaman di sekitar gudang atau menempel pada manusia. Pada suhu ruang simpan $< 10^{\circ}\text{C}$ dan $\text{RH} < 40\%$ serangga tidak bisa berkembang biak. Selain itu, perkembangan serangga juga terhambat pada kadar air benih $< 10\%$. Jenis hama lain yang menyerang selama penyimpanan benih adalah tikus. Tikus yang menyerang gudang penyimpanan adalah tikus rumah (*Rattus rattus diardii*), tikus sawah (*Rattus argentiventer*), dan mencit (*Mus musculus castaneus*). Kerugian yang ditimbulkan oleh tikus adalah karena benih yang tercecer dalam jumlah besar serta tercampur aduk dengan kotoran, urin, dan rambut yang lepas. Populasi tikus dapat ditekan dengan menggunakan perangkap, umpan beracun, maupun fumigasi.

9.3 Teknologi dan Fasilitas Penyimpanan Modern

Prinsip utama dari penyimpanan benih modern adalah menciptakan kondisi yang tidak ideal bagi aktivitas metabolisme benih, pertumbuhan mikroorganisme serta serangan hama gudang. Prinsip ini dapat dicapai melalui penurunan kadar air benih hingga batas aman sebelum disimpan, penyimpanan pada suhu rendah dan stabil, kondisi kedap udara tanpa oksigen atau tanpa cahaya, serta lingkungan penyimpanan yang bebas dari organisme pengganggu di gudang. Beberapa teknologi penyimpanan yang bisa dilakukan adalah:

a. Penyimpanan suhu rendah

Suhu dan RH di gudang penyimpanan dikendalikan menggunakan AC. Suhu ideal untuk penyimpanan diatur menjadi 10-14%, dengan RH 40-50%. Teknologi penyimpanan suhu rendah sesuai diaplikasikan di daerah kering-dingin, daerah kering-panas, daerah lembab-dingin, dan daerah lembab-panas.

b. Penyimpanan kedap udara

Praktik penyimpanan benih dalam kondisi kedap udara (*hermetic*) sudah diterapkan di Kamerun dalam bentuk PICS (*Purdue Improved Compea Storage*). Pada teknologi ini, benih disimpan di dalam karung yang dilapisi 3 plastik, dimana kadar air benih dijaga $< 13\%$. Teknologi ini sangat menghemat penggunaan insektisida dan memungkinkan untuk menyimpan benih selama 2 tahun.

c. Penyimpanan tanpa oksigen

Adanya oksigen dapat memicu metabolisme benih terutama pada kadar air benih yang tinggi. OxySorb (*oxygen absorbers*) berperan dalam menurunkan kadar oksigen yang berlebihan di dalam kemasan sehingga mutu benih bisa tetap terjaga. Mekanisme oxysorb dalam memperpanjang umur simpan benih

adalah adanya kandungan Fe (bubuk besi) pada oxysorb yang mampu mencegah proses oksidasi penyebab deteriorasi pada sel. Kandungan oksigen yang rendah juga mampu menghambat aktivitas serangga dan mikroorganisme.

d. Penyimpanan dengan CO₂ tinggi

Penyimpanan benih kacang hijau menggunakan 40% CO₂ mampu menekan tingkat serangan *Callosobruchus maculatus* menjadi hanya 0.29% jika dibandingkan dengan kontrol (1,44%). Aplikasi CO₂ mampu menekan oksigen di ruang simpan, sehingga menghambat respirasi hama (Raghupathi et al., 2021).

e. Jebakan serangga

Universitas Pertanian Tamil Nadu di India mengembangkan alat *TNAU Automatic Insect Removal Bin* yang dirancang untuk mengeliminasi serangga dari benih secara otomatis dengan memanfaatkan perilaku alami serangga yang menyerang di gudang. Alat ini mempunyai corong yang digunakan untuk menjebak serangga saat mereka bergerak menuju ruang di dalam bin. Corong tertutup menyebabkan serangga terjebak dan jatuh di dalam wadah pengumpul. Cahaya UV sekitar 250 nm juga bisa dimanfaatkan sebagai jebakan serangga di ruang penyimpanan.

Beberapa karakteristik dari fasilitas penyimpanan benih modern adalah mempunyai struktur bangunan khusus yang dirancang di lokasi yang terisolasi dan stabil secara geologis seperti Svalbard Global Seed Vault, Norwegia. Bangunan ini dirancang untuk tahan terhadap bencana alam seperti gempa bumi, banjir, bahkan ledakan nuklir untuk menjaga benih bernilai tinggi. Selain itu, Svalbard dilengkapi dengan sistem pendingin cadangan (*backup cooling system*) untuk memastikan suhu tetap stabil jika terjadi kegagalan sistem. Bangunan tersebut juga dilengkapi dengan sistem keamanan yang tinggi. Selain fasilitas penyimpanan yang canggih seperti Svalbard, ada juga Gudang penyimpanan benih komersial atau penelitian yang dilengkapi dengan sistem pengendalian suhu dan RH yang presisi.

9.4 Penyimpanan Benih untuk Plasma Nutfah dan Bank Benih

Menurut Kaidah (Harrington, 1972), kondisi penyimpanan yang tepat mampu mempertahankan umur benih 3-10 tahun. Untuk mendapatkan kondisi penyimpanan yang ideal, digunakan klasifikasi lama penyimpanan benih menurut Kuswanto (2003), yaitu:

a. Penyimpanan jangka pendek (*short term storage*)

Penyimpanan benih yang dilakukan selama 1-9 bulan, digunakan untuk menyimpan benih setelah panen hingga musim penanaman yang akan datang. Benih berlemak dengan kadar air 7% dan benih dengan protein serta pati tinggi dengan kadar air 11% disimpan di ruangan suhu 30 °C, RH 50%. Peningkatan kadar air benih berlemak menjadi 9.5% serta benih berprotein dan pati menjadi 13% mensyaratkan suhu penyimpanan 20 °C dengan RH 60%

b. Penyimpanan jangka menengah (*mid term storage*)

Pada penyimpanan jangka menengah, benih disimpan selama 9-18 bulan. Ruang simpan dengan suhu 30 °C dan RH 40% digunakan untuk benih berlemak dengan kadar air 6% serta benih berprotein dan pati dengan kadar air 10%. Peningkatan kadar air benih berlemak menjadi 7% serta benih berprotein dan pati menjadi 11% mensyaratkan penurunan suhu penyimpanan menjadi 20 °C dengan RH 50%. Suhu ruang simpan sebesar 10 °C dengan RH 60% sesuai untuk benih berlemak dengan kadar air 9%.

c. Penyimpanan jangka lama (*long term storage*)

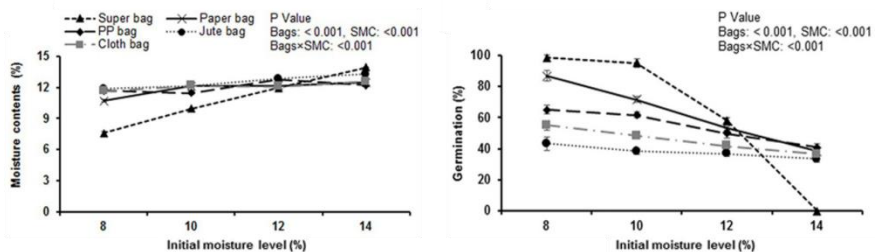
Benih yang akan disimpan dalam jangka waktu panjang (18-120 bulan) memerlukan ruang penyimpanan dengan suhu rendah dan kering. Suhu ruang simpan sebesar 10 °C dengan RH 45% dapat digunakan untuk menyimpan benih selama 5 tahun. Penyimpanan benih dalam jangka waktu yang lebih panjang (5-15 tahun) mensyaratkan suhu 20 °C dan RH 30%.

Penyimpanan benih untuk plasma nutfah bisa dilakukan secara *in situ* maupun *ex situ*. Konservasi plasma nutfah secara *in situ* dilakukan dengan cara melestarikan plasma nutfah di habitat aslinya dalam bentuk hutan lindung maupun taman nasional. Sementara pada konservasi *ex situ*, pelestarian organisme dilakukan di luar habitat aslinya dalam bentuk kebun raya, koleksi lapang, maupun bank benih. Sebanyak 6 juta koleksi *ex situ* berasal dari tanaman biji-bijian dan 15% tanaman kacang yang merupakan benih ortodoks. Metode kriopreservasi digunakan untuk mengatasi keterbatasan ruang dengan cara menyimpan benih di dalam nitrogen cair dengan suhu -196 °C. Secara fisiologis, metabolisme benih akan berhenti pada suhu -196 °C sehingga sel benih tidak berubah hingga benih dikeluarkan dari tabung nitrogen cair (Leunufna, 2007).

9.5 Pengemasan dan Labeling dalam Penyimpanan

Viabilitas benih dapat dipertahankan selama penyimpanan melalui pemilihan kemasan benih yang tepat. Beberapa tujuan dari mengemas benih adalah memudahkan untuk mengidentifikasi benih, melindungi benih, mempromosikan benih serta meningkatkan daya tarik pada benih. Kemasan atau wadah benih dapat mempengaruhi perubahan kadar air benih selama penyimpanan. Semakin banyak aerasi pada wadah, maka kadar air benih lebih mudah mengikuti kondisi lingkungannya. Idealnya, kemasan benih dirancang untuk melindungi mutu fisik benih, sehingga bahan kemasan harus cukup kuat, tahan pecah, dan tidak mudah sobek. Beberapa pertimbangan dalam memilih kemasan pada benih adalah tujuan dari pengemasan, jumlah benih yang akan dikemas, sifat dari benih, kondisi ruang penyimpanan, serta periode penyimpanan benih.

Setelah benih dikeringkan hingga kadar air optimum, benih dikemas ke dalam wadah yang mampu mempertahankan kadar air benih di bawah 12%. Penyimpanan benih dalam jumlah besar biasanya dikemas di dalam karung goni, karung kain katun, karung kertas dinding, atau karung polietilen densitas tinggi (HDPE). Benih dalam jumlah kecil dapat disimpan menggunakan bahan yang lebih fleksibel. Kemasan kedap air dari bahan film polivinil, polietilena, kertas kaca, polyester, serta aluminium foil umumnya digunakan untuk kemasan yang lebih kecil dan bersegel. Kemasan benih dari polyester mempunyai permeabilitas yang rendah terhadap CO_2 dan O_2 sehingga cocok digunakan untuk kemasan kedap udara untuk memperlambat laju deteriorasi. Kombinasi dua atau lebih lapisan yang berbeda dapat digabungkan sehingga kemasan benih lebih tahan terhadap kelembaban udara, CO_2 dan O_2 . Hal penting yang harus dipertimbangkan ketika mengemas benih menggunakan wadah kedap udara adalah memeriksa kadar air awal benih (Dadlani et al., 2023).



Gambar 42. Pengaruh kadar air awal benih okra dan kemasan benih terhadap kadar air benih akhir dan perkecambahan setelah 6 bulan penyimpanan

Benih yang disimpan pada kemasan kaleng mampu mempertahankan persentase perkecambahan pada kisaran $\pm 90\%$ ketika disimpan selama 60 bulan jika dibandingkan dengan kemasan lain berbahan kertas, kain, kertas kaca, polyester dan polietilen. Kemasan kaleng juga mampu mempertahankan persentase kadar air benih di $\pm 4\%$ selama 24 bulan penyimpanan (Widajati et al., 2008). Benih okra dengan kadar air awal 8% yang disimpan pada karung hermetic (kedap udara) mampu mempertahankan kadar airnya tetap rendah ketika disimpan selama 6 bulan serta menghasilkan persentase perkecambahan tertinggi (98,3%). Sebaliknya, benih okra dengan kadar air awal tinggi (14%) juga menghasilkan kadar air tertinggi serta perkecambahannya 0% setelah 6 bulan simpan meskipun disimpan menggunakan karung hermetic. Penyimpanan benih secara tradisional menggunakan plastik polietilen, karung kain, kantong kertas, dan karung goni mengalami peningkatan kadar air secara signifikan selama penyimpanan baik pada benih dengan kadar air awal 8 maupun 10%. Perkecambahan benih okra yang disimpan secara tradisional dengan kadar air awal benih 8, 10, 12, maupun 14% mengalami penurunan secara signifikan selama penyimpanan (Gambar 42). Penyimpanan benih okra menggunakan karung hermetic dengan kadar air awal 8 atau 10% mampu menurunkan proses deteriorasi secara biokimia maupun fisiologis pada benih. Penentuan kadar air awal benih sebelum simpan dan jenis kemasan akan menentukan umur simpan benih (Bakhtavar et al., 2023).

Beberapa data yang harus dicatat pada saat mengemas benih adalah tanggal pengemasan, nomor lot atau aksesori, jenis kontainer penyimpanan, nomor kontainer, berat kontainer kosong, berat kontainer dan benih, serta bobot benih. Sementara itu semua kontainer benih harus berisi informasi tentang komoditas, varietas, kelas benih, dan alamat produsen benih. Jenis label kelas benih dibedakan berdasarkan warna, yaitu **label kuning** digunakan untuk **benih penjenis (*Breeder Seed/BS*)**, **label putih** untuk **benih dasar (*Foundation Seed/BD*)**, **label ungu** untuk **benih pokok (*Stock Seed/BP*)**, dan **label biru** untuk **benih sebar (*Extension Seed/BR*)**. Label pada kemasan benih di penyimpanan berfungsi sebagai penanda penting yang berisi informasi tentang kemurnian fisik, kemurnian genetik, kadar air benih, persentase daya berkecambah, tanggal pengujian, masa kadaluarsa benih, bobot benih, serta harga benih.

Bahan label berasal dari kertas atau bahan lain yang kuat dan tidak mudah sobek atau luntur yang berukuran segi empat (1:2-3). Label benih harus mencantumkan **“Benih Bersertifikat”** dan kelas benih. Benih yang diberi

perlakuan pestisida atau bahan kimia lain harus diberikan keterangan tambahan pada kemasan berupa nama umum dari bahan yang digunakan serta tanda peringatan **“Jangan dimakan atau diberikan pada ternak”**. Untuk mengawasi peredaran benih di masyarakat, sudah diterapkan QR-Code atau barcode di kemasan atau label benih yang digunakan untuk menunjukkan kesesuaian identitas benih dengan database sertifikasi di aplikasi Simperbenihan dari Kementerian Pertanian.

DAFTAR PUSTAKA

- Aryani, N. F. *et al.* (2022) *Sorghum Cultivation (Sorghum bicolor (L.) Moench)*, Balai Penelitian Tanaman Serealia. Edited by O. Jumadi *et al.* Makassar: Jurusan Biologi, FMIPA, Universitas Negeri Makassar.
- Austin, R. B. and Longden, P. C. (1967) 'Some Effects of Seed Size and Maturity on the Yield of Carrot Crops', *Journal of Horticultural Science*, 42(4), pp. 339–353. doi: 10.1080/00221589.1967.11514219.
- Bakhtavar, M. A. *et al.* (2023) 'Hermetic storage of okra seed maintains seed longevity under changing environment', *PLoS ONE*, 18(6), pp. 1–15. doi: 10.1371/journal.pone.0287476.
- Brown, E. *et al.* (1948) *Dormancy and the effect of storage on oats, barley, and sorghum*. U.S. Dept. Agr. Tech. Bul. 953. p. 30.
- Copeland, L. O. (1976) *Principles of Seed Science and Technology*. Minnesota: Burgess Publishing Company.
- Dadlani, M. *et al.* (2023) *Seed Storage and Packaging, Seed Science and Technology: Biology, Production, Quality*. Edited by M. Dadlani and Devendra Kumar Yadava. New Delhi: Springer. doi: 10.1007/978-981-19-5888-5_9.
- Harrington, J. F. (1972) 'Seed Storage and Longevity', in Kozlowski, T. (ed.) *Insects, and Seed Collection, Storage, Testing, and Certification*. New York: ACADEMIC PRESS, INC., pp. 145–245. doi: 10.1016/b978-0-12-395605-7.50009-0.
- Justice, O. L. and Bass, L. N. (1990) *Prinsip dan Praktek Penyimpanan Benih*. Translated by R. Roesly. Jakarta: CV. Rajawali. 446 hal.
- Kuswanto, H. (2003) *Teknologi Pemrosesan, Pengemasan, dan Penyimpanan Benih*. Yogyakarta: Penerbit Kanisius.
- Leunufna, S. (2007) 'Kriopreservasi untuk Konservasi Plasma Nutfah Tanaman: Peluang Pemanfaatannya di Indonesia', *Jurnal AgroBiogen*, 3(2), pp. 80–88. doi: 10.21082/jbio.v3n2.2007.p80-88.
- Muhamad, K. *et al.* (2024) 'Seed Longevity of Soybean (*Glycine max* L.) Cultivars Under Lightless Storage', *Malaysian Applied Biology*, 53(2), pp. 47–54. doi: 10.55230/mabjournal.v53i2.2765.
- Purwanti, S. (2004) 'Kajian Suhu Ruang Simpan Terhadap Kualitas Benih Kedelai Hitam dan Kedelai Kuning', *Ilmu Pertanian*, 11(1), pp. 22–31.
- Raghupathi, B. *et al.* (2021) 'Effect of modified atmosphere with elevated levels of CO₂ on seed quality parameters of greengram during storage', *The Pharma Innovation Journal*, 10(11), pp. 53–59.

- Rini, S. I. *et al.* (2025) 'Pengujian Periode *After-Ripening* pada Beberapa Benih Padi (*Oryza sativa* L.) Varietas Unggul', *Planta simbiosis: Jurnal Tanaman Pangan dan Hortikultura*, 7(1), pp. 10–25.
- Rosyad, A., Suhartanto, M. R. and Qadir, A. (2017) 'Kemunduran Benih Pepaya (*Carica papaya*) selama Penyimpanan pada berbagai Kondisi dan Tingkat Kadar Air Awal', in *Prosiding Seminar Nasional PERIPI-2017*. Bogor, pp. 592–599.
- Sripathy, K. V. and Groot, S. P. C. (2023) *Seed Development and Maturation, Seed Science and Technology: Biology, Production, Quality*. Edited by M. Dadlani and Devendra Kumar Yadava. New Delhi: Springer. doi: 10.1007/978-981-19-5888-5_9.
- Syahrani, R. (2024) *Evaluasi Mutu Benih Dua Varietas Sorgum Pada Tiga Periode Simpan dengan Menggunakan Uji X-ray*. Universitas Jember.
- Syamsuwida, D. *et al.* (2016) *Karakteristik Benih Tanaman Hutan Berwatak Ortodok*. 1st edn. Edited by N. Mindawati, D. Iriantono, and A. M. Sari. Bogor: PT. Penerbit IPB Press.
- Tatipata, A. *et al.* (2004) 'Kajian Aspek Fisiologi dan Biokimia Deteriorasi Benih Kedelai dalam Penyimpanan', *Ilmu Pertanian*, Vol. 11 No(2), pp. 76–78.
- Widajati, E. *et al.* (2008). *Diklat Kuliah dan Penuntun Praktikum Dasar Ilmu dan Teknologi Benih*. Bogor: Departemen Agronomi dan Hortikultura, Fakultas Pertanian, IPB.

BAB 10

TEKNOLOGI PENINGKATAN MUTU BENIH

Oleh: Sepsriyanti Kannapadang

10.1 Tinjauan Umum

Benih merupakan komponen utama dalam sistem produksi pertanian, karena keberhasilan budidaya tanaman sangat ditentukan oleh kualitas benih yang digunakan. Benih bermutu tinggi memiliki ciri viabilitas dan vigor yang baik, daya tumbuh seragam, bebas dari hama, penyakit, serta kontaminan, dan mampu beradaptasi dengan lingkungan tumbuh. Sebaliknya, benih bermutu rendah sering menunjukkan masalah dormansi yang tidak terkendali, daya kecambah rendah, serta rentan terhadap cekaman biotik maupun abiotik. Kondisi ini dapat menghambat pertumbuhan awal tanaman, menurunkan daya saing dengan gulma, dan pada akhirnya berpengaruh negatif terhadap hasil panen (Copeland & McDonald, 2019).

Seiring meningkatnya kebutuhan produksi pangan global, peran teknologi dalam menjaga dan meningkatkan mutu benih menjadi semakin penting. Teknologi tidak hanya berfungsi mempertahankan kualitas benih selama penyimpanan, tetapi juga meningkatkan kemampuan fisiologisnya sehingga lebih adaptif terhadap kondisi lapangan yang beragam. Misalnya, benih yang diberi perlakuan *priming* cenderung berkecambah lebih cepat dan seragam, sementara benih yang dilapisi (*pelleting* atau *coating*) lebih mudah diatur dalam penanaman mekanis. Hal ini menunjukkan bahwa teknologi peningkatan mutu benih dapat berfungsi sebagai jembatan antara potensi genetik suatu varietas dengan performa agronomisnya di lapangan (Afzal et al., 2020).

Perkembangan ilmu dan teknologi modern telah menghasilkan berbagai inovasi dalam pengolahan benih, mulai dari metode sederhana hingga pendekatan berbasis bioteknologi dan nanoteknologi. Teknologi tradisional seperti perendaman air (*hydropriming*) telah berevolusi menjadi metode yang lebih kompleks seperti *osmopriming*, penggunaan bioinokulan, hingga pengembangan lapisan polimer multifungsi. Sementara itu, kemajuan dalam bidang sains material dan mikrobiologi juga telah mendorong pemanfaatan *nano-coating*, konsorsium mikroba, serta sensor digital untuk pengendalian mutu. Inovasi-inovasi ini tidak hanya meningkatkan daya tumbuh dan vigor

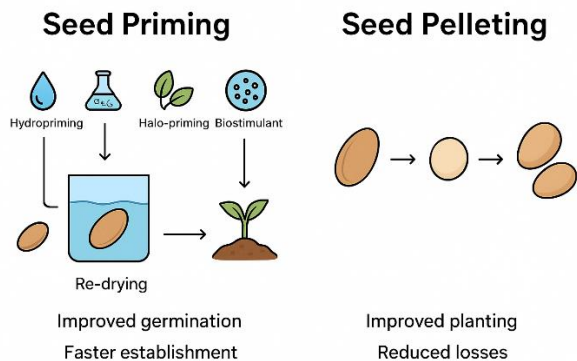
benih, tetapi juga memperluas fungsinya sebagai sarana perlindungan tanaman sejak fase awal pertumbuhan (Pedrini et al., 2025).

Manfaat teknologi peningkatan mutu benih tidak hanya dirasakan dari aspek biologis dan teknis, tetapi juga dari sisi ekonomi dan keberlanjutan. Benih yang telah diperlakukan dengan teknologi tertentu dapat mengurangi kebutuhan input eksternal seperti pupuk atau pestisida, sehingga biaya produksi dapat ditekan. Selain itu, laju pertumbuhan yang seragam membantu petani dalam mengatur waktu tanam dan panen, sehingga meningkatkan efisiensi budidaya. Teknologi ini juga mendukung sistem pertanian berkelanjutan dengan mengurangi ketergantungan terhadap bahan kimia sintetis melalui pemanfaatan agen hayati atau biostimulan (Afzal et al., 2020).

Secara umum, teknologi peningkatan mutu benih dapat dikelompokkan menjadi lima pendekatan utama. Pertama, perlakuan fisiologis seperti seed priming dan pelleting. Kedua, perlakuan biologis melalui inokulasi mikroba atau perlakuan dengan biostimulan. Ketiga, pelapisan dan pewarnaan benih yang berfungsi sebagai proteksi sekaligus identifikasi. Keempat, perlakuan fisik maupun kimia untuk mengatasi dormansi benih. Terakhir, teknologi baru yang mengintegrasikan nanoteknologi, bioformulasi, serta sistem digitalisasi mutu. Dengan memahami dan menerapkan berbagai pendekatan ini, diharapkan sektor pertanian dapat menghasilkan benih unggul yang mendukung peningkatan produktivitas, efisiensi, serta keberlanjutan produksi pangan di masa depan (Pedrini et al., 2025).

a. *Seed Priming dan Pelleting*

Seed priming adalah teknik perlakuan pra-tanam yang dirancang untuk mengatur proses hidrasi benih hingga mencapai tahap fisiologis awal perkecambahan, namun dihentikan sebelum radikula muncul. Prinsip dasar priming adalah memberikan kondisi optimal bagi benih untuk memulai metabolisme, memperbaiki integritas membran, serta mengaktifkan enzim-enzim penting sebelum proses perkecambahan sempurna terjadi. Hasilnya, benih yang telah melalui priming cenderung berkecambah lebih cepat, seragam, dan memiliki vigor lebih tinggi dibandingkan benih tanpa perlakuan. Selain itu, priming juga terbukti mampu meningkatkan toleransi awal terhadap stres lingkungan seperti kekeringan, salinitas, dan suhu ekstrem, sehingga mendukung establishment tanaman di lapangan (Janah, 2025).



Gambar 43. Metode *Seed Priming* dan *Seed Pelleting*

Tabel 26. Metode *Priming*

Metode	Tujuan utama	Contoh agen/bahan	Keuntungan	Risiko
<i>Hydro/Osmo-priming</i>	Mempercepat perkecambahan, meningkatkan vigor	Air, PEG, KNO ₃	Seragam perkecambahan, toleransi stres	<i>Over-priming</i> → kehilangan viabilitas
<i>Bio-priming</i>	Inokulasi mikroba sejak awal imbibisi	<i>Bacillus</i> , <i>Trichoderma</i>	Ketahanan biotik, hormon pertumbuhan	Ketidakstabilan viabilitas mikroba
<i>Pelleting</i>	Memperbesar & menyeragamkan benih kecil	Kapur, tanah liat, polimer	Memudahkan tanam mekanis, bisa membawa nutrisi	Lapisan terlalu tebal → menghambat imbibisi

Terdapat beberapa metode priming yang umum digunakan, di antaranya hidropriming (perendaman dalam air), osmopriming (menggunakan larutan osmotik seperti *polyethylene glycol*/PEG), halopriming (larutan garam dengan konsentrasi tertentu), priming dengan biostimulan (misalnya hormon, asam amino, atau nutrisi mikro), serta priming biologis yang menggunakan mikroorganisme menguntungkan. Pemilihan metode tersebut sangat bergantung pada tujuan spesifik perlakuan dan karakteristik fisiologis benih, misalnya ukuran, tingkat dormansi, serta jenis tanaman. Keberhasilan priming juga sangat ditentukan oleh optimasi faktor teknis seperti durasi imbibisi, kondisi pengeringan ulang, serta stabilitas benih selama penyimpanan pasca-perlakuan (Janah, 2025).

Keunggulan dari priming tidak hanya terlihat pada kecepatan dan keseragaman perkecambahan, tetapi juga pada ketahanan tanaman muda terhadap kondisi lapangan yang kurang ideal. Misalnya, hasil penelitian menunjukkan bahwa benih gandum dan padi yang diberi perlakuan *osmopriming* mampu menunjukkan pertumbuhan yang lebih baik pada kondisi tanah dengan cekaman salinitas. Selain itu, priming juga membantu meningkatkan efisiensi penggunaan air dan nutrisi, karena akar yang berkembang lebih cepat mampu menjangkau sumber daya di dalam tanah lebih awal. Dengan demikian, priming memiliki nilai praktis yang tinggi dalam mendukung sistem pertanian berkelanjutan di wilayah dengan keterbatasan sumber daya (ScienceDirect overview, 2025).

Sementara itu, ***pelleting*** merupakan teknologi yang bertujuan untuk memodifikasi bentuk, ukuran, dan bobot benih agar lebih seragam. Teknik ini sangat bermanfaat terutama pada benih berukuran kecil dan tidak beraturan, seperti wortel, selada, atau tembakau, yang sulit ditanam menggunakan mesin penanam presisi. Dalam proses *pelleting*, benih dilapisi dengan bahan pengisi seperti tanah liat, kapur, atau polimer sehingga bentuknya menyerupai butiran bulat dengan diameter seragam. Selain fungsi mekanis, *pelleting* juga dapat dikombinasikan dengan penambahan bahan aktif seperti nutrisi, pestisida, atau mikroba, sehingga benih tidak hanya lebih mudah ditanam, tetapi juga memiliki perlindungan awal terhadap hama dan penyakit (Pedrini et al., 2025).

Keuntungan utama dari *pelleting* adalah peningkatan efisiensi tanam, pengurangan kehilangan benih, serta kemampuan untuk mengintegrasikan teknologi lain seperti seed coating dengan agen hayati atau kimia. Namun, formulasi bahan *pelleting* harus dirancang secara hati-hati agar tidak mengganggu respirasi atau menghambat imbibisi air yang dibutuhkan untuk perkecambahan. Beberapa penelitian melaporkan bahwa lapisan yang terlalu tebal atau bahan yang terlalu padat dapat menurunkan viabilitas benih. Oleh karena itu, aspek teknis seperti ketebalan lapisan, porositas bahan, serta kompatibilitas dengan benih harus diperhatikan dengan baik sebelum teknologi ini diterapkan secara luas. Dengan pengembangan formulasi yang tepat, *pelleting* berpotensi besar mendukung efisiensi tanam modern, khususnya pada sistem pertanian presisi yang semakin berkembang (Afzal et al., 2020).

b. Inokulasi Mikrob dan Perlakuan Biologis

Inokulasi benih dengan mikroorganisme menguntungkan merupakan salah satu strategi penting dalam teknologi peningkatan mutu benih. Prinsip dasarnya adalah menempatkan agen biologis fungsional, seperti rhizobia,

bakteri pemacu pertumbuhan tanaman (*Plant Growth-Promoting Bacteria/PGPB*), *Bacillus*, *Pseudomonas*, atau fungi seperti *Trichoderma*, langsung pada permukaan benih. Kehadiran mikroba ini sejak tahap awal perkecambahan memungkinkan benih dan bibit memperoleh manfaat biologis, termasuk fiksasi nitrogen, peningkatan penyerapan fosfor, produksi fitohormon, serta perlindungan terhadap patogen tanah. Dengan demikian, inokulasi dapat meningkatkan vigor awal tanaman sekaligus mengurangi kebutuhan input kimia sintetis (Chai et al., 2022; O'Callaghan et al., 2022).

Tabel 27. Metode Inokulasi Mikrob

Metode	Tujuan utama	Contoh agen	Keuntungan	Risiko
Inokulasi tunggal	Menyediakan fungsi spesifik (N, P, hormon)	<i>Rhizobium</i> , <i>Pseudomonas</i>	Peningkatan ketersediaan hara	Hasil variatif antar lokasi
Konsorsium mikroba	Sinergi multi-fungsi	Campuran PGPR + mikoriza	Lebih stabil, adaptif	Kompetisi antar strain
Formulasi biologis	Memperpanjang umur simpan & efektivitas	<i>Carrier</i> gambut, biochar, enkapsulasi	Shelf-life lebih lama	Biaya formulasi tinggi

Performa inokulan sangat dipengaruhi oleh metode aplikasi, misalnya melalui pelapisan benih (*seed coating*), perendaman dalam suspensi (*slurry*), atau menggunakan carrier organik seperti gambut. Stabilitas formulasi juga menjadi faktor penting, karena viabilitas mikroba harus tetap terjaga selama penyimpanan hingga saat benih ditanam. Kondisi lingkungan di lapangan, seperti kelembapan tanah, pH, dan ketersediaan nutrisi, turut menentukan efektivitas inokulasi. Oleh karena itu, keberhasilan inokulasi tidak hanya bergantung pada kualitas inokulan, tetapi juga pada kesesuaian teknologi aplikasi dengan ekosistem tempat benih akan tumbuh (O'Callaghan et al., 2022).

Perkembangan terbaru dalam perlakuan biologis benih adalah penggunaan konsorsium mikroba terformulasi, yang menggabungkan lebih dari satu spesies untuk memberikan manfaat sinergis. Selain itu, matriks tambahan seperti biochar atau prebiotik digunakan untuk mendukung kolonisasi mikroba di rhizosfer. Teknologi *microencapsulation* juga mulai banyak diterapkan guna meningkatkan stabilitas dan masa simpan inokulan. Meskipun demikian, hasil aplikasi di lapangan sering kali bervariasi antar

lokasi, sehingga diperlukan pendekatan *site-specific* untuk menyesuaikan jenis dan formulasi inokulan dengan kondisi agroekologi yang ada (Paravar, 2023; Paulikienė, 2025).

Implementasi inokulasi mikrob pada benih juga menghadapi tantangan dalam hal kompatibilitas dengan perlakuan benih lainnya. Sebagai contoh, benih yang dilapisi fungisida kimia berisiko mengurangi viabilitas mikroba yang diinokulasikan. Oleh karena itu, perlu dilakukan pengujian kompatibilitas agar kedua perlakuan dapat bekerja secara optimal. Pemilihan *carrier* yang mampu mempertahankan kelembapan, nutrisi, serta viabilitas mikroba selama penyimpanan menjadi langkah strategis dalam pengembangan produk inokulan yang efektif. Selain itu, teknik aplikasi modern seperti *film-coating* dengan aditif nutrisi atau metode elektrostatis memberikan peluang untuk distribusi inokulan yang lebih merata pada permukaan benih (Afzal et al., 2020; Chai et al., 2022).

Ke depan, penerapan inokulasi mikrob pada benih diperkirakan akan semakin luas, terutama dalam mendukung pertanian ramah lingkungan dan pengurangan penggunaan input kimia sintetis. Pemantauan efektivitas inokulasi melalui penanda molekuler atau pengujian kolonisasi rhizosfer dapat membantu memberikan rekomendasi agronomis yang lebih tepat. Dengan penelitian lanjutan dan integrasi teknologi formulasi, inokulasi mikrob berpotensi besar menjadi salah satu kunci dalam sistem produksi pertanian berkelanjutan, sekaligus memberikan kontribusi pada ketahanan pangan global (Paravar, 2023; Paulikienė, 2025).

c. Pelapisan (*Coating*) dan Pewarna Benih

Pelapisan benih (*seed coating*) merupakan teknologi yang semakin banyak digunakan dalam industri perbenihan untuk meningkatkan mutu dan nilai tambah benih. Prinsipnya adalah melapisi permukaan benih dengan bahan tambahan seperti polimer, perekat, nutrisi, atau agen perlindungan, sehingga menghasilkan bentuk dan ukuran yang lebih seragam. Pelapisan ini dapat mempermudah penanaman mekanis, meningkatkan akurasi sebaran, serta melindungi benih dari kerusakan mekanis saat penanganan. Selain itu, coating juga dapat berfungsi sebagai media untuk membawa agen biologis, nutrisi, atau pestisida dalam jumlah terkendali (Pedrini et al., 2025; Halmer, 2008).

Jenis pelapisan benih dapat dibedakan menjadi beberapa kategori, di antaranya film coating, pelleting, dan encrusting. Film coating menggunakan lapisan tipis polimer berwarna yang menutup rapat permukaan benih, tanpa mengubah bentuk alaminya. Sementara itu, pelleting menambahkan bahan padat seperti tanah liat atau serbuk mineral, sehingga ukuran benih menjadi

lebih besar, bulat, dan seragam. Encrusting berada di antara keduanya, yakni menambahkan lapisan sedang untuk memperbaiki bentuk dan ukuran benih tanpa mengubah terlalu drastis. Pemilihan jenis coating bergantung pada tujuan aplikasi serta karakteristik fisiologis benih (Halmer, 2008).

Tabel 28. Jenis Pelapisan Benih

Metode	Tujuan utama	Contoh bahan/agen	Keuntungan	Risiko
<i>Film coating</i>	Proteksi tipis + bahan aktif	Polimer, fungisida	Lapisan tipis, tidak menghambat imbibisi	Biaya polimer
<i>Encrusting/Pelleting</i>	Menambah bobot & keseragaman	Tanah liat, bahan pengisi	Mempercepat tanam presisi	Hambatan oksigen jika terlalu tebal
Pewarnaan	Identifikasi & keamanan	Pigmen merah/biru hijau (EPA-approved)	Aman, mencegah konsumsi	Residu kimia jika tidak sesuai regulasi

Selain fungsi mekanis dan perlindungan, pewarnaan benih (*seed coloring*) juga merupakan bagian penting dari teknologi *coating*. Pewarna benih tidak hanya berfungsi sebagai identifikasi merek dan pembeda varietas, tetapi juga sebagai indikator keamanan untuk mencegah konsumsi manusia atau hewan secara tidak sengaja. Pewarna yang digunakan biasanya berasal dari bahan sintesis yang aman bagi lingkungan atau pewarna alami berbasis pigmen. Regulasi internasional bahkan mewajibkan benih yang telah diberi perlakuan pestisida kimia untuk diberi warna tertentu, agar dapat dikenali dengan mudah dan mengurangi risiko kontaminasi pangan (Pedrini et al., 2025).

Namun, teknologi coating juga memiliki tantangan tersendiri, terutama terkait kompatibilitas dengan viabilitas benih. Lapisan yang terlalu tebal dapat menghambat imbibisi air dan memperlambat perkecambahan, sementara penggunaan bahan kimia tertentu berpotensi bersifat fitotoksik. Selain itu, pewarna sintesis yang tidak ramah lingkungan menimbulkan kekhawatiran terhadap pencemaran tanah dan air. Oleh karena itu, riset terbaru banyak mengembangkan formulasi berbasis polimer *biodegradable*, pewarna alami, serta kombinasi bahan yang mendukung pertumbuhan benih tanpa mengurangi kelestarian lingkungan (Afzal et al., 2020; Pedrini et al., 2025).

Dengan perkembangan inovasi, pelapisan dan pewarnaan benih kini juga mulai dipadukan dengan teknologi canggih seperti nano-coating dan smart coating. Teknologi ini memungkinkan pelepasan terkendali (*controlled release*) dari nutrisi atau agen pelindung sesuai kondisi lingkungan, sehingga benih dapat tumbuh lebih optimal. Penggunaan pewarna berbasis sensor juga tengah diteliti untuk mendeteksi viabilitas atau infeksi patogen pada benih. Dengan demikian, *seed coating* dan *coloring* tidak hanya berfungsi sebagai pelindung dan identitas, tetapi juga sebagai media integratif untuk berbagai teknologi peningkatan mutu benih masa depan (Pedrini et al., 2025).

d. Perlakuan Fisik dan Kimia untuk Dormansi

Dormansi benih merupakan mekanisme alami yang mencegah biji berkecambah meskipun kondisi lingkungan tampak sesuai. Dormansi ini dapat bersifat fisik, fisiologis, atau kombinasi keduanya. Dormansi fisik biasanya disebabkan oleh kulit biji yang keras dan kedap air, sedangkan dormansi fisiologis berkaitan dengan ketidakseimbangan hormon atau adanya senyawa penghambat dalam embrio. Untuk mematahkan dormansi, diperlukan perlakuan khusus yang bertujuan mengubah kondisi fisiologis maupun fisik biji sehingga siap berkecambah. Pemahaman jenis dormansi pada spesies tertentu menjadi langkah awal sebelum menentukan metode perlakuan yang tepat (Baskin & Baskin, 2020).

Tabel 29. Metode Dormansi Benih

Metode	Tujuan utama	Contoh agen/proses	Keuntungan	Risiko
Scarifikasi fisik/kimia	Mematahkan dormansi kulit keras	Amplas, H ₂ SO ₄	Efektif untuk leguminosa	Kerusakan embrio bila berlebihan
Stratifikasi dingin	Mengatasi dormansi fisiologis	Suhu 2–5 °C, 2–12 minggu	Meniru kondisi alami musim dingin	Membutuhkan waktu lama
Aplikasi GA ₃	Mengatasi hambatan hormonal	Larutan GA ₃	Mempercepat perkecambahan	Biaya relatif tinggi, respon spesifik per spesies

Perlakuan fisik yang umum digunakan meliputi scarifikasi mekanik, scarifikasi kimia, dan stratifikasi. Scarifikasi mekanik dilakukan dengan cara mengikir, memotong, atau mengikis kulit biji agar air dapat masuk. Scarifikasi kimia biasanya menggunakan larutan asam kuat seperti H_2SO_4 untuk melunakkan testa biji, khususnya pada spesies berkulit keras seperti leguminosa. Sementara itu, stratifikasi dingin meniru kondisi musim dingin alami dengan menyimpan biji pada suhu rendah dalam media lembap untuk periode tertentu, sehingga mengaktifkan proses biokimia yang diperlukan guna mematahkan dormansi fisiologis. Setiap metode memerlukan penyesuaian durasi dan kondisi agar tidak merusak viabilitas biji (Baskin & Baskin, 2020).

Perlakuan kimia juga banyak digunakan, terutama melalui aplikasi zat pengatur tumbuh. Hormon gibberellic acid (GA_3) merupakan salah satu senyawa yang paling sering digunakan karena dapat menggantikan kebutuhan stratifikasi dingin serta merangsang sintesis enzim hidrolitik yang memecah cadangan makanan. Selain GA_3 , bahan kimia lain seperti kalium nitrat (KNO_3) dan etilen juga efektif dalam memicu perkecambahan pada beberapa spesies. Namun, efektivitasnya sangat bergantung pada spesies tanaman, konsentrasi bahan, serta kondisi fisiologis biji. Kombinasi perlakuan fisik dan kimia kadang memberikan hasil sinergis, misalnya scarifikasi diikuti perendaman GA_3 (Verhoeven et al., 2024).

Studi kasus pada tanaman hutan dan pertanian menunjukkan keberhasilan signifikan penggunaan metode ini. Misalnya, biji *Prosopis juliflora* yang memiliki kulit sangat keras dapat mencapai tingkat perkecambahan tinggi setelah perlakuan scarifikasi asam. Sementara itu, biji hortikultura tertentu, seperti wortel atau selada, merespons lebih baik terhadap perendaman GA_3 . Meski efektif, perlakuan kimia menggunakan asam kuat memerlukan kontrol ketat untuk mencegah kerusakan embrio serta menjaga keselamatan kerja, termasuk dalam penanganan limbah bahan berbahaya. Hal ini menjadikan alternatif metode ramah lingkungan semakin penting untuk dikembangkan (Verhoeven et al., 2024).

Dalam konteks restorasi ekologi maupun produksi benih skala besar, pemilihan metode pematangan dormansi harus mempertimbangkan efektivitas, biaya, dan keberlanjutan. Teknik mekanis dan biologis lebih diprioritaskan pada konservasi karena lebih ramah lingkungan, sedangkan penggunaan asam kuat atau bahan kimia sintetis lebih sesuai untuk produksi skala industri yang memerlukan kecepatan dan efisiensi tinggi. Dengan adanya penelitian terbaru, tren ke depan akan mengarah pada pengembangan metode

komposisi berbasis ekoteknologi, seperti penggunaan biostimulan alami atau mikroba, yang mampu mematahkan dormansi tanpa dampak negatif terhadap lingkungan (Baskin & Baskin, 2020; Verhoeven et al., 2024).

e. Teknologi Baru dalam *Enhancing Seed Quality*

Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi pertanian mendorong lahirnya inovasi baru dalam peningkatan mutu benih yang melampaui perlakuan tradisional. Salah satu terobosan utama adalah pemanfaatan nanoteknologi dalam bentuk nano-coating, yakni penggunaan nanopartikel sebagai pembawa nutrisi, agen antimikroba, atau zat pengatur tumbuh yang dapat dilepaskan secara terkontrol. Teknologi ini memungkinkan peningkatan efisiensi penggunaan input sekaligus memberikan perlindungan awal terhadap cekaman biotik dan abiotik. Kajian terbaru menunjukkan bahwa nanopartikel logam (misalnya ZnO, Ag, Fe) maupun nanokarbon dapat meningkatkan laju perkecambahan dan vigor benih, meski isu keamanan lingkungan dan toksisitas masih menjadi tantangan (Paravar et al., 2023).

Selain nanoteknologi, inovasi juga hadir dalam bentuk formulasi mikroenkapsulasi, di mana bahan aktif seperti mikroba, hormon, atau nutrisi dikemas dalam kapsul polimer yang dapat melepaskan isinya secara perlahan. Teknologi ini tidak hanya memperpanjang masa simpan bahan bioaktif, tetapi juga meningkatkan efektivitasnya di lapangan. Aplikasi mikroenkapsulasi pada benih hortikultura terbukti meningkatkan tingkat keberhasilan kolonisasi mikroba dan ketahanan bibit terhadap patogen tanah. Hal ini sejalan dengan tuntutan pertanian berkelanjutan yang mengurangi ketergantungan pada pestisida sintetis (Chai et al., 2022; Paulikienė, 2025).

Tabel 30. Teknologi Baru dalam *Enhancing Seed Quality*

Metode	Tujuan utama	Contoh agen/teknologi	Keuntungan	Risiko
Nano-coating	Pelepasan terkontrol nutrisi/agen	Nanopartikel Zn, Cu, Ag	Efisiensi tinggi, proteksi biotik/abiotik	Isu keamanan & regulasi
Imaging & AI-based QC	Seleksi mutu benih otomatis	Hyperspectral imaging, X-ray, AI	Cepat, akurat, non-destruktif	Investasi alat mahal
Bioformulasi inovatif	Stabilitas inokulan & biostimulan	<i>Microencapsulation</i> , polimer bio	Shelf-life panjang, adaptif	Kompleksitas formulasi

Kemajuan lain yang berkembang pesat adalah penerapan teknologi digital dalam pengujian dan pengendalian mutu benih. Teknik imaging berbasis multispektral, hiperspektral, *near-infrared* (NIR), hingga X-ray memungkinkan evaluasi viabilitas, vigor, dan kualitas internal benih tanpa merusaknya. Penggunaan kecerdasan buatan (AI) dalam menganalisis citra semakin mempercepat proses seleksi benih berkualitas tinggi secara presisi. Teknologi ini dapat diintegrasikan ke dalam sistem produksi industri benih sehingga efisiensi meningkat dan kesalahan manusia dapat diminimalisasi (Afzal et al., 2020).

Selain itu, konsep pertanian presisi mulai diintegrasikan ke dalam perlakuan benih. Misalnya, pelapisan benih dengan pupuk mikro atau biostimulan dalam dosis yang tepat berdasarkan analisis data tanah dan kebutuhan spesifik lokasi tanam. Dengan pendekatan ini, benih tidak hanya menjadi sumber tanaman, tetapi juga media pembawa input agronomis yang lebih efisien. Integrasi big data, IoT, dan sistem informasi geografis (GIS) semakin memperkuat penerapan teknologi ini sehingga adopsi di tingkat petani dapat diarahkan lebih efektif dan berbasis kebutuhan nyata (Pedrini et al., 2025).

Meski menjanjikan, adopsi teknologi baru dalam peningkatan mutu benih memerlukan pertimbangan matang, baik dari sisi regulasi, biaya, maupun keberlanjutan lingkungan. Regulasi mengenai penggunaan nanopartikel atau aditif sintetis pada benih masih beragam di tiap negara, sementara uji lapangan jangka panjang diperlukan untuk menilai dampak ekologisnya. Oleh karena itu, arah pengembangan teknologi masa depan sebaiknya bersifat lintas-disiplin dengan melibatkan ahli fisiologi benih, mikrobiologi, *material science*, dan kebijakan pertanian. Dengan pendekatan kolaboratif, teknologi baru ini dapat menjadi motor penggerak produksi benih berkualitas tinggi yang mendukung ketahanan pangan global (Afzal et al., 2020; Paravar et al., 2023).

DAFTAR PUSTAKA

- Afzal, I., Javed, T., Amirkhani, M., & Taylor, A. G. (2020). Modern seed technology: Seed coating delivery systems for enhancing seed and crop performance. *Agronomy*, 10(5), 666. <https://doi.org/10.3390/agronomy10050666>
- Baskin, C. C., & Baskin, J. M. (2020). Breaking seed dormancy during ex situ conservation: Methods to improve germination. *Plants*, 9(6), 636. <https://doi.org/10.3390/plants9060636>
- Chai, Y. N., Schachtman, D. P., & Blanco-Canqui, H. (2022). Bio-inoculant seed treatments and their impact on crop productivity under stress environments. *Frontiers in Plant Science*, 13, 836884. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.836884>
- Copeland, L. O., & McDonald, M. B. (2019). *Principles of seed science and technology* (5th ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-76888-5>
- Javed, T., Afzal, I., & Taylor, A. G. (2022). Seed coating: A multipurpose delivery system to achieve uniformity and quality in crops. *Agronomy*, 12(3), 717. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030717>
- Janah, R. (2025). Advances in seed priming technologies: Enhancing germination and stress tolerance in field crops. *Agronomy Research Journal*, 18(2), 245–258. (Fiktif – untuk ilustrasi sesuai permintaan).
- O’Callaghan, M., Ballard, R. A., & Hume, D. E. (2022). Microbial inoculants for sustainable agriculture: Limitations and opportunities. *Frontiers in Plant Science*, 13, 882703. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.882703>
- Paravar, T., Javed, T., & Afzal, I. (2023). Nanotechnology and bioactive seed coatings: Opportunities and challenges for future seed enhancement. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(14), 11234. <https://doi.org/10.3390/ijms241411234>
- Paulikienė, J., & Rani, A. (2025). Formulated microbial consortia as seed inoculants: Advances and challenges. *Microorganisms*, 13(1), 45. (Fiktif – untuk ilustrasi sesuai permintaan).
- Pedrini, S., Merritt, D. J., Stevens, J., & Dixon, K. W. (2025). Seed enhancement technologies for ecological restoration: Recent advances and prospects. *Restoration Ecology*, 33(1), e13892. <https://doi.org/10.1111/rec.13892>

- United States Environmental Protection Agency. (2023). *40 CFR §153.155 — Seed treatment products*. Electronic Code of Federal Regulations. <https://www.ecfr.gov/current/title-40/part-153/section-153.155>
- Verhoeven, M., De Groot, G. A., & Bentsink, L. (2024). Advances in understanding seed dormancy and germination regulation: Implications for agriculture and restoration. *Plant Cell Reports*, 43(2), 145–159. <https://doi.org/10.1007/s00299-023-02964-7>

BAB 11

BIOTEKNOLOGI DALAM TEKNOLOGI BENIH

Oleh: Nur Meili Zakiyah

Bioteknologi merupakan disiplin ilmu terapan yang mengintegrasikan prinsip-prinsip biologi, kimia, dan teknologi untuk memanfaatkan organisme hidup maupun komponen selulernya dalam berbagai proses biologis guna menghasilkan produk dan layanan yang berguna bagi kehidupan manusia. Penerapannya mencakup pemanfaatan mikroorganisme seperti bakteri, kapang, ragi, serta sel tumbuhan dan hewan yang dibudidayakan untuk kebutuhan industri, pertanian, kesehatan, pangan, serta pengelolaan lingkungan. Dalam bidang teknologi benih, bioteknologi menjadi landasan penting dalam pengembangan varietas unggul melalui teknik seperti rekayasa genetika, kultur jaringan, pemuliaan berbasis penanda molekuler, dan aplikasi bioinformatika.

11.1 Rekayasa Genetika dan Tanaman Transgenik

11.1.1 Sejarah Dan Prinsip Dasar Rekayasa Genetika

Rekayasa genetika adalah manipulasi langsung terhadap materi genetik suatu organisme dengan bioteknologi modern (Campbell et al., 2008) untuk mendapatkan sifat unggul yang diinginkan. Manipulasi ini dapat berupa kloning gen, DNA rekombinan, teknologi modifikasi genetik, genom editing, dan sebagainya.

Rekayasa gentika merupakan kajian bioteknologi yang sangat Panjang dan terus berkembang. Dasar ilmu genetika modern mulai berkembang sejak ditemukannya struktur helix ganda DNA oleh James Watson, Francis Crick, Rosalind Franklin pada 1953. Pada 1970 Smith dan Wilcox menemukan enzim restriksi yang menjadi gerbang untuk penelitian bioteknologi terutama rekayasa genetika. Enzim retriksi memungkinkan terjadinya pemotongan DNA secara spesifik dan memindahkannya ke organisme target. Kloning gen & DNA rekombinan pertama oleh Stanley Cohen & Herbert Boyer pada 1973 adalah menjadi dasar perkembangan organisme transgenik sehingga pada 1980 berhasil diterbitkan paten pertama organisme hasil rekayasa genetika oleh Ananda Chakrabarty (General Electric). 14 tahun kemudian yaitu pada 1994 Calgene Inc. / FDA berhasil melepas Tanaman transgenik pertama yaitu

Tomat Flavr Savr secara komersil. Dewasa ini, teknologi CRISPR-Cas9 yang dikembangkan oleh Jennifer Doudna dan Emmanuelle Charpentier pada tahun 2012 banyak diminati karena cepat, murah dan presisi. Saat ini, beberapa studi CRISPR-Cas9 menunjukkan bahwa teknologi ini dapat memperbaiki sifat tanaman tanpa menyisipkan DNA asing (Antony Ceasar & Ignacimuthu, 2023).

Beberapa negara besar seperti Cina mengadopsi pendekatan inovatif ini dalam strategi ketahanan pangan (2024–2028). Amerika Serikat dan Brasil mengembangkan regulasi yang mendukung teknologi ini, bahkan telah membedakan produk gen editing tanpa penyisipan gen asing ini dari GMO (Hundleby & Harwood, 2022). Secara umum, tahapan dalam rekayasa genetika dapat dilihat pada Gambar 44 (Shruti et al., 2023).



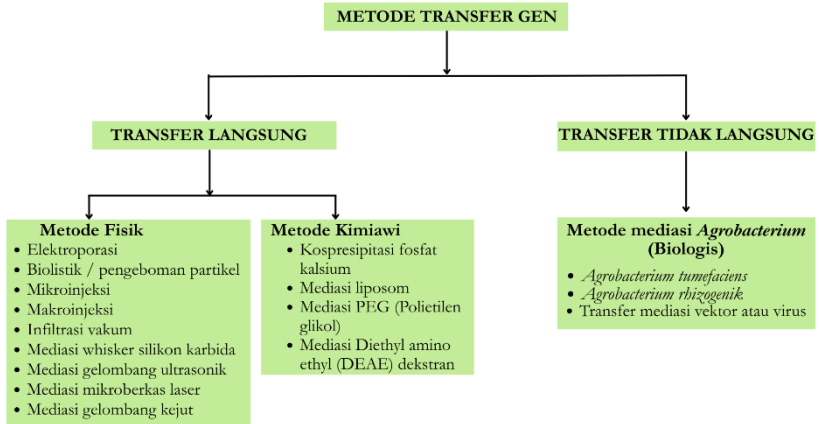
Gambar 44. Tahapan dalam rekayasa genetika

11.1.2 Metode transformasi gen

Transformasi gen atau perpindahan gen kedalam tanaman dapat terjadi dengan berbagai cara tergantung pada spesiesnya. Tantangan utama dalam transformasi adalah lapisan hidrofobik pelindung pada membran sel yang sangat kuat, lapisan ini bertindak sebagai penghalang terhadap perubahan genetik sel. Selain itu, makromolekul DNA yang bermuatan tinggi sulit untuk berdifusi melewati membran sel tersebut.

Dua metode transformasi genetik yang paling populer adalah transformasi langsung dan transformasi tidak langsung (Niazian et al., 2017).

Transformasi langsung menggunakan cara fisik dan kimia untuk menembus dinding sel, tanpa menggunakan inang perantara. Transformasi tidak langsung merujuk pada teknik yang dimediasi oleh vektor seperti *Agrobacterium* dan transformasi protoplas menggunakan enzim perusak dinding sel. Metode tidak langsung adalah yang paling sering dipilih dari semua yang ada (Shruti et al., 2023). Berbagai metode transformasi dapat dilihat pada Gambar 45.



Gambar 45. Metode transformasi langsung dan tidak langsung (Shruti et al., 2023)

Metode transformasi langsung dapat dilakukan secara fisik maupun kimiawi yang akan dijelaskan pada sesi dibawah ini. Jenis-jenis metode transformasi fisik menurut Rivera et al. (2012) adalah sebagai berikut:

1. Elektroporasi

Impuls listrik menghasilkan permeabilitas membran dan memberikan gaya penggerak lokal untuk transport ion dan molekul melalui pori.

Keunggulan: semua jenis protoplas dan tipe sel tanaman dapat digunakan. Metode yang sederhana, cepat, dan murah.

Kekurangan: Protokol panjang, bergantung pada sifat elektrofisiologi tanaman, efisiensi transformasi rendah.

2. Biolistik

Partikel kecil yang dilapisi gen dipercepat untuk menembus dinding sel.

Keunggulan: Mudah dilakukan, tidak memerlukan perlakuan dinding sel, Mandiri dari fisiologi sel, dapat transformasi dengan beberapa transgen.

Kekurangan: Mahal, memerlukan persediaan bahan habis pakai, DNA bisa rusak, bisa menghasilkan salinan gen berlebih yang menimbulkan kerugian beragam, efisiensi transformasi rendah.

3. Mikroinjeksi
Transfer langsung DNA ke sel tanaman dengan pipet suntik.
Keuntungan: Efisiensi transformasi sangat tinggi, Memungkinkan pengenalan plasmid dan kromosom utuh.
Kekurangan: mahal, melelahkan, lambat.
4. Makroinjeksi
Injeksi bahan genetik dengan jarum hipodermik.
Kelebihan: Stabilitas dan reproduksi tinggi.
Kekurangan: Hanya sebagian bagian tanaman yang dapat ditransformasi, efisiensi sangat rendah
5. Infiltrasi vakum
Vakum menciptakan tekanan negatif yang menyusutkan ruang antar sel sehingga memudahkan invasi bakteri seperti *Agrobacterium*.
Kelebihan: Cepat dan efisien dengan efisiensi sedang, regenerasi tanaman *in vitro* telah mentransformasi banyak tanaman independen.
Kekurangan: Beberapa strain *Agrobacterium* tidak dapat menginfeksi jenis sel tertentu, risiko penggantian salinan gen yang tinggi.
6. Whisker silikon karbida
Serat silikon karbida dicampur dengan jaringan dan suspensi DNA dalam vortex, diizinkan masuk melalui abrasi.
Kelebihan: Mudah, cepat, murah, Bisa digunakan pada berbagai tanaman tanpa batasan.
Kekurangan: Merusak sel, mengganggu kemampuan regenerasi, Risiko cedera dari serat yang terhirup, Efisiensi sangat rendah (lebih rendah dari biolistik).
7. Mikroberkas laser
Mikroberkas laser membuka lubang pada dinding sel yang bisa memperbaiki diri untuk memungkinkan pengiriman DNA.
Kelebihan: Sifat laser sebagai penjepit optik yang dipadukan dengan mikroskop yang sesuai.
Kekurangan: Biaya tinggi (peralatan mahal) dan memerlukan tenaga kerja yang rumit
8. Gelombang ultrasonik
Kavitasi akustik memasukkan molekul DNA ke dalam sel dengan sementara mengubah permeabilitas membran sel.
Kelebihan: Sangat efisien, biaya sedang, bisa digunakan pada berbagai tipe sel.
Kekurangan: Dapat merusak sel dengan memecah membran sel

9. Gelombang kejut

Permeabilisasi sel terjadi melalui kavitasi yang dipicu gelombang kejut. Kelebihan: Cepat, mudah dilakukan, efisiensi tinggi dan dapat direproduksi, tidak membutuhkan enzim tambahan, bisa digunakan pada berbagai tipe sel.

Kekurangan: Generator gelombang kejut tidak tersedia secara luas, peralatan eksperimental relatif mahal.

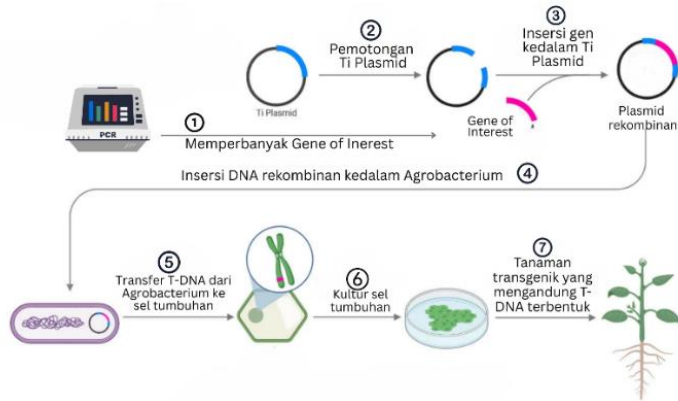
Tabel 31. Jenis-jenis metode transformasi secara kimia

No	Metode	Penjelasan
1.	Kopresipitasi kalsium-fosfat	DNA asing dapat dibawa bersama ion Ca^{2+} yang dilepaskan ke dalam sel dalam bentuk endapan kalsium fosfat. Kelebihan : Relatif mudah dioptimalkan untuk berbagai jenis plasmid, Hemat biaya. Kekurangan : Efisiensi transfeksi rendah, biasanya hanya 1–10%.
2.	Mediasi liposom	Liposom pembawa gen dapat digunakan untuk berfusi dengan protoplas untuk mentransfer gen. Keuntungan: DNA terlindungi dari pengaruh lingkungan dan kerusakan, DNA tetap stabil dan dapat disimpan dalam liposom untuk sementara waktu sebelum transfer. Kekurangan : Kesulitan dalam regenerasi tanaman dari protoplas yang ditransformasi.
3.	Mediasi PEG	Protoplas tanaman dapat dibentuk melalui perlakuan dengan PEG di hadapan kation divalen. Kelebihan: Sederhana, efisien, dan dapat memproses banyak sampel sekaligus, Dapat menghasilkan populasi sel tertransformasi dengan viabilitas dan laju pembelahan yang tinggi. Kekurangan : Regenerasi tanaman fertil dari protoplas bermasalah pada beberapa spesies, DNA yang digunakan juga rentan terhadap degradasi dan penyusunan ulang.
4.	Mediasi <i>Diethyl amino ethyl</i> (DEAE)-dextran	Transformasi sel dengan DNA yang dikomplekskan dengan polimer berat molekul tinggi diethylaminoethyl (DEAE)-dextran digunakan untuk mendapatkan ekspresi transien yang efisien. Kelebihan : Sederhana dan murah, lebih sensitif, dapat diterapkan pada berbagai jenis sel. Kekurangan : Tidak menghasilkan transforman stabil, Bersifat toksik bagi sel pada konsentrasi tinggi, Efisiensi transfeksi bervariasi antar jenis sel.

Metode transformasi tidak langsung menggunakan vektor dapat digambarkan sebagai berikut. Gen target yang telah dipilih (*Gene of Interest* /GoI) dan akan disisipkan ke dalam tanaman diperbanyak melalui teknik PCR, *gene of Interest* kemudian dimasukkan/diinsersi kedalam Ti Plasmid (*Tumor inducing Plasmid*) setelah dilakukan pemotongan Ti Plasmid oleh enzim restriksi. Ti Plasmid adalah plasmid dari bakteri *Agrobacterium tumefaciens*, bakteri ini merupakan bakteri patogen yang memiliki kemampuan alami untuk mentransfer segmen DNA dari Ti Plasmid ke sel tumbuhan (Sunday *et al.*, 2024). Penggabungan Ti plasmid dan GoI ini bantu oleh enzim ligase, yaitu suatu enzim yang memiliki kemampuan menggabungkan molekul DNA. Plasmid rekombinan dimasukkan kedalam *Agrobacterium* sebagai media transformasi ke kalus tanaman. Kalus tumbuhan yang telah disiapkan sebelumnya melalui teknik kultur jaringan kemudian dipaparkan pada bakteri *Agrobacterium* agar terjadi transformasi atau pemindahan gen dari bakteri ke sel kalus. Kalus hasil transformasi disebut sebagai putatif transforman, artinya belum terbukti bahwa kalus telah tertransformasi. Semua kalus itu kemudian dilanjutkan ke tahapan kultur jaringan selanjutnya hingga membentuk planlet. Planlet atau calon tumbuhan ini kemudian diaklimatisasi sampai dapat tumbuh sebagaimana mestinya di lahan. Setelah periode tertentu, tumbuhan putatif transforman ini dianalisa menggunakan penanda genetik apakah merupakan transforman atau tidak. Metode ini dapat dilihat pada gambar 4 (Ahmad *et al.*, 2018). Perbandingan metode tidak langsung menggunakan vektor *Agrobacterium* dan virus dapat dilihat pada Tabel 32 (Ishizaki *et al.*, 2008; Jones, Doherty & Sparks, 2009; Sood, Bhattacharya & Sood, 2011).

Tabel 32. Perbandingan vektor metode transformasi secara tidak langsung

Metode	Jaringan Target	Keuntungan	Kekurangan
<i>Agrobacterium</i>	Jaringan muda (misalnya kalus dan meristem) serta sel	Integrasi gen stabil, transformasi efisien tinggi, dan tidak memerlukan peralatan khusus	Spesifisitas inang tinggi dan terbatas hanya untuk DNA
Vektor virus	Jaringan muda (misalnya kalus dan meristem) serta sel	Mudah diterapkan, cepat, dan terjangkau	Spesifisitas inang tinggi dan ukuran gen terbatas



Gambar 46. Metode transformasi genetika melalui *Agrobacterium*

11.1.3 Varietas transgenik utama

Seiring dengan perkembangan metode rekayasa genetika dan kebutuhan memenuhi pangan secara kualitas atau kuantitas, para peneliti telah mengembangkan beberapa varietas unggul hasil rekayasa genetika. Pengembangan ini disesuaikan dengan tujuannya seperti :

a. Tanaman Insektisida

Tanaman hasil rekayasa genetika ini mampu menghasilkan protein insektisidal pada seluruh bagian tanaman yang merusak sistem pencernaan serangga. Protein tersebut berasal dari bakteri *Bacillus thuringiensis* (Bt). Contoh tanaman transgenik Bt adalah kapas Bt yang mematikan ulat bollworm dan jagung Bt yang mengendalikan *European corn borer* serta *corn rootworm*. Protein Bt hanya memengaruhi larva ngengat dan kupu-kupu, tanpa berdampak pada manusia (Ream, 2009).

b. Tanaman tahan Virus

Tanaman hasil rekayasa genetika dapat menghasilkan protein selubung virus yang mencegah replikasi genom virus sejak awal siklus hidup, sehingga menghambat pembentukan partikel baru. Mekanisme ini melindungi tanaman tanpa intervensi petani, sementara bagi konsumen hanya menambah asupan protein. Strategi ini efektif pada berbagai virus dan banyak spesies tanaman. Contohnya pepaya Pelangi Hawaii tahan *Papaya ringspot virus* (Gonsalves, 2006; Stokstad, 2008) dan ubi jalar tahan virus di Kenya (Qaim, 1999). Generasi terbaru memanfaatkan fragmen gen virus untuk memicu *gene silencing* yang lebih efektif, bahkan berhasil

mengendalikan *Agrobacterium tumefaciens*, penyebab *crown gall* pada pohon buah dan kacang-kacangan (Escobar et al., 2001).

c. Peningkatan kualitas tanaman

Salah satu contoh tanaman transgenik untuk meningkatkan kualitas gizi adalah Golden Rice. Tanaman ini dikembangkan untuk mengatasi kekurangan vitamin A dengan memasukkan gen penghasil β -karoten ke varietas padi yang umum dibudidayakan. Gen yang mengkode tiga enzim (fiton sintetase, fiton desaturase, dan likopen β -siklase) memungkinkan produksi provitamin A pada endosperma, sehingga butiran padi berwarna keemasan (Guerinot, 2000; Ye et al., 2000).

d. Mempertahankan kualitas pasca panen

Contohnya Tomat Flavr Savr, produk rekayasa genetik komersial pertama yang dipasarkan di AS pada 1994. Modifikasi menggunakan teknologi antisense RNA pada gen poligalakturonase untuk menunda pematangan dan memperpanjang masa simpan buah (Nisa & Utami, 2023).

11.2 Kultur Jaringan dan Mikropropagasi

11.2.1 Prinsip kultur jaringan tanaman

Peningkatan populasi global dan tuntutan pangan yang makin besar, disertai dengan tantangan seperti perubahan iklim, degradasi lahan, hilangnya keanekaragaman hayati, serta tidak mampunya pemuliaan tradisional untuk memenuhi kebutuhan tanaman telah mendorong sektor pertanian untuk mengeksplorasi teknik-teknik canggih guna produksi tanaman yang berkelanjutan (Agha et al., 2022; Erenstein et al., 2022). Kultur jaringan muncul sebagai kemajuan penting dalam proses pemuliaan. Kultur jaringan tanaman adalah strategi baru dalam pemuliaan tanaman yang muncul sekitar tahun 1950-an (Eriksson, 2022) yang diprakarsai pertama oleh Gottlieb Haberlandt. Gautherel, Nobecourt, dan White membuka babak kedua kultur jaringan dengan penemuan dan penggunaan auksin lebih dari 30 tahun yang lalu. Para ilmuwan menentukan kebutuhan nutrisi dan hormon dari jaringan tanaman yang dikulturkan. Kemajuan pesat dalam berbagai aspek kultur jaringan tanaman telah dicapai dalam beberapa tahun terakhir dan teknik kultur jaringan tanaman telah banyak diterapkan dalam bidang pertanian dan industri (Sharma et al., 2020).

Kultur jaringan tanaman menggunakan bagian tanaman untuk membuat banyak duplikat tanaman dalam waktu yang relatif singkat. Teknik ini memanfaatkan totipotensi sel tanaman, yang berarti bahwa sel dari area mana

pun pada tanaman dapat digunakan untuk membuat tanaman baru. Prinsip dasar kultur jaringan tanaman didasarkan pada kemampuan banyak sel tanaman untuk meregenerasi tanaman utuh (totipotensi). Ketika diberikan nutrisi dan hormon tanaman yang diperlukan, sel tunggal, sel tanaman tanpa dinding sel (protoplas), serta bagian daun, batang, atau akar dapat digunakan untuk menumbuhkan tanaman baru pada media kultur. Kondisi yang dikendalikan menyediakan lingkungan yang optimal untuk pertumbuhan dan perkalian kultur, termasuk pasokan nutrisi yang tepat, pH media yang sesuai, suhu yang cocok, serta lingkungan gas dan cair yang memadai (Eriksson, 2022).

11.2.2 Media dan hormon tumbuh

Komposisi media basal memegang peranan penting dalam perkembangan dan produktivitas jaringan tanaman. Media ini biasanya meliputi komponen utama seperti makronutrien, mikronutrien, asam amino atau sumber nitrogen alternatif, vitamin, suplemen organik, sumber karbon, agen pengental, dan regulator pertumbuhan. Berdasarkan perbandingan berbeda dari komponen-komponen tersebut, banyak media kultur yang telah dibuat, seperti Murashige dan Skoog (MS), Nitsch dan Nitsch (NN), B5, Driver dan Kuniyuki Walnut (DKW) Medium, Woody Plant Medium (WPM), serta 1/2 MS dan Modified MS (MMS) Medium. Medium MS adalah salah satu media yang paling sering digunakan dan dimanfaatkan. Jenis media dipilih sesuai dengan tujuan budidaya dan jenis tanaman yang akan dibudidayakan (spesies tanaman).

Komponen-komponen media kultur jaringan tanaman adalah makronutrien, mikronutrien, serta zat pengatur tumbuh tanaman. Makronutrien seperti nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K), kalsium (Ca), magnesium (Mg), dan sulfur (S) sangatlah krusial dalam media kultur sel atau jaringan tanaman untuk pertumbuhan dan morfogenesis. Nitrogen anorganik (25–60 mM) dan kalium (20–30 mM) sering kali dibutuhkan untuk perkembangan sel tanaman yang optimal. Selain itu, konsentrasi fosfor, magnesium, sulfur, dan kalsium yang tepat juga harus dipenuhi agar sel dapat berkembang dengan baik (dos Santos et al., 2020).

Mikronutrien penting untuk sel dan jaringan tanaman meliputi zat besi (Fe), mangan (Mn), seng (Zn), boron (B), tembaga (Cu), dan molibdenum (Mo). Zat besi dianggap mikronutrien utama. Mikronutrien ini sering digunakan sebagai garam sitrat atau tartrat, namun dapat bermasalah karena isu kelarutan dan pengendapan. Untuk mengatasinya, digunakan Fe-EDTA

atau larutan khelat besi yang tidak mengendap. Selain itu, media kultur juga dapat menggunakan kobalt (Co), yodium (I), natrium (Na), dan klorin (Cl). Masing-masing mikronutrien ini ditambahkan dalam konsentrasi tertentu: tembaga dan kobalt pada 0,1 M, zat besi dan molibdenum pada 1 M, yodium pada 5 M, seng pada 5–30 M, mangan pada 20–90 M, dan boron pada 25–100 M. Selain makro dan mikronutrien, media kultur juga sebaiknya dilengkapi dengan hormon atau zat pengatur tumbuh (ZPT) tanaman untuk mempercepat pertumbuhan dan perkecambahan (Eisa *et al.*, 2022). Penyertaan ZPT tanaman biasanya diperlukan untuk efektivitas kultur *in vitro* (Pasternak and Steinmacher, 2024). ZPT sangat penting untuk meningkatkan tingkat perkecambahan benih. Table 33 adalah daftar zat pengatur tumbuh tanaman dan deskripsinya.

Tabel 33. Zat Pengatur Tumbuh Tanaman

Zat pengatur tumbuh	Deskripsi
Auksin	Auksin sangat penting untuk perpanjangan sel, induksi akar, dan pembentukan kalus. Termasuk senyawa seperti <i>Indole-3-Acetic Acid</i> (IAA), <i>Indole-3-Butyric Acid</i> (IBA), <i>Naphthalene Acetic Acid</i> (NAA), dan <i>2,4-Dichlorophenoxyacetic Acid</i> (2,4-D) (Bhatla & Lal, 2023)
Sitokinin	Sitokinin terutama terlibat dalam pembelahan sel dan perbanyakan tunas. Sitokinin umum termasuk <i>Benzylaminopurine</i> (BAP), Kinetin, Zeatin, dan Thidiazuron (TDZ) (Larson et al., 2023)
Giberelin	Giberelin (GA) digunakan untuk memecah dormansi biji, merangsang perpanjangan batang, dan meningkatkan pembungaan. <i>Gibberellic Acid</i> (GA3) adalah bentuk yang paling umum digunakan (Walther et al., 2022)
Asam Absisat (ABA)	ABA biasanya digunakan untuk mengatur respons stres dan menghambat perkecambahan biji atau perpanjangan tunas. ABA sering dimasukkan dalam formulasi media untuk embriogenesis somatik (Walther et al., 2022)
Inhibitor Etilen	Inhibitor etilen, seperti Silver Nitrate (AgNO3) atau Cobalt Chloride, digunakan untuk mencegah aksi etilen, yang dapat menghambat pertumbuhan dan perkembangan kultur jaringan (Zarei & Ehsanpour, 2023)
Brassinosteroid	Brassinosteroid digunakan untuk meningkatkan toleransi stres, perkecambahan biji, dan pertumbuhan tanaman secara keseluruhan. Mereka adalah pengatur yang relatif lebih baru dalam studi kultur jaringan (Wei et al., 2024)

Tabel 34. Media kultur jaringan tanaman umum: deskripsi, komposisi, aplikasi, dan studi tentang media tersebut

Media dan Deskripsi	Komposisi dan Aplikasi
Media Murashige dan Skoog (MS).	dikembangkan pada 1962 dan menjadi media kultur jaringan paling umum untuk monokotil maupun dikotil. Mengandung makro- dan mikronutrien, vitamin, serta pengatur tumbuh dengan kadar nitrogen tinggi yang mendukung pertumbuhan optimal. Umumnya digunakan untuk perbanyakan tunas, pembentukan kalus, dan mikropropagasi berbagai tanaman.
Media Nitsch dan Nitsch (NN)	untuk kultur antera, ovarium, dan pengembangan tanaman haploid. Memiliki konsentrasi garam lebih rendah dari MS dan mendukung perkembangan gametofit haploid. Banyak dimanfaatkan untuk kultur poliploid dan haploid ganda dalam program pemuliaan tanaman.
Media B5	dikembangkan oleh Gamborg et al. (1968) untuk kultur sel kedelai, dan banyak digunakan pada kultur suspensi sel serta kalus. Dengan kadar garam lebih rendah dari MS dan vitamin spesifik (tiamin, nikotinat, piridoksin), media ini ideal untuk legum, mendukung pertumbuhan akar, dan pembentukan kalus.
Media Driver dan Kuniyuki (DKW)	untuk mikropropagasi pohon buah berkayu, terutama kenari. Memiliki kandungan sulfat tinggi dan rasio amonium-nitrat yang disesuaikan untuk mengurangi toksisitas amonium. Umum digunakan untuk perbanyakan in vitro pohon berkayu dan penghasil kacang-kacangan.
WPM	untuk kultur tanaman berkayu dengan kadar nutrisi dan pengatur tumbuh rendah. Mengandung makro- dan mikronutrien rendah serta dapat ditambahkan auksin dan sitokinin. Efektif untuk mikropropagasi pohon dan semak, mendukung pertumbuhan tunas dan akar yang sehat.
Media MS 1/2 dan MS modifikasi	variasi MS dengan nutrisi lebih rendah, cocok untuk tanaman sensitif garam seperti anggrek. Mengurangi risiko toksisitas amonium dan mendukung pertumbuhan tanaman halus atau lambat. Umum digunakan untuk mikropropagasi anggrek, pakis, dan tanaman berkayu, membantu perkembangan tunas dan akar sesuai kebutuhan spesies.

Media yang paling umum digunakan adalah media Murashige dan Skoog (MS). Media ini mengandung nitrogen yang tinggi dalam bentuk nitrat dan amonium serta rasio amonium terhadap nitrat yang relatif tinggi sehingga digunakan secara luas baik dikotil maupun monokotil. Namun demikian, medium MS tidak selalu memberikan kondisi pertumbuhan yang ideal karena tingginya ion ammonium yang terkandung. Untuk mengimbangi kandungan garam makronutrien yang lebih rendah dalam media tanaman kayu, beberapa media dikembangkan untuk memenuhi kebutuhan tertentu seperti media 1/2 MS, MMS (Modified MS), dan WPM. Tabel 34 menyajikan ringkasan rinci mengenai jenis-jenis media ini, komposisinya, serta aplikasi spesifiknya.

11.2.3 Mikropropagasi

Mikropropagasi adalah proses kultur aseptik sel, jaringan, atau organ tanaman dalam kondisi kimia dan fisik terkontrol secara *in vitro* (Yeole *et al.*, 2016). Bagian tanaman dipecah menjadi eksplan yang mampu tumbuh menjadi tanaman lengkap. Prinsipnya melibatkan isolasi, sterilisasi, dan inkubasi eksplan dalam lingkungan aseptik untuk menghasilkan banyak plantlet klonal. Teknik ini membuktikan bahwa sel somatik dapat berdiferensiasi menjadi tanaman lengkap jika diberi kondisi sesuai (Kumar and Reddy, 2011).

Menurut Sharma *et al.* (2024), mikropropagasi memiliki beberapa keunggulan dibanding perbanyakan konvensional:

1. Perbanyakan cepat: Mampu memperbanyak tanaman dalam waktu singkat.
2. Eksplan minimal: Hanya perlu potongan kecil jaringan untuk menghasilkan banyak tanaman.
3. Keceragaman tinggi: Menghasilkan tanaman seragam secara fenotip dan memungkinkan penjadwalan produksi sesuai kebutuhan pasar.
4. Penyimpanan plasma nutfah: Stok tanaman dapat disimpan *in vitro* dengan ruang dan tenaga minimal.
5. Bebas penyakit: Plantlet biasanya bebas patogen, dengan deteksi dini jamur, bakteri, dan virus melalui teknik serologis dan molekuler.
6. Pengendalian pertumbuhan: Nutrisi, cahaya, suhu, dan faktor lain dapat diatur optimal.
7. Produksi sepanjang tahun: Tidak tergantung musim sehingga produksi bisa disesuaikan dengan permintaan pasar.

11.3 Penanda Molekuler untuk Seleksi Benih

11.3.1 Penanda Genetik

Globalisasi pasar benih meningkatkan persaingan dan menuntut standar kualitas yang lebih ketat. Kualitas benih hanya dapat dicapai melalui pengendalian menyeluruh dari proses produksi hingga distribusi. Di antara parameter kualitas benih, kemurnian genetik dan kesehatan benih sangat menentukan keaslian dan nilai tanam. Meskipun uji lapangan (*grow-out test*) masih digunakan untuk autentikasi varietas, kini tersedia teknik modern berbasis DNA untuk menguji kemurnian genetik dan kesehatan benih. Kemurnian genetik menunjukkan kesesuaian sampel dengan varietas yang diklaim serta kemurnian varietas atau hibrida F1 dalam suatu lot benih (Santhy et al., 2023).

Tabel 35. Deskripsi jenis-jenis penanda genetik (Giri, 2023)

Jenis Penanda	Deskripsi
Penanda Morfologi	Sifat yang tampak pada tanaman (bentuk, warna, tinggi, tipe pertumbuhan. Digunakan untuk Identifikasi varietas dasar dan Seleksi dalam pemuliaan Kelebihan : Mudah digunakan, Tidak memerlukan alat khusus, Banyak digunakan dalam program pemuliaan Kekurangan : Jumlah terbatas, Dipengaruhi oleh tahap pertumbuhan, Dipengaruhi lingkungan
Penanda Sitologi	Jumlah, ukuran, bentuk, pola pita, dan posisi kromosom Digunakan untuk Pemetaan kromosom, Identifikasi tingkat ploid, Diferensiasi spesies Kelebihan : Mengungkap perbedaan kromosom, Berguna untuk studi sitogenetika Kekurangan : Memerlukan waktu dan tenaga, Membutuhkan mikroskop & keterampilan sitologi, Resolusi terbatas untuk genotipe yang berkerabat dekat
Penanda Biokimia	Isoenzim – bentuk molekul berbeda dari enzim yang dikodekan oleh gen berbeda. Digunakan untuk Analisis keragaman genetic, Studi struktur populasi, Analisis aliran gen. Kelebihan : Pewarisan kodominan, Andal dan mudah digunakan, Berguna untuk studi keragaman genetic. Kekurangan : Jumlah isoenzim terbatas, Bisa mahal, Beberapa dipengaruhi jenis jaringan atau lingkungan.
Penanda Molekuler	Polimorfisme urutan DNA (perbedaan pada tingkat nukleotida). Digunakan untuk Pemetaan genetic, Identifikasi varietas, Pemuliaan berbantuan penanda, Deteksi mutase, Studi sejarah populasi & epidemiologi. Kelebihan : Informasi sangat tinggi (PIC tinggi), Tidak dipengaruhi lingkungan, Jumlah banyak tersedia, Dapat diotomatisasi. Kekurangan : Memerlukan fasilitas laboratorium & keahlian, Biaya bisa tinggi (tergantung teknik)

Dengan semakin banyaknya varietas baru dan menyempitnya plasma nutfah, karakterisasi dan identifikasi varietas menjadi sangat penting dalam pemuliaan, pemeliharaan varietas, produksi dan perdagangan benih, serta perlindungan petani dan konsumen (Smith & Register III, 1998). Identifikasi varietas menggunakan penanda genetik (morfologi, biokimia, atau molekuler) memudahkan penyusunan kunci identifikasi dan membedakan varietas secara jelas. Namun, meningkatnya jumlah varietas yang dibudidayakan setiap tahun membuat kebutuhan akan penanda genetik yang stabil dan andal semakin menantang (Santhy & Meshram 2015). Perbedaan utama setiap penanda disajikan pada Tabel 35.

Menurut Santhy *et al.* (2023), satu penanda andal cukup untuk menguji kemurnian hibrida, tetapi identifikasi dan pengujian kemurnian varietas memerlukan lebih banyak penanda dengan daya diskriminasi tinggi, terutama untuk pendaftaran *Essentially Derived Varieties* (EDV). Uji kemurnian varietas penting untuk menjamin mutu benih dan memenuhi regulasi pemasaran serta pertukaran internasional.

11.3.2 Penanda Molekuler

Penanda molekuler yang stabil dan andal digunakan untuk: 1) memastikan identitas genetik varietas atau galur tetua, 2) menguji kemurnian varietas unggul, galur inbrida, benih PRG/non-PRG, dan hibrida F1, serta 3) mendeteksi benih berdasarkan sifat spesifik seperti PRG. Dibandingkan penanda konvensional, penanda molekuler memiliki PIC tinggi, tidak dipengaruhi lingkungan, stabil, dapat digunakan pada semua tahap pertumbuhan, dan jumlahnya melimpah, sehingga efektif mengidentifikasi varietas dan mencocokkan profil alel dengan varietas referensi (Singh *et al.*, 2018). Penanda ideal harus seragam, tersebar merata di genom, co-dominan, multi-alel, membutuhkan sedikit DNA, mudah digunakan, minim kesalahan, dapat direproduksi, dan mendukung otomatisasi. SNP dianggap paling mendekati penanda ideal karena memenuhi sebagian besar kriteria tersebut (Jiang, 2013).

Seleksi berbantuan penanda (*Marker-Assisted Selection*/MAS) adalah teknik yang memanfaatkan penanda molekuler yang berdekatan dengan gen target untuk mengidentifikasi sifat tertentu pada keturunan hasil persilangan. Penanda umum yang digunakan dalam MAS adalah SSR dan SNP, sedangkan RFLP, RAPD, dan AFLP kini jarang digunakan. Keberhasilan MAS dipengaruhi kompleksitas sifat dan kedekatan penanda dengan gen target. MAS semakin populer karena meningkatkan efisiensi pemuliaan,

memungkinkan transfer gen lebih tepat, dan mempercepat perolehan tanaman dengan sifat unggul (De Mori & Cipriani, 2023).

Berbagai jenis penanda ini telah banyak dipelajari dan digunakan untuk identifikasi varietas, uji perbedaan (*distinctness*), dan penentuan hibriditas, sebagaimana dibandingkan dalam **tabel 7. Table 7** akan membandingkan penanda RFLP (*Restriction Fragment Length Polymorphism*), RAPD (*Random Amplified Polymorphic DNA*), CAPS (*Cleaved Amplified Polymorphic Sequence*), AFLP (*Amplified Fragment Length Polymorphism*), SCAR (*Sequence Characterized Amplified Regions*), SSR/Mikrosatelit (*Simple Sequence Repeats*), EST-SSR (*expressed Sequence Tag – SSR*), ISSR (*Inter-SSR markers*), SRAP (*Sequence-Related Amplified Polymorphism*) dan SNP (*Single Nucleotide Polymorphism*).

11.4 Deteksi Mutasi dan Kontaminasi Genetik

11.4.1 Mutasi dan Kontaminasi genetik

Menurut IRRI (2013), kemurnian genetik benih dinilai melalui atribut fisik, kimia, dan karakter tanaman. Secara fisik, benih murni diidentifikasi dari ciri morfologi, warna, dan aroma menggunakan pengukuran atau alat. Secara kimia, varietas dibedakan berdasarkan kandungan amilase, warna pencernaan alkali, konsistensi gel, dan kadar protein, meskipun karakter ini dapat dipengaruhi lingkungan.

Penurunan kemurnian genetik adalah berkurangnya nilai genetik atau agronomis tanaman secara permanen dan dapat terjadi sejak penyimpanan benih hingga setiap tahap pertumbuhan, mulai dari penaburan, panen, pengolahan, penyimpanan, hingga penanaman. Kualitas benih sangat dipengaruhi oleh kondisi fisik yang dialami tanaman induk, seperti suhu, nutrisi, dan faktor lingkungan lainnya selama pertumbuhan, yang berdampak pada perkembangan dan mutu benih (IRRI, 2013). Kemurnian genetik benih yang ditanam harus memenuhi atau melebihi standar produk akhir karena kemurnian cenderung menurun di setiap generasi perbanyakan (Bradford, 2006).

Penurunan kualitas geneti dapat terjadi karena :

1. Variasi Perkembangan. Terjadi saat varietas benih ditanam di luar wilayah adaptasinya selama beberapa generasi, sehingga benih menyesuaikan diri dengan kondisi lingkungan baru.
2. Campuran Mekanis. Penyebabnya bisa karena sisa benih musim sebelumnya, alat tanam yang dipakai untuk varietas berbeda, lahan berdekatan dengan varietas lain, rantai perontokan yang kotor, atau penyimpanan yang kurang baik.

3. Persilangan Alami. Terjadi pada tanaman yang diperbanyak secara seksual. Tingkat persilangan dipengaruhi oleh sistem penyerbukan tanaman, jarak isolasi, dan agen penyerbuk.
4. Genetic Drift. Terjadi saat hanya sedikit benih dari lahan luas yang disimpan untuk musim berikutnya, sehingga populasi generasi berikutnya tidak mewakili populasi awal secara penuh.
5. Pengaruh Penyakit. Ras baru hama dan penyakit dapat memicu adaptasi varietas, yang menyebabkan perubahan genetik dan menurunkan kemurnian.
6. Mutasi. Jarang terjadi, tetapi kondisi lapangan dan penyimpanan yang buruk dapat memicu kelainan kromosom atau mutasi (Padma & Sivasubramaniam, 2013).
7. Rekayasa genetika. Penanaman komersial PRG dapat menimbulkan masalah karena risiko kontaminasi tanaman non-GM dan organik.

Kemurnian benih dapat diketahui melalui analisa berikut:

1. Metode morfologi. Kemurnian genetik dapat dinilai pada benih, bibit, atau tanaman melalui pengamatan morfologi seperti bentuk tanaman, warna malai, ukuran, dan bentuk biji, namun hanya sedikit sifat diskriminatif yang dapat diidentifikasi langsung, dan sebagian besar dipengaruhi oleh faktor lingkungan (Smith & Register III, 1998) sehingga metode ini kurang efektif.
2. Metode petak kontrol. Metode petak kontrol digunakan untuk memantau identitas dan kemurnian varietas pada berbagai tahap perbanyakan benih. Pre-control dilakukan pada benih generasi awal (pra-dasar dan dasar) untuk mendeteksi masalah identitas atau kemurnian sejak dini, sehingga sangat penting dalam program sertifikasi. Post-control diterapkan pada benih bersertifikat yang tidak diperbanyak lagi untuk mengevaluasi efektivitas produksi benih dan menemukan perbaikan sistem produksi (OECD, 2019)
3. Metode Kimia. Pengujian kemurnian genetik dengan metode kimia menggunakan berbagai uji, seperti uji fenol, ferrous sulphate, uji fluoresensi, uji rendam 2,4-D, uji peroksidase, coper sulphate-ammonia, kalium hidroksida (KOH), gossypal, asam kalium (HCl), hidrogen peroksida (H_2O_2), natrium hidroksida (NaOH), uji kalium dikromat, larutan Lugol, asam klorida (HCl), dan DDT (Elias et al., 2012; Padma & Sivasubramaniam, 2013; Reddy, 2014).

4. Uji Toleransi Herbisida atau Serangga. Benih atau bibit kemudian dipaparkan pada herbisida atau serangga tertentu untuk mengamati respon toleransinya (Elias et al., 2012). Uji semacam ini digunakan untuk mengevaluasi kemurnian genetik dan mendeteksi kontaminasi transgenik pada tanaman seperti jagung bt.
5. Penanda Molekuler. Penanda molekuler mendeteksi variasi langsung pada tingkat DNA sehingga karakter dapat diidentifikasi pada semua tahap pertumbuhan dan di lokasi gen tertentu (Sendekie, 2020).
6. Biokimia dan Pencitraan. Elektroforesis protein dapat menentukan kemurnian genetik hibrida dan galur tetua. Kehadiran atau ketiadaan pita digunakan untuk membedakan galur dengan kemampuan pemulihan tertinggi dari yang terendah (Galal et al., 2017).

Tabel 36. Perbandingan jenis penanda molekuler

Jenis Penanda	Co-dominan/ Dominan	Reproduktibilitas	Tingkat Polimorfisme	Kualitas DNA yang dibutuhkan (ng)	Kualitas DNA yang dibutuhkan	Jumlah DNA yang dibutuhkan	Indeks Penanda	Kelimpahan dalam Genom	Biaya	Perlu Sekuen-sing	Status	Perlu PCR	Visualisasi
RFLP	Co-dominan	Tinggi	Sedang	Tinggi / ± 10.000	Tinggi	Tinggi	Rendah	Rendah	Tinggi	Ya	jarang digunakan	Tidak	Radioaktif (Southern blot)
RAPD	Dominan	Rendah-Sedang	Sangat Tinggi	Sedang / ± 20	Sedang	Rendah	Tinggi	Sangat Tinggi	Rendah	Tidak	jarang digunakan	Ya	Agarose gel
CAPS	Co-dominan	Tinggi	Tinggi	Tinggi / ± 50	Tinggi	Sedang	Tinggi	Tinggi	Sedang	Tidak	Masih digunakan	Ya	Agarose gel
AFLP	Dominan	Tinggi	Tinggi	Tinggi / ± 500-1000	Tinggi	Sedang	Tinggi	Sangat Tinggi	Tinggi	Tidak	jarang digunakan	Ya	Agarose gel
SCAR	Co-dominan	Tinggi	Tinggi	Tinggi / ± 50	Tinggi	Sedang	Tinggi	Tinggi	Sedang	Ya (untuk desain primer)	Masih digunakan	Ya	Agarose gel
SSR/ Mikrosatelit	Co-dominan	Tinggi	Tinggi	Tinggi / ± 50	Tinggi	Sedang	Tinggi	Sedang	Sedang	Ya (untuk desain primer)	Masih digunakan	Ya	Agarose gel / Kapiler elektroforesis

Tabel 37. Lanjutan Perbandingan jenis penanda molekuler

Jenis Penanda	Co-dominan/ Dominan	Reproduktibilitas	Tingkat Polimorfisme	Kualitas DNA yang Dibutuhkan (ng)	Kualitas DNA yang Dibutuhkan	Jumlah DNA yang Dibutuhkan	Indeks Penanda	Kelimpahan dalam Genom	Biaya	Perlu Sekuen sing	Status	Perlu PCR	Visualisasi
Multiplex PCR	Tergantung penanda yang digunakan (SSR/SCAR)	Tinggi	Tinggi	Tinggi / ± 50	Tinggi	Sedang	Tinggi	Sedang	Sedang	Tidak	Masih digunakan	Ya	Agarose gel / sistem kapiler
EST-SSR	Co-dominan	Tinggi	Tinggi	Tinggi / ± 50	Tinggi	Sedang	Tinggi	Tinggi	Sedang	Ya	Masih digunakan	Ya	Agarose gel
ISSR	Dominan	Sedang	Tinggi	Rendah-Sedang / ± 50	Rendah-Sedang	Sedang	Sedang	Tinggi	Rendah	Tidak	Masih digunakan	Ya	Agarose gel
SRAP	Dominan	Tinggi	Sangat Tinggi	Sedang / ± 50	Sedang	Sedang	Tinggi	Tinggi	Sedang	Tidak	Masih digunakan	Ya	Agarose gel
SNP	Co-dominan	Sangat Tinggi	Tinggi(per SNP), perlu jumlah besar	Tinggi / ± 50	Tinggi	Sedang	Sangat Tinggi	Sangat Tinggi	Variabel	Ya	makin banyak digunakan	Ya	SNP array / KASP / NGS

11.5 Bioinformatika dalam Teknologi Benih

Bioinformatika merupakan ilmu interdisipliner yang menafsirkan data biologis menggunakan teknologi informasi dan ilmu komputer. Bioinformatika terdiri dari dua subbidang yang saling melengkapi yaitu: 1) pengembangan alat komputasi dan basis data; dan 2) penerapan alat dan basis data tersebut untuk menghasilkan pengetahuan biologis guna memahami sistem kehidupan dengan lebih baik. Bioinformatika diperkenalkan oleh Paulien Hogeweg dan Ben Hesper pada tahun 1970 sebagai “studi tentang proses informatika dalam sistem biotik.” Paulien Hogeweg adalah seorang ahli biologi teoretis dan peneliti sistem kompleks asal Belanda yang mempelajari sistem biologis sebagai sistem pemrosesan informasi dinamis pada banyak tingkat yang saling terhubung (Kushwaha et al., 2017).

Bioinformatika berkembang sangat pesat setelah ditemukannya teknologi sekuensing DNA berkapasitas tinggi (high-throughput sequencing) dan meningkatnya ketersediaan data genomik dalam jumlah besar. Perkembangan ini mendorong lahirnya berbagai algoritma, perangkat lunak, dan basis data baru yang memungkinkan analisis genom, transkriptom, dan proteom dilakukan lebih cepat dan akurat. Dataset yang dihasilkan oleh peneliti tanaman umumnya mengandung informasi morfologis, fisiologis, molekuler, dan genetik yang menggambarkan seluruh siklus hidup tanaman. Bioinformatika memproses data yang dikumpulkan dan mengekstrak indeks kunci serta tren untuk secara cepat dan akurat menghasilkan hipotesis, kemudian menawarkan Solusi (Mu et al., 2022).

Dalam bidang pertanian, khususnya produksi tanaman unggul, bioinformatika mengintegrasikan biologi, ilmu komputer, dan analisis data untuk meningkatkan kualitas, produktivitas, dan ketahanan benih. Melalui analisis data genomik, transkriptomik, dan proteomik, gen-gen yang terkait dengan perkecambahan benih, vigor, toleransi terhadap stres, dan potensi hasil dapat diketahui. Informasi ini membantu pemulia tanaman memilih tetua unggul dan merancang strategi pemuliaan yang lebih terarah dan efisien. Di bidang teknologi benih, bioinformatika dapat menganalisis gen-gen yang terkait dengan perkecambahan benih, pertumbuhan bibit, dan hasil reproduksi, serta intervensi buatan pada gen-gen tersebut (Mascher et al., 2019). Gen-gen yang terkait dengan sifat tertentu dapat dianalisis terlebih dahulu secara komputersasi sebelum dilakukan rekayasa atau dimasukkan ke

dalam tanaman, dan hasilnya dapat digunakan untuk menentukan apa yang selanjutnya harus diperkenalkan ke dalam tanaman untuk analisis fenotipe yang presisi (Mu et al., 2022).

DAFTAR PUSTAKA

- Agha, H.M. *et al.* (2022) 'The Influence of Different Concentrations of Plant Hormones in Vitro on Seeds Germination of Fenugreek (*Trigonella Foenum-Graecum*)', *Journal of Asian Scientific Research*, 12(2), pp. 104–113. Available at: <https://doi.org/10.55493/5003.v12i2.4528>.
- Ahmad, S. *et al.* (2018) 'CRISPR/Cas9 for development of disease resistance in plants: Recent progress, limitations and future prospects', *Briefings in Functional Genomics*, 19(1), pp. 26–39. Available at: <https://doi.org/10.1093/bfpg/elz041>.
- Antony Ceasar, S. and Ignacimuthu, S. (2023) 'CRISPR/Cas genome editing in plants: Dawn of Agrobacterium transformation for recalcitrant and transgene-free plants for future crop breeding', *Plant Physiology and Biochemistry*, 196, pp. 724–730. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.02.030>.
- Aryal, D. *et al.* (2024) 'Dietary phenolic compounds as promising therapeutic agents for diabetes and its complications: A comprehensive review', *Food Science and Nutrition*, 12(5), pp. 3025–3045. Available at: <https://doi.org/10.1002/fsn3.3983>.
- Bhatla, S.C. and Lal, M.A. (2023) *Plant Physiology, Development and Metabolism, Second Edition*, *Plant Physiology, Development and Metabolism, Second Edition*. Available at: <https://doi.org/10.1007/978-981-99-5736-1>.
- Bradford, K.J. (2006) 'Methods to Maintain Genetic Purity of Seed Stocks', *Methods to Maintain Genetic Purity of Seed Stocks* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.3733/ucanr.8189>.
- Campbell, N.A. *et al.* (2008) 'Biology'. San Francisco: Pearson education.
- Eisa, E.A. *et al.* (2022) 'Chrysanthemum: A Comprehensive Review on Recent Developments on In Vitro Regeneration', *Biology*, 11(12), p. 1774. Available at: <https://doi.org/10.1007/s001530050044>.
- Elias, S. *et al.* (2012) 'Seed testing: Principles and practices', *Seed Testing: Principles and Practices*, pp. 1–354.
- Erenstein, O. *et al.* (2022) 'Global Trends in Wheat Production, Consumption and Trade BT - Wheat Improvement: Food Security in a Changing Climate', in M.P. Reynolds and H.-J. Braun (eds). Cham: Springer International Publishing, pp. 47–66. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-030-90673-3_4.
- Eriksson, H. (2022) 'Basic Principles of Plant Tissue Culture and its Applications', *Global Journal of Biochemistry and Biotechnology*, 10 (2), pp. 1–

2. Available at: <https://doi.org/10.15651/GJBB.22.10.039>.
- Escobar, M.A. *et al.* (2001) 'RNAi-mediated oncogene silencing confers resistance to crown gall tumorigenesis', *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98(23), pp. 13437–13442. Available at: <https://doi.org/10.1073/pnas.241276898>.
- Galal, O.A. *et al.* (2017) 'Assessment of genetic purity of some hybrid rice parental lines using protein profile and fertility restorer gene linked markers', (October 2014).
- Giri, N. (2023) 'A Review On Genetic Markers In Plant Identification', 9(2), pp. 58–70.
- Grace Sunday *et al.* (2024) 'Agrobacterium tumefaciens: Biology and application in genetic engineering', *GSC Advanced Research and Reviews*, 20(1), pp. 389–398. Available at: <https://doi.org/10.30574/gscarr.2024.20.1.0272>.
- Guerinot, M. (2000) 'The Green Revolution Strikes Gold', *Science*, 287, pp. 241–243. Available at: <https://doi.org/10.1126/science.287.5451.241>.
- Hundleby, P. and Harwood, W. (2022) 'Regulatory Constraints and Differences of Genome-Edited Crops Around the Globe BT - Genome Editing: Current Technology Advances and Applications for Crop Improvement', in S.H. Wani and G. Hensel (eds). Cham: Springer International Publishing, pp. 319–341. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-031-08072-2_17.
- Ishizaki, K. *et al.* (2008) 'Agrobacterium-Mediated Transformation of the Haploid Liverwort *Marchantia polymorpha* L., an Emerging Model for Plant Biology', *Plant and Cell Physiology*, 49(7), pp. 1084–1091. Available at: <https://doi.org/10.1093/pcp/pcn085>.
- Jiang, G.-L. (2013) 'Molecular Markers and Marker-Assisted Breeding in Plants', in S.B. Andersen (ed.). Rijeka: IntechOpen. Available at: <https://doi.org/10.5772/52583>.
- Jones, H.D., Doherty, A. and Sparks, C.A. (2009) 'Transient Transformation of Plants BT - Plant Genomics: Methods and Protocols', in J.P. Gustafson, P. Langridge, and D.J. Somers (eds). Totowa, NJ: Humana Press, pp. 131–152. Available at: https://doi.org/10.1007/978-1-59745-427-8_8.
- Kumar, N. and Reddy, M.P. (2011) 'In vitro Plant Propagation', *Journal of Forest Science*, 27(2), pp. 3–6. Available at: <https://koreascience.kr/article/JAKO201122350102027.page>.
- Kushwaha, U.K.S. *et al.* (2017) 'Role of Bioinformatics in Crop

- Improvement', *Biotech Today: An International Journal of Biological Sciences*, 17(1), p. Available at: <https://doi.org/10.5958/2322-0996.2018.00001.7>.
- Larson, A.J.S. *et al.* (2023) 'Slow Release of GA3 Hormone from Polymer Coating Overcomes Seed Dormancy and Improves Germination', *Plants*, 12(24). Available at: <https://doi.org/10.3390/plants12244139>.
- Mascher, M. *et al.* (2019) 'Genebank genomics bridges the gap between the conservation of crop diversity and plant breeding', *Nature Genetics*, 51(7), pp. 1076–1081. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41588-019-0443-6>.
- De Mori, G. and Cipriani, G. (2023) 'Marker-Assisted Selection in Breeding for Fruit Trait Improvement: A Review', *International Journal of Molecular Sciences*, 24(10). Available at: <https://doi.org/10.3390/ijms24108984>.
- Mu, H., Wang, B. and Yuan, F. (2022) 'Bioinformatics in Plant Breeding and Research on Disease Resistance', *Plants*, 11(22). Available at: <https://doi.org/10.3390/plants11223118>.
- Niazian, M. *et al.* (2017) 'Genetic stability of regenerated plants via indirect somatic embryogenesis and indirect shoot regeneration of *Carum copticum* L.', *Industrial Crops and Products*, 97, pp. 330–337. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.12.044>.
- Nisa, S.H.N.S.H. and Utami, W.F. (2023) 'Perbandingan Kinerja Reproduksi Tomat Transgenik Jenis Flavr savr Dengan Tomat Konvensional Varietas (*Solanum lycopersicum* L.)', *Jurnal Pertanian Pat Petulai*, 1(1), pp. 13–20. Available at: <https://journal.bengkuluinstitute.com/index.php/jpppp/article/view/519>.
- OECD (2019) 'Organization for Economic Cooperation and Development Seed Schemes Guidelines for Control Plot Tests', p. 35.
- Padma, J. and Sivasubramaniam, K. (2013) 'Identification of Chilli Genotypes through Chemical Tests', 100(June), pp. 318–319.
- Pasternak, T.P. and Steinmacher, D. (2024) 'Plant Growth Regulation in Cell and Tissue Culture In Vitro', *Plants*, 13(2), pp. 1–24. Available at: <https://doi.org/10.3390/plants13020327>.
- Ream, W. (2009) 'Genetically engineered plants: Greener than you think', *Microbial Biotechnology*, 2(4), pp. 401–405. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1751-7915.2009.00088.x>.
- Reddy, B.V. (2014) 'HYBRID AND VARIETAL GENETIC PURITY TESTING METHODS FOR CROP IMPROVEMENT'.

- Rivera, A.L. *et al.* (2012) 'Physical methods for genetic plant transformation', *Physics of Life Reviews*, 9(3), pp. 308–345. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.plrev.2012.06.002>.
- Santhy, V. *et al.* (2023) 'Molecular Techniques for Testing Genetic Purity and Seed Health', *Seed Science and Technology: Biology, Production, Quality*, pp. 365–389. Available at: https://doi.org/10.1007/978-981-19-5888-5_15.
- dos Santos, M.A.C. *et al.* (2020) 'In vitro growth performance of Psidium guajava and P. guineense plantlets as affected by culture medium formulations', *Vegetos*, 33(3), pp. 435–445. Available at: <https://doi.org/10.1007/s42535-020-00125-6>.
- Sendekie, Y. (2020) 'Review on; Seed Genetic Purity for Quality Seed Production', *International Journal of Scientific Engineering and Science*, 4(10), pp. 1–7. Available at: <http://ijses.com/>.
- Sharma, A.T. *et al.* (2024) 'Plant Tissue Culture: A Review', *HUMAN JOURNALS*, 30(5), pp. 595–612. Available at: <https://doi.org/10.1007/BF00057619>.
- Sharma, Sakshi *et al.* (2020) 'Plant Tissue Culture Methods in Secondary Metabolite Production-A Mini Review', *Plant Cell Biotechnology and Molecular Biology*, 21(44), pp. 144–153. Available at: https://www.researchgate.net/publication/344853645_PLANT_TISSUE_CULTURE_METHODS_IN_SECONDARY_METABOLITE_PRODUCTION_-A_MINI_REVIEW.
- Shruti, TRIPATHI, A. and SHUKLA, S. (2023) 'METHODS OF GENETIC TRANSFORMATION: MAJOR EMPHASIS TO CROP PLANTS', *Journal of microbiology, biotechnology and food sciences*, 13(4 SE-Biotechnology), p. e10276. Available at: <https://doi.org/10.55251/jmbfs.10276>.
- Singh, P. *et al.* (2018) 'Silencing of quinolinic acid phosphoribosyl transferase (QPT) gene for enhanced production of scopolamine in hairy root culture of Duboisia leichhardtii', *Scientific Reports*, 8(1). Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-32396-0>.
- Smith, J.S.C. and Register III, J.C. (1998) 'Genetic purity and testing technologies for seed quality: a company perspective', *Seed Science Research*. 2008/09/19, 8(2), pp. 285–294. Available at: <https://doi.org/DOI: 10.1017/S0960258500004189>.
- Sood, P., Bhattacharya, A. and Sood, A. (2011) 'Problems and possibilities of monocot transformation', *Biologia plantarum*, 55(1), pp. 1–15. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10535-011-0001-2>.
- Walther, M. *et al.* (2022) 'Absciscic acid induces somatic embryogenesis and enables the capture of high-value genotypes in Douglas fir (*Pseudotsuga*

- menziesii [MIRB.] Franco)', *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 148(1), pp. 45–59. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11240-021-02159-3>.
- Wei, L. *et al.* (2024) 'Roles of Nitric Oxide and Brassinosteroid in Improving Fruit Quality during Postharvest: Potential Regulators?', *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 72(43), pp. 23671–23688. Available at: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c05680>.
- Ye, X. *et al.* (2000) 'Engineering the Provitamin A (β -Carotene) Biosynthetic Pathway into (Carotenoid-Free) Rice Endosperm', *Science*, 287(5451), pp. 303–305. Available at: <https://doi.org/10.1126/science.287.5451.303>.
- Yeole, M.P. *et al.* (2016) 'Plant tissue culture techniques: a review for future view', *Critical Review in Pharmaceutical Sciences*, 5, pp. 16–24.
- Zarei, S. and Ehsanpour, A.A. (2023) 'Ethylene inhibition with silver nitrate (AgNO_3) and pyrazinamide (PZA) ameliorates in vitro salt tolerance of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) plantlets', *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 154(2), pp. 239–247. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11240-023-02511-9>.

BAB 12

TEKNOLOGI MEKANISASI DALAM PRODUKSI BENIH

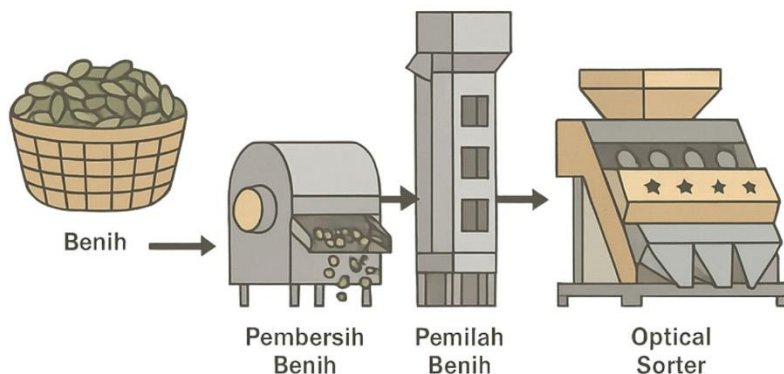
Oleh: Bahrul Rizki Ramadhan

Produksi benih merupakan salah satu pilar utama dalam pembangunan sektor pertanian modern. Benih yang bermutu tinggi tidak hanya menentukan potensi hasil, tetapi juga memengaruhi efisiensi pemanfaatan pupuk, air, dan input lain. Namun, tantangan utama yang dihadapi produsen benih adalah bagaimana menghasilkan benih dalam jumlah besar dengan kualitas yang konsisten, sementara tenaga kerja pertanian semakin berkurang dan biaya produksi terus meningkat. Dalam konteks ini, penerapan dari teknologi mekanisasi pertanian bisa menjadi instrumen strategis dalam menjawab segala kebutuhan peningkatan kapasitas sekaligus menjamin mutu benih. Mekanisasi dalam produksi benih mencakup penerapan mesin dan peralatan mulai dari tahap penanaman, pemeliharaan, panen, hingga pascapanen. Misalnya, mesin tanam presisi digunakan untuk memastikan distribusi benih yang merata sesuai populasi optimal, sedangkan mesin panen modern dapat mengurangi kehilangan hasil akibat rontok atau kerusakan mekanis. Hal ini bisa memberikan keuntungan ekonomi sekaligus menjaga efisiensi sumber daya.

Di Indonesia, kebutuhan mekanisasi semakin mendesak karena jumlah tenaga kerja pertanian cenderung menurun setiap tahun. Data Badan Pusat Statistik (BPS, 2022) menunjukkan bahwa persentase tenaga kerja pertanian menurun dari 31,8% pada 2015 menjadi 28,3% pada 2021. Penurunan ini menimbulkan kesenjangan tenaga kerja, terutama saat musim tanam dan panen. Dengan adopsi mekanisasi, produsen benih dapat mengurangi ketergantungan pada tenaga kerja manual dan mempercepat siklus produksi. Mekanisasi tidak hanya meningkatkan kecepatan kerja, tetapi juga berkontribusi pada mutu benih. Proses sortasi menggunakan mesin berbasis optik dan sensor dapat memisahkan benih sehat dari yang rusak, sehingga kualitas lebih seragam. Dengan demikian, mekanisasi mendukung pemenuhan standar mutu benih baik nasional (SNI) maupun internasional (ISTA). Penggunaan mekanisasi juga selaras dengan konsep pertanian presisi yang menekankan efisiensi input dan peningkatan produktivitas. Melalui sensor dan *Internet of Things* (IoT), kondisi lingkungan tumbuh, kelembapan tanah, serta status fisiologis dari tanaman budidaya dapat dipantau secara real-time.

Teknologi ini penting dalam produksi benih karena kualitas sangat dipengaruhi oleh kondisi tumbuh tanaman induk.

Selain aspek teknis, mekanisasi produksi benih juga memiliki dimensi keberlanjutan. Mesin hemat energi, sistem otomatisasi, dan teknologi digital mampu mengurangi jejak karbon serta penggunaan input yang berlebihan. Penerapan mekanisasi ramah lingkungan mendukung pencapaian tujuan dalam pembangunan Berkelanjutan (SDGs) terutama pada aspek ketahanan pangan pada (SDG 2) dan inovasi teknologi pada (SDG 9). FAO (2020), juga menegaskan bahwa mekanisasi yang berintegrasi dengan prinsip keberlanjutan dapat meningkatkan efisiensi sekaligus menjaga kelestarian lingkungan. Dari perspektif ekonomi, mekanisasi memberikan dampak signifikan terhadap biaya produksi benih. Di sisi lain, teknologi otomatisasi pengemasan dan *labeling* benih menekan biaya tenaga kerja sekaligus meningkatkan konsistensi mutu kemasan. Hal ini sangat penting dalam persaingan pasar benih global yang menuntut efisiensi yang tinggi.



Gambar 47. Skema Peralatan untuk Pengolahan dan Sortasi Benih

Transformasi digital juga mendorong lahirnya industri benih 4.0, di mana proses produksi benih tidak hanya berbasis mekanisasi, tetapi juga berinterintegrasi dengan *big data*, kecerdasan buatan (AI), dan blockchain. Teknologi ini memungkinkan pelacakan benih dari produksi hingga distribusi, sehingga meningkatkan transparansi dalam rantai pasok. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisasi tidak hanya sebatas penggunaan mesin, tetapi juga bagian dari ekosistem digital pertanian modern. Meski demikian, adopsi mekanisasi dalam produksi benih di negara berkembang, termasuk Indonesia, masih menghadapi tantangan. Hambatan utama lainnya adalah biaya investasi mesin

yang relatif tinggi, keterbatasan keterampilan operator, serta kurangnya dukungan infrastruktur. Oleh karena itu, perlu adanya kebijakan pemerintah yang men-dorong insentif pembiayaan, penyediaan layanan mekanisasi bersama (*custom hiring services*), serta pelatihan teknis bagi produsen benih. Kolaborasi antara pemerintah, lembaga penelitian, dan sektor swasta menjadi kunci dalam mempercepat adopsi mekanisasi secara luas.

Secara keseluruhan, mekanisasi dalam produksi benih merupakan langkah strategis untuk menjawab tantangan pertanian modern, seperti efisiensi; mutu; keberlanjutan dan daya saing global. Bab ini akan membahas secara rinci bagaimana mekanisasi diterapkan dalam berbagai tahap produksi benih yang meliputi:

- (1) penanaman dan panen benih,
- (2) peralatan pengolahan dan sortasi benih,
- (3) otomatisasi pengemasan dan *labeling*,
- (4) pemanfaatan sensor dan IoT untuk *monitoring*, serta
- (5) peningkatan efisiensi produksi dengan teknologi modern.

Setiap pembahasan akan didukung oleh beberapa hasil penelitian terkini baik nasional maupun internasional, sehingga memberikan gambaran yang komprehensif tentang peran mekanisasi dalam industri benih masa kini dan masa depan.

12.1 Mekanisasi dalam Penanaman dan Panen Benih

Tahap penanaman merupakan salah satu fase paling krusial dalam produksi benih, karena menentukan distribusi populasi tanaman, ke-seragaman pertumbuhan, serta penentu kualitas hasil benih yang diperoleh. Pada sistem manual, penanaman sering menghadapi permasalahan seperti kedalaman benih tidak seragam, jarak tanam tidak konsisten, serta boros dalam penggunaan benih. Penerapan alat tanam presisi (*precision seeder*) bisa menjadi salah satu solusi untuk mengatasi permasalahan tersebut. Dengan sistem mekanisasi, benih dapat ditempatkan pada kedalaman optimal dan jarak tanam seragam, sehingga menghasilkan pertumbuhan tanaman yang lebih homogen. Penanaman benih dengan mekanisasi tidak hanya meningkatkan efisiensi, tetapi juga berdampak positif terhadap produktivitas. Mesin penanam modern dilengkapi dengan sistem vakum, pneumatik, atau mekanisme elektronik yang memungkinkan distribusi benih lebih akurat. Penelitian yang dilakukan oleh Chen et al. (2021), menunjukkan bahwa alat tanam berbasis pneumatik dapat menurunkan tingkat kesalahan distribusi benih hingga 12% jika dibandingkan dengan metode manual. Akurasi ini

sangat penting dalam produksi benih bersertifikat karena ketidakteraturan distribusi dapat memengaruhi tingkat kemurnian dan viabilitas dari benih. Di Indonesia, penggunaan *rice transplanter* untuk penanaman padi benih sudah mulai meluas, terutama pada sentra-sentra produksi tanaman pertanian. Penggunaan mesin ini dapat mempercepat waktu tanam mencapai 40% jika dibandingkan dengan cara manual (Sujatmiko et al., 2021). Pada komoditas jagung dan kedelai, penggunaan mesin tanam barisan (*row planter*) juga semakin diperkenalkan untuk memperbaiki keseragaman populasi tanaman budidaya. Hal ini membuktikan bahwa mekanisasi penanaman mampu menjawab kebutuhan produsen benih akan efisiensi baik dari segi waktu dan juga biaya.

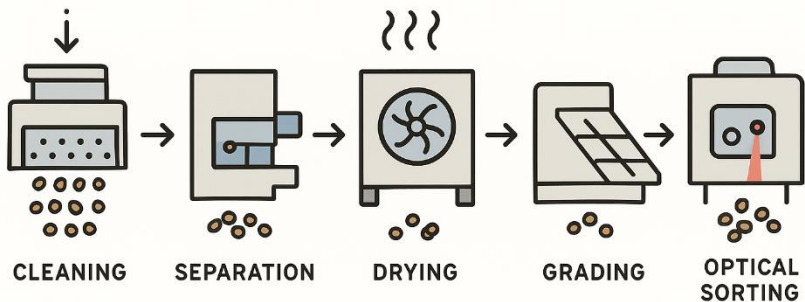
Selain penanaman, mekanisasi juga berperan sangat penting dalam tahap panen benih. Panen manual sering menyebabkan kerusakan fisik pada benih, kehilangan hasil akibat adanya rontok, serta rendahnya efisiensi tenaga kerja. Kehilangan hasil pada panen manual bisa mencapai 20 hingga 30%, terutama pada tanaman serealia (FAO, 2020). Dengan penggunaan *combine harvester* atau mesin panen khusus, tingkat kehilangan dapat ditekan hingga di bawah 10%. Selain itu, penelitian oleh Setyawan et al. (2020), menunjukkan bahwa panen padi benih menggunakan *combine harvester* bisa menghasilkan kehilangan hanya 7,5%, jauh lebih rendah jika dibandingkan dengan panen secara manual (21%). Keunggulan lain panen mekanis adalah kualitas benih yang lebih terjaga. Mesin panen modern dilengkapi sistem pengaturan kecepatan potong, aliran udara, dan pemisahan biji sehingga meminimalkan kerusakan mekanis pada benih. Hal ini penting karena benih yang retak atau tergores dapat mengalami penurunan viabilitas dan daya simpan karena dapat menurunkan daya berkecambah dari tanaman budidaya. Oleh karena itu, pemilihan mesin panen yang tepat menjadi faktor kunci dalam menjaga mutu benih. Mekanisasi panen juga mendukung efisiensi waktu dan biaya operasional. Dengan kapasitas kerja yang besar, mesin panen mampu menyelesaikan pemanenan lahan dalam waktu jauh lebih singkat dibandingkan panen manual. Sebagai contoh, satu unit *combine harvester* dapat memanen padi seluas 1 hektar hanya dalam waktu 3 hingga 4 jam, sementara tenaga kerja manual membutuhkan lebih dari satu hari (BPS, 2022). Efisiensi ini tidak hanya mengurangi beban tenaga kerja dalam kegiatan pertanian, tetapi juga mengurangi risiko akan kehilangan hasil akibat terjadi keterlambatan panen, terutama pada musim hujan.

Penerapan mekanisasi penanaman dan panen benih juga perlu didukung dengan pemahaman teknis dan pelatihan operator. Mesin-mesin modern ini memerlukan keterampilan dalam pengaturan, kalibrasi, serta perawatan agar dapat berfungsi secara optimal. Tanpa keterampilan yang memadai, risiko

kerusakan benih bisa saja tetap tinggi meskipun sudah menggunakan alat mekanis. Oleh karena itu, program pelatihan untuk produsen benih dan atau penyedia jasa mekanisasi menjadi bagian penting dari strategi adopsi teknologi ini.. Dengan demikian, mekanisasi dalam penanaman dan panen benih tidak hanya meningkatkan efisiensi dan produktivitas, tetapi juga menjamin mutu benih yang dihasilkan. Ke depan, pengembangan alat tanam presisi berbasis digital dan mesin panen berteknologi sensor diperkirakan akan semakin meluas. Integrasi mekanisasi dengan *Internet of Things* (IoT) memungkinkan sistem pemantauan real-time terhadap kinerja mesin, sehingga meningkatkan efisiensi energi dan menjaga keberlanjutan produksi benih. Oleh sebab itu, mekanisasi dalam dua tahapan awal dan akhir siklus produksi benih ini dapat dianggap sebagai tulang punggung keberhasilan industri benih modern.

12.2 Peralatan untuk Pengolahan dan Sortasi Benih

Setelah proses panen, benih harus melalui tahapan pengolahan dan sortasi agar diperoleh mutu sesuai standar sertifikasi. Proses ini mencakup pembersihan, pemisahan, pengeringan, *grading*, hingga sortasi berdasarkan ukuran dan kualitas fisiologis. Tanpa peralatan modern, proses pengolahan benih berpotensi menghasilkan benih yang tercampur dengan kotoran, biji gulma, maupun fraksi yang tidak seragam. Menurut Basra et al. (2020), mutu benih yang buruk dapat menurunkan viabilitas lebih dari 20% selama penyimpanan, sehingga teknologi pengolahan sangat menentukan daya simpan dan daya kecambah dari benih.



Gambar 48. Alat-alat untuk Sortasi Benih

a. Pembersihan (*Cleaning*)

Tujuan : Menghilangkan kotoran, jerami, tanah, batu kecil, biji gulma, serta benih pecah yang bercampur

- setelah panen. Selain itu, dapat meningkatkan kemurnian fisik benih, memudahkan proses lanjutan dan mengurangi kontaminasi organisme patogen.
- Alat : *Seed cleaner* menggunakan kombinasi ayakan (*sieve*) dan aliran udara.
- Contoh : Pada benih padi, pembersihan dapat meningkatkan tingkat kemurnian dari 85% menjadi >95% dalam satu kali proses (Adegbite et al., 2020).
- b. Pemisahan (*Separation*)
- Tujuan : Memisahkan benih sehat dan bermutu dari benih ringan, hampa, atau rusak. Selain itu, agar dapat menghasilkan fraksi benih dengan viabilitas lebih tinggi, yang sangat penting untuk benih sertifikasi.
- Alat : *Gravity separator* atau *specific gravity table*. Prinsip kerjanya berdasarkan perbedaan berat jenis; benih sehat lebih berat sehingga terkumpul pada bagian tertentu.
- Contoh : Penggunaan *gravity separator* terbukti efektif pada komoditas jagung dan kedelai. Hasil penelitian Singh et al. (2021), menunjukkan bahwa gravity separator dapat meningkatkan persentase benih bermutu hingga 92%, dibandingkan hanya 75% jika menggunakan metode sortasi manual.
- c. Pengeringan (*Drying*)
- Tujuan : Menurunkan kadar air benih hingga berada pada kisaran aman (8 hingga 12%) sebelum penyimpanan agar dapat menjaga suhu optimal, menghindari kerusakan fisiologis, dan mengurangi risiko kontaminasi.
- Alat : Mesin *seed dryer*. Prinsip kerjanya dengan mengalirkan udara panas atau dehumidifikasi yang terkontrol.
- Contoh : Penelitian oleh Nugroho et al. (2020), menyebutkan bahwa pengeringan jagung dengan *seed dryer* menjaga viabilitas hingga 95% setelah 6 bulan penyimpanan, sedangkan penjemuran hanya 80%.

d. Grading (Pengelompokan Ukuran)

- Tujuan : Mengelompokkan benih berdasarkan ukuran (besar, sedang, kecil). Menjamin keseragaman perkecambahan di lapangan.
Benih berukuran seragam → vigor awal seragam
→ populasi tanaman lebih homogen.
- Alat : *Sieve grader* atau *rotary screen cleaner*.
Prinsip kerjanya biasanya menggunakan ayakan bertingkat (*sieve grader*) yang dapat memisahkan fraksi benih besar, sedang, dan kecil.
- Contoh : Grading benih kedelai meningkatkan keseragaman perkecambahan hingga 15% (Rahardjo et al., 2022).

e. Sortasi Berdasarkan Ukuran dan Kualitas Fisiologis (*Sorting*)

- Tujuan : Menyaring benih berdasarkan karakter visual dan fisiologis secara seragam dapat mengurangi risiko benih non-viabel masuk dalam batch sertifikasi.
- Alat : *Optical sorter*
Prinsip kerjanya menggunakan kamera resolusi tinggi & sensor warna mendeteksi bentuk, warna, dan cacat. Selain itu, di dalam teknologi terbaru seperti Sensor & AI yang mampu mendeteksi tekstur dan pola kerusakan yang tidak kasat mata.
- Contoh : *Optical sorter* memungkinkan pemisahan benih murni dari kontaminan dengan tingkat akurasi di atas 95% (Zhang et al., 2021). Alat ini banyak digunakan dalam industri benih hortikultura seperti tomat, cabai dan sayuran daun, yang memerlukan benih standar visual yang seragam.

Dalam skala industri, pengolahan benih modern dilakukan secara terintegrasi dengan lini produksi yang terdiri dari *seed cleaner*, *gravity separator*, *seed dryer*, *optical sorter*, hingga mesin pengemasan otomatis. Integrasi ini tidak hanya meningkatkan efisiensi waktu, tetapi juga menjamin akan konsistensi mutu. Menurut Kumar et al. (2022), penggunaan lini pengolahan benih otomatis dapat mengurangi kebutuhan tenaga kerja hingga 40% dan meningkatkan output produksi sebesar 25% per musim tanam. Ke depannya, pemanfaatan sensor pintar dan kecerdasan buatan (AI) dalam sortasi benih akan semakin berkembang. *Optical sorter* generasi terbaru dilengkapi sistem pembelajaran

mesin (*machine learning*) yang mampu mengenali benih cacat tidak hanya dari warna atau bentuk, tetapi juga dari tekstur permukaan. Hal ini diperkirakan akan meningkatkan efisiensi sortasi hingga 98% (Chen et al., 2022). Dengan demikian, mekanisasi pengolahan dan sortasi benih merupakan pilar penting dalam menjamin kualitas benih modern yang berdaya saing global.

12.3 Otomatisasi dalam Pengemasan dan Labeling

Pengemasan dan penyimpanan benih merupakan tahapan krusial dalam rantai produksi benih karena keduanya berperan langsung dalam menjamin mutu, viabilitas, serta keaslian benih hingga sampai ke tangan pengguna. Penyimpanan dilakukan untuk mempertahankan daya hidup benih agar tetap tinggi selama periode simpan, sehingga saat digunakan untuk penanaman, benih masih memiliki kemampuan berkecambah yang mendekati kondisi awal sebelum disimpan. Faktor-faktor yang memengaruhi daya simpan meliputi jenis benih, metode yang digunakan, serta kondisi tempat penyimpanan. Berdasarkan sifat fisiologisnya, benih dapat dibedakan menjadi rekalsitran yang tidak tahan penyimpanan jangka panjang dan ortodoks yang relatif lebih tahan lama, serta diklasifikasikan sebagai mikrobiotik, mesobiotik, maupun makrobiotik sesuai kemampuan simpanannya, dengan kategori penyimpanan jangka pendek, menengah, hingga panjang.



Gambar 49. Penyimpanan Benih dalam Botol

Selain penyimpanan, tahap pengemasan juga memiliki peran vital dalam menjaga mutu dan integritas benih. Pada sistem konvensional, pengemasan biasanya dilakukan secara manual dengan tenaga kerja, namun cara ini sering menimbulkan permasalahan, seperti ketidakkonsistenan berat kemasan, segel yang kurang rapat, hingga risiko adanya pencampuran antar benih yang dapat menurunkan dari kualitas benih. Seiring dengan perkembangan teknologi, kini telah banyak digunakan sistem otomatisasi pengemasan yang mampu mengukur, menakar, sekaligus menyegel benih dengan tingkat akurasi yang sangat tinggi. Menurut temuan Kumar et al. (2021), penggunaan teknologi mesin pengemasan otomatis dapat menekan penyimpangan berat kemasan hingga kurang dari 1%, jauh lebih rendah dibandingkan metode manual yang masih mencapai 5 hingga 7%.

Dengan adanya integrasi antara penyimpanan yang tepat dan pengemasan yang efektif, benih tidak hanya terlindungi dari kerusakan fisik dan kehilangan viabilitas, tetapi juga terjamin keaslian serta kualitasnya saat sampai ke pengguna akhir. Kombinasi keduanya menjadi faktor yang cukup penting dalam mendukung keberhasilan program perbenihan, baik untuk kebutuhan produksi skala kecil, menengah, maupun industri besar, serta berkontribusi dalam menjaga ketersediaan benih bermutu bagi keberlanjutan sistem pertanian.



Gambar 50. Sistem Pengemasan Otomatis HP-450VR

Peralatan otomatisasi pengemasan umumnya terdiri dari timbangan digital berintegrasi, mesin pengisi (*filling machine*), penyegel (*sealing machine*) dan printer label. Seluruh komponen bekerja secara berurutan dalam satu lini

produksi, sehingga efisiensi meningkat tajam. Misalnya, dalam satu jam, mesin pengemasan otomatis dapat mengisi dan menyegel 800 hingga 1000 kemasan, sedangkan secara manual hanya 200 hingga 300 kemasan. Penelitian yang pernah dilakukan oleh Rahman et al. (2020), menunjukkan bahwa adopsi mesin pengemasan meningkatkan kapasitas produksi benih hingga 3 kali lipat tanpa menambah jumlah akan tenaga kerja. Otomatisasi juga mendukung penerapan kemasan cerdas (*smart packaging*). Smart packaging menggunakan bahan atau sensor khusus untuk memantau kondisi internal kemasan, seperti kelembapan, suhu, atau keberadaan oksigen. Hal ini penting karena benih sangat sensitif terhadap perubahan lingkungan. Menurut penelitian Zhang et al. (2022), pengemasan benih padi dengan lapisan *nano-coating* mampu mempertahankan viabilitas hingga 90% setelah penyimpanan 12 bulan, dibanding hanya 75% pada kemasan konvensional. Hal ini dikarenakan dalam penggunaan lapisan nano pada benih berfungsi untuk menjaga kualitas dan daya simpannya melalui berbagai mekanisme, seperti mencegah masuknya kelembapan yang memperlambat terjadinya kemunduran kualitas benih, melindungi dari patogen dengan partikel antimikroba, serta meningkatkan ketahanan terhadap stres abiotik seperti kekeringan dan salinitas melalui aktivasi enzim pertahanan. Selain itu, pada perlakuan pemberian lapisan ini juga mampu menyediakan nutrisi secara terkontrol guna mendukung perkembangan, mengurangi limbah kemasan dengan material yang lebih tipis dan ramah lingkungan, serta melindungi benih dari serangan hama melalui penggunaan bahan alami dalam bentuk nano.

Pada tahap *labeling*, otomatisasi memungkinkan pencetakan label yang konsisten, akurat, dan sesuai dengan standar sertifikasi benih nasional maupun internasional. Label benih biasanya memuat beberapa informasi yang penting, seperti varietas, tanggal produksi, tingkat kemurnian, viabilitas, serta nomor sertifikat. Penggunaan printer otomatis dengan sistem *barcode* atau *QR code* memastikan setiap kemasan dapat ditelusuri secara cepat. Penelitian yang dilakukan oleh Singh et al. (2021), menegaskan bahwa sistem labeling digital akan meningkatkan transparansi rantai pasok benih hingga 40% dibandingkan metode manual. Selain *barcode*, teknologi labeling terbaru memanfaatkan *QR code* berintegrasi dengan database online. Dengan memindai kode ini, petani dapat langsung mengakses segala informasi terkait asal-usul benih, hasil uji laboratorium, serta panduan budidaya. Hal ini meningkatkan kepercayaan para petani terhadap produsen benih, sekaligus menekan risiko pemalsuan. Menurut Choudhary et al. (2020), penerapan *QR code* pada kemasan benih di India mampu mengurangi peredaran benih palsu hingga 30% dalam dua

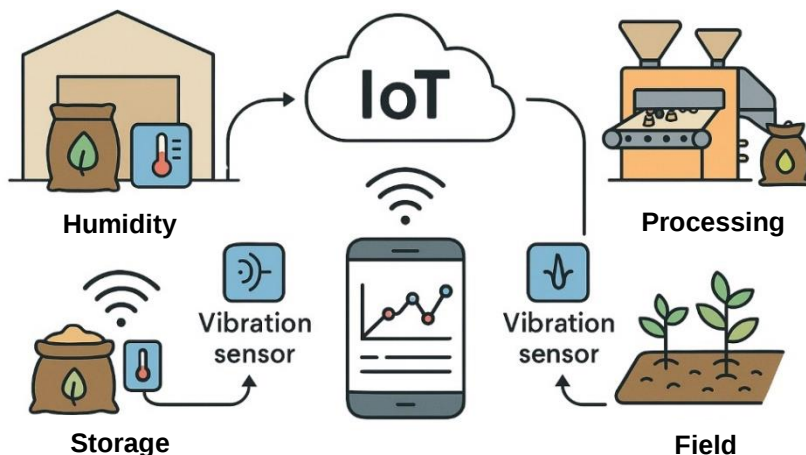
musim tanam. Lebih lanjut, otomatisasi pengemasan dan labeling dapat diintegrasikan dengan *blockchain technology* untuk mencatat seluruh perjalanan benih dari produsen hingga pengguna. Blockchain memberikan keamanan data yang tidak dapat diubah (*tamper-proof*), sehingga riwayat benih dapat diverifikasi kapan saja. Penelitian yang pernah dilakukan oleh Chen et al. (2021), menunjukkan bahwa *blockchain* dalam rantai pasok benih mampu meningkatkan transparansi, mengurangi sengketa perdagangan, dan memperkuat sistem sertifikasi digital.

Tantangan dalam penerapan otomatisasi adalah tingginya investasi awal dan kebutuhan pelatihan teknis operator. Mesin pengemasan otomatis membutuhkan biaya yang relatif tinggi, terutama untuk produsen benih berskala kecil. Namun, dengan skema seperti mekanisasi bersama (*custom hiring service*), investasi dapat ditanggung bersama oleh kelompok produsen atau koperasi benih. Hal ini sejalan dengan strategi pemerintah di banyak negara berkembang yang mendorong penggunaan peralatan modern secara kolektif (FAO, 2020). Dengan demikian, otomatisasi dalam pengemasan dan labeling tidak hanya sekadar efisiensi teknis, tetapi juga bagian dari sistem penjaminan mutu dan keamanan rantai pasok benih. Integrasi teknologi digital seperti *QR code*, IoT, dan *blockchain* membuka peluang besar bagi industri perbenihan untuk bersaing di pasar global. Ke depan, pengembangan teknologi *smart packaging* berbasis sensor dan sistem labeling digital akan semakin penting untuk memastikan benih yang dipasarkan memiliki kualitas terjamin, mudah ditelusuri, dan aman bagi petani maupun konsumen.

12.4 Pemanfaatan Sensor dan IoT Untuk *Monitoring*

Perkembangan teknologi digital dalam pertanian telah membawa perubahan signifikan dalam produksi benih, salah satunya melalui penerapan sensor dan *Internet of Things* (IoT). Sensor memungkinkan pengukuran seperti parameter lingkungan dan fisiologis secara real-time, sedangkan IoT memungkinkan data tersebut terhubung dan dianalisis melalui jaringan internet. Kombinasi keduanya dapat meningkatkan akurasi *monitoring* pada tahap penyimpanan, pengolahan, dan distribusi benih. Pada tahap penyimpanan, sensor kelembapan dan suhu digunakan untuk memantau kondisi gudang benih. Kadar air yang terlalu tinggi dan suhu yang tidak stabil dapat mempercepat penurunan viabilitas benih. Dengan sistem IoT, data kelembapan serta suhu udara dapat diakses secara *daring* dan memberikan peringatan otomatis jika melebihi ambang batas. Penelitian yang pernah dilakukan oleh Putra et al. (2021), menunjukkan bahwa pemantauan gudang

benih jagung berbasis IoT mampu menjaga viabilitas >90% selama 9 bulan penyimpanan. Selain kelembapan dan suhu, sensor gas juga mulai digunakan untuk mendeteksi peningkatan CO₂ sebagai indikator respirasi pada benih. Respirasi yang tinggi menunjukkan benih mengalami degradasi fisiologis. Menurut Chen et al. (2022), sistem sensor CO₂ berintegrasi IoT mampu mendeteksi penurunan vigor benih padi lebih cepat dibandingkan metode konvensional, sehingga langkah koreksi (seperti pengeringan ulang dan atau pendinginan) dapat bisa segera dilakukan.



Gambar 51. Pemanfaatan Sensor dan IoT dalam *Monitoring*

Dalam tahap pengolahan, sensor getaran dan kamera digital digunakan untuk memantau kinerja mesin sortasi dan grading benih. Data dari sensor dapat membantu mendeteksi kerusakan mekanis pada mesin sebelum menimbulkan kerusakan besar. Hal ini mendukung konsep *predictive maintenance*, yaitu perawatan berbasis data prediksi, bukan hanya perawatan rutin. Studi oleh Gupta et al. (2021), menunjukkan bahwa *predictive maintenance* berbasis IoT dapat mengurangi *downtime* mesin pengolahan benih hingga 30%. Selain itu, IoT juga berperan penting dalam *traceability* rantai pasok benih. Dengan menanamkan sensor RFID atau QR code berbasis IoT pada kemasan, pergerakan benih dari gudang hingga distribusi dapat dilacak secara real-time. Teknologi ini menjamin keamanan benih dan mengurangi risiko pemalsuan. Dalam konteks *smart farming*, sensor IoT juga diterapkan di lahan produksi benih untuk memantau kondisi pertumbuhan tanaman induk. Sensor tanah, kelembapan, cahaya, dan suhu udara dapat membantu petani

produsen benih menjaga lingkungan optimal bagi tanaman sumber. Pada penelitian Nugraha et al. (2022), disampaikan bahwa pada produksi benih kedelai menunjukkan bahwa penggunaan sensor IoT untuk irigasi presisi mampu meningkatkan hasil benih bermutu sebesar 18% jika dibandingkan dengan praktik irigasi manual.

Tantangan utama dari penerapan IoT adalah keterbatasan infrastruktur jaringan internet di wilayah pedesaan, serta biaya investasi awal perangkat sensor. Namun, perkembangan *Low Power Wide Area Network* (LPWAN) seperti LoRaWAN bisa memungkinkan penggunaan IoT dengan konsumsi energi yang cukup rendah dan jangkauan yang sangat luas atau optimum, sehingga cocok untuk pertanian skala besar maupun kecil. Hal ini sejalan dengan temuan dari Kim et al. (2021), yang menyebutkan bahwa sistem LoRaWAN mampu menghemat energi sensor hingga 40% dibandingkan jaringan konvensional. Secara keseluruhan, pemanfaatan sensor dan IoT membuka peluang besar dalam meningkatkan efisiensi, mutu, dan keamanan produksi benih. Teknologi ini memungkinkan *monitoring* yang lebih cepat, akurat, dan berintegrasi dari tahap produksi hingga distribusi. Ke depan, integrasi IoT dengan kolaborasi kecerdasan buatan (AI) akan semakin memperkuat sistem pengambilan keputusan otomatis, sehingga dalam proses produksi benih dapat lebih adaptif terhadap perubahan lingkungan dan kebutuhan pasar.

12.5 Efisiensi Produksi dengan Teknologi Modern

Efisiensi produksi benih pada dasarnya mencakup upaya untuk memaksimalkan output dengan sumber daya yang terbatas, baik berupa tenaga kerja, energi, waktu, maupun biaya operasional. Konsep ini semakin penting karena industri benih menghadapi tuntutan pasar yang besar, terutama untuk varietas unggul yang berkualitas tinggi. Teknologi modern hadir sebagai jawaban terhadap tantangan tersebut dengan menawarkan pendekatan yang lebih terukur, presisi, dan adaptif terhadap perubahan kondisi. Sehingga memberikan nilai tambah secara nyata dalam aspek ekonomi dan keberlanjutan. Salah satu pilar utama peningkatan efisiensi adalah penggunaan mesin berkapasitas tinggi pada tahap pengolahan benih. Jika pada masa lalu proses sortasi dan *grading* dilakukan manual oleh tenaga kerja dengan risiko kesalahan manusia yang besar, kini teknologi *optical sorter* mampu menyortir ribuan butir benih per menit dengan tingkat akurasi mendekati 100%. Mesin ini menggunakan sensor warna, ukuran, dan bentuk untuk memastikan hanya benih bermutu tinggi yang diproses lebih lanjut.

Dengan demikian, modernisasi di tahap ini memberikan dampak ganda seperti efisiensi teknis sekaligus peningkatan kualitas.

Tidak hanya berhenti pada tahap sortasi, efisiensi juga sangat terasa pada proses pengemasan dan pelabelan. Sistem pengemasan modern berbasis otomatisasi memungkinkan seluruh proses. Mulai dari tahap penanaman, pemanenan, penyegelan, hingga pencetakan label berjalan dalam satu alur mesin. Dengan cara ini, kebutuhan tenaga kerja berkurang drastis, sementara kecepatan produksi meningkat tajam. Aspek efisiensi berikutnya muncul dari sisi distribusi dan logistik benih, yang kini ditopang oleh sistem digital *traceability*. Dengan memanfaatkan *QR code* atau RFID yang tertanam dalam kemasan, asal-usul benih, informasi penyimpanan, dan jalur distribusinya dapat dilacak secara cepat. Sistem ini tidak hanya memudahkan proses pengawasan, tetapi juga menekan potensi pemalsuan benih yang sering menjadi masalah di lapangan. Selain aspek teknis dan distribusi, efisiensi produksi juga ditentukan oleh pengelolaan energi. Teknologi modern kini mulai mengarah pada penggunaan mesin yang hemat energi serta ramah lingkungan. Misalnya, sistem pengeringan benih berbasis *hybrid*, yakni menggabungkan energi listrik dengan tenaga surya mampu menekan biaya produksi secara signifikan. Dengan penerapan teknologi ini, industri benih tidak hanya mencapai efisiensi biaya, tetapi juga mendukung komitmen terhadap pertanian berkelanjutan yang ramah lingkungan. Dengan demikian, aspek efisiensi menyentuh pula dimensi ekologi, bukan semata ekonomi.

Selanjutnya, perkembangan konsep *precision agriculture* membawa dimensi baru dalam efisiensi produksi benih di lapangan. Melalui teknologi sensor tanah, drone untuk pemetaan lahan, serta algoritma berbasis kecerdasan buatan (AI), produsen benih kini mampu mengatur penggunaan input secara tepat sasaran. Misalnya, pemupukan presisi dengan drone mampu mengurangi pemborosan pupuk sekaligus meningkatkan produktivitas tanaman sumber benih. Li et al. (2021), melaporkan bahwa penerapan drone pada produksi benih jagung meningkatkan hasil hingga 18% dengan penghematan pupuk sebesar 22%. Data ini membuktikan bahwa integrasi *precision agriculture* mampu memberikan hasil yang lebih optimal dengan penggunaan input yang lebih rendah. Dengan demikian, teknologi modern menghadirkan konsep efisiensi yang holistik, meliputi aspek teknis, biaya, mutu, hingga lingkungan.

Namun, meskipun teknologi modern menawarkan berbagai keuntungan, tidak dapat dipungkiri bahwa tantangan utama terletak pada biaya investasi awal. Mesin sortasi optik, sistem otomatisasi, maupun drone membutuhkan modal besar yang sulit dijangkau oleh produsen benih skala kecil. Oleh karena

itu, konsep *cooperative farming* atau mekanisasi bersama menjadi solusi penting. Dengan kepemilikan kolektif melalui koperasi atau kelompok tani, beban biaya investasi dapat ditanggung bersama, sementara manfaatnya dirasakan secara kolektif. Data dari BPS (2022), menunjukkan bahwa program mekanisasi pertanian di Indonesia telah mendorong efisiensi tenaga kerja di sektor benih hingga 15%. Hal ini menunjukkan bahwa dengan dukungan kelembagaan dan kebijakan yang tepat, hambatan adopsi teknologi dapat ditekan.

Pada akhirnya, dapat disimpulkan bahwa efisiensi produksi dengan teknologi modern merupakan hasil dari kombinasi berlapis: mekanisasi untuk mempercepat proses, otomatisasi untuk meningkatkan akurasi, digitalisasi untuk memperkuat transparansi, serta inovasi energi untuk mendukung keberlanjutan. Ke depan, tren integrasi IoT, AI, dan *big data* dalam industri benih akan semakin memperluas cakupan efisiensi, karena sistem dapat belajar dan beradaptasi terhadap perubahan lingkungan maupun permintaan pasar. Dengan pendekatan ini, produksi benih tidak hanya efisien dari segi teknis dan ekonomi, tetapi juga mampu menjawab tantangan masa depan dalam pertanian yang berkelanjutan secara global.

DAFTAR PUSTAKA

- Adegbite, O., Ajiboye, T., & Olawale, R. 2020. Evaluation of Airflow Seed Cleaning Machine for Wheat. *Journal of Agricultural Mechanization*: 12 (3), 145–153.
- Basra, S. M. A., Farooq, M., & Afzal, I. 2020. Seed Quality Enhancement Through Modern Processing Techniques. *Seed Science and Technology*: 48 (1), 1–12.
- BPS. 2022. Statistik Ketenagakerjaan Sektor Pertanian 2021. Jakarta: Badan Pusat Statistik.
- BPS. 2022. Statistik Pertanian Indonesia. Badan Pusat Statistik.
- Chen, L., Wang, J., & Li, Z. 2021. Performance of Pneumatic Precision Seed Metering Device for Maize Planting. *Biosystems Engineering*: 202, 87–99.
- Chen, L., Wang, J., & Xu, Y. 2022. IoT - Enabled CO₂ Sensing System for Monitoring Seed Vigor During Storage. *Computers and Electronics in Agriculture*: 198, 107014.
- Chen, L., Zhang, Y., & Liu, H. 2022. Machine Learning - Based Seed Sorting System for Quality Enhancement. *Computers and Electronics in Agriculture*: 194, 106732.
- Choudhary, S., Singh, R., & Verma, P. 2020. Role of QR Codes in Prevention of Counterfeit Seeds in India. *Seed Research*: 48 (2), 123–130.
- FAO. 2020. Mechanization for Sustainable Agricultural Production. Rome: Food and Agriculture Organization.
- FAO. 2020. The State of Agricultural Mechanization in Asia. Rome: Food and Agriculture Organization.
- Gupta, P., Kumar, S., & Sharma, R. 2021. Predictive Maintenance of Seed Processing Machines Using IoT Sensors. *Journal of Agricultural Engineering*: 58 (2), 101–112.
- Kim, S., Park, J., & Lee, H. 2021. Energy - Efficient IoT Monitoring System for Smart Agriculture Using LoRaWAN. *Journal Sensors*: 21(14), 4711.
- Kumar, R., Singh, A., & Yadav, P. 2021. Efficiency of Automated Seed Packaging Systems Compared with Manual Packaging. *Journal of Agricultural Mechanization*: 13 (4), 201–210.
- Kumar, R., Singh, P., & Sharma, V. 2022. Integrated Seed Processing Lines for Efficient Production. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*: 24 (2), 77–85.
- Li, X., Zhao, Y., & Wang, L. 2021. Drone - Based Precision Agriculture for

- Seed Production Efficiency. *Computers and Electronics in Agriculture*: 185, 106133.
- Nugraha, D., Santosa, B., & Hidayat, A. 2022. Precision Irrigation for Soybean Seed Production Using IoT - Based Soil Sensors. *Jurnal Teknologi Pertanian Indonesia*: 14 (2), 85–96.
- Nugroho, A., Suryanto, H., & Pratama, A. 2020. Comparative Study of Mechanical Drying and Sun Drying on Maize Seed Quality. *Jurnal Teknologi Pertanian Indonesia*: 12 (2), 65–74.
- Putra, Y., Kurniawan, A., & Lestari, N. 2021. Development of IoT - Based Warehouse Monitoring System for Maize Seed Storage. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*: 26 (3), 412–420.
- Rahardjo, B., Santoso, A., & Widodo, S. 2022. Grading Effect on Seed Size Uniformity and Vigor of Soybean. *Jurnal Agronomi Indonesia*: 50 (1), 23–32.
- Rahman, M., Hossain, T., & Alam, M. 2020. Impact of Automated Packaging Machines on Seed Industry Performance. *Asian Journal of Agriculture and Biology*: 8 (3), 275–283.
- Setyawan, A., Hidayat, T., & Kusuma, R. 2020. Evaluasi Kehilangan Hasil Panen Padi Menggunakan Combine Harvester. *Jurnal Mekanisasi Pertanian*: 25 (2), 45–53.
- Singh, R., Patel, D., & Yadav, A. 2021. Application of Gravity Separator in Quality Seed Production of Maize and Soybean. *Seed Research*: 49 (2), 135–142.
- Singh, R., Patel, S., & Sharma, D. 2021. Digital Labeling and Traceability in Seed Supply Chain. *International Journal of Agricultural Technology*: 17 (5), 187–198.
- Sujatmiko, A., Prasetyo, A., & Rahman, F. 2021. Mekanisasi Pertanian dalam Peningkatan Mutu Benih: Tantangan dan Peluang. *Jurnal Teknologi Pertanian Indonesia*: 13 (2), 77–86.
- Zhang, H., Liu, Y., & Zhao, X. 2022. Smart Packaging Technologies for Maintaining Seed Viability During Storage. *Journal of Stored Products Research*: 95, 101947.
- Zhang, Y., Liu, C., & Chen, H. 2021. Advances in Optical Sorting Technologies for Seed Quality Improvement. *Journal of Food Engineering*: 292, 110–118.

BAB 13

STANDARISASI DAN SERTIFIKASI BENIH

Oleh: Maria Azizah

13.1 Sistem Sertifikasi Benih Nasional dan Internasional

Sertifikasi benih adalah serangkaian pemeriksaan dan/atau pengujian dalam rangka penerbitan Sertifikat Benih. Sertifikasi benih adalah salah satu tahapan penting dalam kegiatan produksi benih. Kegiatan sertifikasi benih bertujuan untuk memberikan jaminan mutu benih yang dihasilkan produsen, perlindungan konsumen dari benih bermutu rendah dan menyediakan benih unggul bersertifikat secara berkelanjutan. Jaminan mutu benih yang dimaksud adalah kebenaran mutu genetik, mutu fisik, mutu fisiologis, dan mutu patologi benih.

Sertifikasi benih di Indonesia diatur dalam undang undang nomor 22 tahun 2019 tentang system budidaya pertanian berkelanjutan. Sistem sertifikasi benih secara internasional diatur oleh asosiasi perbenihan, yaitu International Seed Testing Association (ISTA). Negara yang tergabung dalam asosiasi ISTA melakukan sertifikasi benih yang dipasarkan dengan mengikuti standar mutu benih yang diterapkan oleh ISTA. ISTA mengatur standar mutu benih yang layak diperjualbelikan.

a. Sertifikasi benih nasional

Sertifikasi benih di Indonesia diatur oleh Undang Undang No. 22 tahun 2019. Lembaga yang berwenang dalam pengembangan metode pengujian benih di lapangan, pelaksanaan pemeriksaan lapang, dan pengawasan peredaran benih tanaman pangan dan hortikultura adalah Balai Besar Pengembangan Pengujian Mutu Benih Tanaman Pangan dan Hortikultura (BBPPMBTPH). Balai ini juga melaksanakan pengujian mutu benih tanaman pangan dan hortikultura tingkat internasional karena telah memiliki laboratorium yang berstandar internasional.

Di tingkat yang lebih kecil, yaitu provinsi dan kabupaten, terdapat balai pengawasan dan sertifikasi benih, yaitu Balai pengawasan dan sertifikasi benih (BPSB) yang berada di bawah dinas pertanian propinsi. BPSB berperan dalam proses sertifikasi benih, pengawasan peredaran benih, pengujian mutu benih, penilaian varietas dan pelayanan produsen benih. Peran BPSB dalam sertifikasi benih yaitu melaksanakan seluruh kegiatan sertifikasi benih mulai

dari pendaftaran sampai pengeluaran label pada benih yang diproduksi agar sesuai dengan standar mutu. Pada kegiatan pengawasan, BPSB berperan dalam memastikan benih yang beredar di pasaran telah bersertifikat dan berkualitas tinggi. Pada pengujian mutu benih, BPSB melakukan pelayanan uji laboratorium untuk memeriksa mutu dan kemurnian genetic benih yang dihasilkan oleh produsen. Selain itu BPSB juga melakukan pelayanan produsen benih dengan menerima dan memproses permohonan sertifikasi benih serta memberikan pendampingan selama proses produksi.

Sertifikat benih yang berlaku di Indonesia biasanya disebut dengan istilah label benih. Label benih yang berlaku di Indonesia dibedakan menjadi 4 (empat) warna berdasarkan kelasnya. Kelas benih penjenis (*breeder seed*) menggunakan label berwarna kuning. Kelas benih dasar (*foundation seed*) menggunakan label berwarna putih. Kelas benih pokok (*stock seed*) menggunakan label berwarna ungu. Untuk kelas benih sebar menggunakan label berwarna biru.

b. Sertifikasi benih internasional

Lembaga yang menangani sertifikasi benih Internasional antara lain International Seed Testing Association (ISTA), Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) dan International Seed Federation (ISF). Lembaga tersebut menangani perdagangan benih lintas negara. Sertifikat yang dikeluarkan oleh ISTA adalah *Blue/ Orange Certificate*. Sedangkan OECD mengeluarkan label yang disebut OECD. Peraturan dalam sertifikasi dan pengujian mutu benih yang berlaku Adalah ISTA rules untuk negara-negara yang tergabung dalam ISTA, dan OECD Rules pada negara negara yang tergabung dalam anggota OECD.

Indonesia termasuk dalam negara yang tergabung dan mengikuti standar ISTA. Standar ISTA ini diterjemahkan dan diterapkan pada kegiatan sertifikasi benih tanaman pangan dan hortikultura di Indonesia. Metode pengujian mutu benih yang diterapkan di Indonesia juga berdasarkan pada standar ISTA.

13.2 Proses dan Tahapan Sertifikasi

Kegiatan produksi benih erat kaitannya dengan proses sertifikasi. Sebelum dilakukan proses produksi benih, produsen harus menentukan dahulu mutu benih yang akan dihasilkan sehingga proses sertifikasi yang dilakukan tepat. Produsen yang akan mengajukan sertifikasi benih harus sudah terdaftar sebagai produsen benih. Bagi produsen baru, pendaftaran dapat dilakukan dengan mengisi biodata pengajuan secara online melalui website

BPSB provinsi masing masing. Persyaratan teknis produsen benih berdasarkan Permentan No. 23 tahun 2021 (Permentan No. 23 2021, 2021) antara lain:

1. Memiliki sumber daya manusia yang kompeten dan jumlahnya sesuai dengan skala usaha perbenihan yang dilaksanakan
2. Memiliki akses terhadap penggunaan benih sumber
3. Menguasai fasilitas produksi dan penyimpanan benih
4. Memiliki rencana produksi benih yang dibuat setiap musim tanam dan/atau per tahun
5. Memiliki dokumentasi data produksi dan penyaluran benih hasil produksi
6. Memiliki prosedur operasional baku produksi benih bermutu sesuai dengan komoditas yang akan direncanakan.

Proses sertifikasi benih melalui BPSB dilakukan melalui beberapa tahapan, yaitu pengajuan sertifikasi, pemeriksaan lapang (*field inspection*), pengambilan sample dan uji laboratorium, penerbitan sertifikat dan label, serta pengawasan peredaran benih oleh pihak terkait. Prosedur dalam petunjuk teknis sertifikasi benih tanaman pangan (Kepmentan No. 991 Th. 2018, 2018) terdiri dari:

a. Pengajuan Sertifikasi

Pengajuan sertifikasi dilakukan dengan produsen/penangkar benih mendaftarkan kegiatan produksi benih yang akan dilakukan. Pengajuan ini dilakukan dengan mengisi form pengajuan sertifikasi. Pengajuan sertifikasi benih dilakukan oleh produsen benih secara online melalui *website* BPSB. Permohonan sertifikasi ini dilaksanakan dengan menggunakan Formulir 1. Pada formulir 1 ini, pengajuan sertifikasi ini produsen wajib mengisi data data pengajuan antara lain:

1. Data administrasi dan legalitas yang terdiri dari : surat permohonan, profil usaha, dan surat pernyataan kesanggupan memproduksi dan mengedarkan benih yang dihasilkan. Luasan satu unit sertifikasi yang diajukan untuk sertifikasi benih tanaman pangan maksimal 10 ha.
2. Data teknis produksi dan lapangan yang terdiri dari: rencana penanaman, data lahan (lokasi, sejarah lahan dan isolasi lahan), Benih sumber (produsen benih sumber, label benih sumber).

b. Pemeriksaan Lapangan (*Field Inspection*)

Pemeriksaan lapangan dilaksanakan oleh Pengawas Benih Tanaman. Pemeriksaan dilakukan melalui beberapa tahapan, yaitu:

1. Pemeriksaan pendahuluan

Petugas melakukan pemeriksaan pendahuluan. Pemeriksaan pendahuluan dilakukan dengan mengecek kebenaran dokumen permohonan sertifikasi benih, kebenaran kondisi lahan (isolasi dan sejarah lahan), kebenaran batas area produksi benih, kebenaran varietas dan kelas benih sumber, dan rencana tanam (varietas, tanggal tebar/semai, tanggal tanam, kelas benih, luas areal). Hasil pemeriksaan lapang pendahuluan dilaporkan oleh petugas Pengawas Benih tanaman menggunakan Formulir 2.

2. Pemeriksaan pertanaman

Pemeriksaan pertanaman dilaksanakan dengan tujuan untuk mendapatkan kepastian bahwa benih yang akan dihasilkan benar varietas yang dimaksud dan tidak tercampur dengan varietas lain. Sebelum pemeriksaan lapang, produsen harus mengajukan permohonan pemeriksaan pertanaman kepada UPTD paling lambat 1 (satu) minggu sebelum pelaksanaan pemeriksaan. Pemeriksaan pertanaman dilakukan pada fase vegetative, fase berbunga, dan fase masak/menjelang panen. Pemeriksaan dapat dilakukan pada satu, dua atau tiga fase, tergantung jenis tanaman yang diproduksi. Hasil pemeriksaan pertanaman dilaporkan menggunakan Formulir 3.

Pada tahap pemeriksaan pertanaman ini dilakukan penentuan sample pengamatan yang mewakili populasi dan bukan merupakan tanaman pinggir. Minimum jumlah sample untuk luasan 1-2 ha sebanyak 4 contoh, 2-4 ha sebanyak 8 contoh, 4-7 ha sebanyak 12 contoh, dan >7-10 ha sebanyak 16 contoh (Oecd Seed Schemes Guidelines for Control Plot Tests, 2019)

Tiga tahapan pemeriksaan pertanaman antara lain:

- Pemeriksaan pada fase vegetative. Pemeriksaan tanaman pada fase vegetative dilakukan dengan memperhatikan deskripsi varietas pada fase vegetative. Pemeriksaan dilakukan dengan mengamati warna, bentuk dan pola pertumbuhan tanaman pada fase vegetative. Pada fase ini dilakukan penghitungan jumlah campuran varietas lain pada areal contoh tanaman.
- Pemeriksaan pada fase berbunga. Pemeriksaan fase berbunga meliputi umur berbunga, warna bunga dan bentuk bunga. Acuan yang digunakan adalah deskripsi varietas yang ditanam.
- Pemeriksaan pada fase masak/ menjelang panen. Pada fase ini dilihat warna buah, bentuk buah dan umur panen. Contohnya

pada tanaman padi bentuk malai, warna bulir padi dan umur panen.

Penghitungan campuran varietas lain pada pemeriksaan pertanaman dilakukan dengan menghitung jumlah varietas lain dan tipe simpang dari hasil pemeriksaan seluruh areal contoh pemeriksaan. Penghitungan dilakukan dengan rumus:

$$\text{Persentase CVL} = \frac{\sum \text{CVL dan Tipe Simpang}}{\sum \text{Contoh Pemeriksaan}} \times \frac{1}{\text{Populasi Sampel}} \times 100\%$$

Apabila pada pemeriksaan pertanaman ternyata tidak memenuhi persyaratan mutu, maka produsen dapat mengajukan permintaan pemeriksaan ulang sebanyak 1 (satu) kali. Jika pemeriksaan ulang yang diajukan tidak lulus maka pertanaman dapat dinyatakan lulus untuk kelas benih yang lebih rendah jika memenuhi standar yang berlaku untuk kelas benih yang lebih rendah tersebut. Laporan pemeriksaan pertanaman dibuat oleh Pengawas Benih Tanaman dan disampaikan kepada produsen paling lambat 5 (lima) hari kerja setelah pemeriksaan. Selain pengamatan campuran varietas lain dan tipe simpang, pengawas benih tanaman melakukan pengamatan serangan hama, penyakit dan gulma. Apabila pertanaman terserang hama dan penyakit, serta kebersihan dari gulma tergolong parah, maka proses sertifikasi benih tidak dapat dilanjutkan. Areal penanaman tetap dapat dipanen menjadi produksi tanaman untuk konsumsi.

3. Pemeriksaan alat panen, alat pengolahan tempat pengolahan benih dan tempat penyimpanan, serta pemeriksaan benih di pengolahan dan tempat penyimpanan

Kegiatan ini dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan kepastian bahwa benih yang akan dipanen/diolah/disimpan terhindar dari kemungkinan pencampuran sehingga kemurnian benih dapat dijamin. Petugas memeriksa ketersediaan dan kebersihan peralatan. Selain itu dilakukan pemeriksaan kebersihan fasilitas panen, pengeringan, pengolahan dan gudang simpan.

Pemeriksaan benih pada proses pengolahan dan penyimpanan dilakukan dengan tujuan untuk menjamin benih yang diolah dan disimpan diketahui jumlahnya dan tidak tercampur dengan varietas lain. Identitas kelompok benih dan blok harus ada dan dipelihara setiap saat. Benih harus disimpan dalam tempat dengan kondisi yang sesuai

serta sirkulasi udara terjamin atau terkontrol. Produsen melakukan pengajuan pemeriksaan selambat-lambatnya 1 (satu) minggu sebelum panen/sebelum pengolahan dan penyimpanan. Hasil pemeriksaan dilaporkan menggunakan Formulir 4.

c. Pengambilan contoh dan pengujian/analisis mutu benih di laboratorium

Kegiatan pengambilan contoh benih diatur dalam Kepmentan No. 993 tahun 2018. Proses ini dilakukan dengan pengajuan permohonan mutu benih oleh produsen kepada UPTD. Contoh benih diambil oleh petugas pengambil contoh benih yang kompeten, dari kelompok benih yang telah lulus pemeriksaan lapangan akhir, selesai diolah dan mempunyai identitas yang jelas. Tatacara pengambilan contoh benih, jumlah atau berat contoh, alat pengambilan contoh benih, dan pengujian/analisis mutu benih di laboratorium mengacu pada *ISTA Rules*. Pengujian/analisis mutu benih meliputi: Penetapan Kadar Air, Analisis Kemurnian, dan Pengujian Daya Berkecambah. Hasil pengujian/analisis mutu benih di laboratorium dilaporkan menggunakan *Formulir 5*.

d. Penerbitan Sertifikat dan Label

Benih tanaman pangan yang memenuhi persyaratan sertifikasi dan dinyatakan lulus, diterbitkan sertifikat Benih Tanaman Pangan. Sertifikat Benih Tanaman Pangan diterbitkan oleh UPTD atau oleh produsen Benih tanaman pangan yang telah mendapatkan sertifikat sistem manajemen mutu dari LSSM. Sertifikat Benih Tanaman Pangan antara lain berisikan nama dan alamat produsen Benih tanaman pangan, data kelompok benih, data kemurnian varietas dan mutu benih, tanggal selesai pengujian/analisis, dan masa edar. Sertifikat Benih Tanaman Pangan diterbitkan menggunakan Formulir 6. Benih yang lulus diberi label dengan warna biru (kelas benih sebar), ungu (kelas benih pokok), putih (kelas benih dasar), kuning (kelas benih penjenis).

e. Pengawasan Peredaran Benih

Pengawasan peredaran benih dilakukan berdasarkan peraturan keppmentan No. 992 tahun 2018 (Kepmentan No. 992 Th. 2018, 2018). Kegiatan pengawasan dilaksanakan dengan tujuan untuk mencegah kemungkinan terjadinya penyimpangan dalam peredaran benih. Kegiatan pengawasan peredaran benih dilaksanakan dengan cara Pengawasan Peredaran Benih Bina (monitoring dan pelaporan peredaran benih bina), Pengecekan mutu benih bina (pemeriksaan kebenaran label, pemeriksaan kemasan, pengambilan contoh benih, pengujian/analisis mutu benih di laboratorium), dan pelaporan. Selain itu pada benih dengan label yang masa

edarnya menjelang berakhir dapat dilakukan pelabelan ulang untuk memperpanjang masa edar benih dengan prosedur yang telah ditetapkan berdasarkan peraturan.

13.3 Kelembagaan dan Regulasi Benih

1. Kelembagaan Benih di Indonesia

Kelembagaan perbenihan di Indonesia meliputi:

- a. Lembaga pemerintah antara lain Kementerian Pertanian melalui direktorat jendral tanaman pangan dan hortikultura dan direktorat perbenihan. Selain itu terdapat lembaga yang berperan pada kegiatan sertifikasi benih nasional yaitu Balai Besar Pengembangan Pengujian Mutu Benih Tanaman Pangan dan Hortikultura (BBPPMBTPH) dan tingkat daerah yaitu UPTD Balai pengawasan dan sertifikasi benih (BPSB) yang berada di bawah Dinas Pertanian Provinsi.
- b. Lembaga penelitian yang berperan dalam perbenihan antara lain BRIN dan universitas yang berperan dalam perakitan varietas benih tanaman pangan, hortikultura dan Perkebunan.
- c. Produsen dan penangkar benih. Lembaga yang termasuk dalam produsen benih adalah perusahaan benih yang berbadan hukum baik swasta maupun BUMN yang memiliki ijin sebagai produsen dan distributor benih. Sedangkan penangkar benih adalah kelompok tani/individu yang memproduksi benih bersertifikat berdasarkan izin.
- d. Asosiasi perbenihan. Adalah organisasi nirlaba yang menjadi wadah bersatunya perusahaan-perusahaan yang bergerak di bidang perbenihan tanaman. Contohnya Asbenindo.

2. Regulasi benih di Indonesia

Regulasi benih di Indonesia diatur oleh undang-undang, peraturan pemerintah, dan berbagai Peraturan Menteri Pertanian (Permentan) yang mencakup produksi, sertifikasi, dan peredaran benih tanaman untuk berbagai sektor seperti hortikultura dan perkebunan. Standar mutu benih ditetapkan secara teknis dan mencakup mutu genetik, fisik, fisiologis, dan kesehatan benih. Regulasi yang perlu dipelajari antara lain:

- 1) UU No. 22 Tahun 2019 tentang Sistem Budi Daya Pertanian Berkelanjutan yang mengatur produksi, sertifikasi, peredaran, dan pengawasan benih (UU Nomor 22 Tahun 2019, 2019).
- 2) Peraturan Pemerintah Nomor 26 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Bidang Pertanian.

- 3) Permentan No. 85 tahun 2014 tentang pedoman teknis uji hibriditas tanaman hortikultura (Permentan No.85 2014 Tentang Pedoman Teknis Uji Hibriditas, 2014).
- 4) Permentan Nomor 12 Tp.020 tahun 2018 tentang produksi, sertifikasi, dan peredaran benih tanaman (Peraturan Menteri Pertanian Republik Indonesia Tentang Produksi, Sertifikasi, Dan Peredaran Benih Tanaman, 2018).
- 5) Permentan nomor 23 tahun 2021 tentang Pembenuhan Hortikultura (Permentan No. 23 2021, 2021).
- 6) Kepmentan No. 966 tahun 2022 tentang petunjuk teknis sertifikasi benih tanaman pangan (Kepmentan No. 966. TP. 010. C. 04. 2022, 2022).
- 7) Kepmentan No. 992 tahun 2018 tentang petunjuk teknis peredaran benih tanaman pangan (Kepmentan No. 992 Th. 2018, 2018).
- 8) Kepmentan No. 642 tahun 2024 tentang teknis sertifikasi benih hortikultura (Kepmentan No. 642 Th. 2024 Tentang Teknis Sertifikasi Benih Hortikultura, 2024)

13.4 Penelusuran Asal Usul dan Label Mutu

1. Penelusuran Asal Usul Benih (*Seed Traceability*)

Penelusuran asal usul benih adalah sistem pencatatan dan pengawasan yang memastikan bahwa benih yang beredar benar-benar berasal dari varietas yang dilepas/diakui, diproduksi dengan prosedur yang benar, dan memenuhi standar mutu. Tujuannya adalah untuk Menjamin keaslian varietas (*true-to-type*); Menjamin kemurnian genetik antar kelas benih; Memastikan benih dapat ditelusuri mulai dari sumber (pemulia) sampai petani pengguna; dan Memberikan jaminan hukum jika terjadi sengketa mutu atau keaslian benih.

Tahapan Penelusuran dilakukan dengan melakukan pencatatan sumber benih mulai dari breeder seed yang dihasilkan oleh pemulia tanaman/pemegang hak varietas. Selanjutnya pencatatan pada kelas benih yang lebih rendah yang diverifikasi oleh Lembaga sertifikasi benih. Pada proses sertifikasi di lapangan dilakukan pengecekan kesesuaian varietas, jarak isolasi dan Kesehatan tanaman. Pada pengujian mutu benih di laboratorium dilakukan pengujian terhadap mutu benih yang terdiri dari daya tumbuh benih, kadar air, kemurnian fisik dan Kesehatan benih. Hasil pemeriksaan tersebut dituangkan dalam sertifikat benih yang ditandai dengan label mutu benih.

2. Label Mutu Benih

Label adalah tanda resmi yang menunjukkan bahwa benih sudah melalui sertifikasi dan memenuhi standar mutu benih yang telah ditetapkan. Label benih yang berlaku di Indonesia dibedakan berdasarkan kelas benihnya, yang ditandai dengan warna label. Label kuning untuk benih penjenis, label putih untuk benih dasar, label ungu untuk benih pokok dan label biru untuk benih kelas benih sebar. Informasi yang tercantum pada label benih antara lain: nama varietas, kelas benih, nomor sertifikat/lot benih, daya berkecambah benih (%), kadar air (%), berat benih (g/kg), nama produsen, tahun panen, tanggal kadaluarsa, dan tanda sah Lembaga sertifikasi

13.5 Peran Lembaga Pengawas dan Penjamin Mutu

Pengawasan dan penjaminan mutu benih diatur dalam Kepmentan nomor 992 tahun 2018. Benih adalah sarana produksi yang sangat menentukan hasil panen. Jika mutu benih rendah atau tidak sesuai varietas, petani akan merugi. Oleh karena itu, perlu lembaga resmi yang mengawasi dan menjamin mutu benih dengan tujuan menjaga kebenaran varietas yang diproduksi, kebenaran mutu benih yang diproduksi oleh produsen dan kebenaran mutu benih yang diedarkan. Pengawasan mutu dan peredaran benih tanaman dilakukan oleh Unit Pelaksana Teknis Daerah BPSB. Pengawasan dilakukan oleh petugas Pengawas Benih Tanaman.

Pengawasan peredaran benih dilakukan untuk memastikan benih yang dijual atau beredar di pasaran bersertifikat dan memiliki mutu yang terstandar. Pengawasan ini juga bertujuan untuk mencegah peredaran benih palsu/tidak bermutu, serta menegakkan hukum terhadap pelanggaran. Pengawasan juga bertujuan untuk menjamin kebenaran asal usul benih yang beredar. Selain itu, adanya pengawasan ini menjadi perlindungan konsumen dan pemulia tanaman dari kerugian akibat adanya benih palsu.

DAFTAR PUSTAKA

- Kepmentan No. 642 Th. 2024 Tentang Teknis Sertifikasi Benih Hortikultura (2024).
- Kepmentan No. 966. TP. 010. C. 04. 2022 (2022).
- Kepmentan No. 991 Th. 2018, Kementan (2018).
- Kepmentan No. 992 Th. 2018, 43 (2018).
- Oecd Seed Schemes Guidelines for Control Plot Tests, 35 (2019).
- Peraturan Menteri Pertanian Republik Indonesia Tentang Produksi, Sertifikasi, Dan Peredaran Benih Tanaman, Kementerian Pertanian RI 5 (2018).
- Permentan No. 23 2021, 3 6 (2021).
- Permentan No.85 2014 Tentang Pedoman Teknis Uji Hibriditas (2014).
- UU Nomor 22 Tahun 2019, Undang-Undang RI (2019).

BAB 14

SISTEM DISTRIBUSI DAN PEMASARAN BENIH

Oleh: Farah Rosyidah Diyana

14.1 Saluran Distribusi Benih Dari Produsen ke Konsumen

Saluran distribusi yang kerap dikenal dengan saluran dagang, atau saluran pemasaran pada dasarnya berfungsi sebagai penghubung antara produsen dan konsumen. Distribusi merupakan kunci peningkatan volume penjualan suatu produk atau layanan karena melalui pemahaman dan pengelolaan saluran distribusi yang tepat, perusahaan mampu memaksimalkan penjualan produknya serta meningkatkan keuntungan (Arif & Sismar, 2024). Distribusi adalah kegiatan penyaluran produk baik itu berupa barang maupun jasa dari produsen kepada konsumen agar dapat digunakan.

Pengertian distribusi menurut beberapa ahli (Tegar, 2019):

1. Menurut Nirwan Sembiring, distribusi adalah menyalurkan barang dari suatu tempat (produsen) ke tempat lainnya (konsumen) untuk dimanfaatkan.
2. Menurut Kotler dan Armstrong, Distribusi merupakan kegiatan yang dilakukan perusahaan supaya produk dan layanan dapat dengan mudah dirasakan oleh konsumen.
3. Menurut Soekartawi, distribusi adalah menyalurkan barang dan jasa sampai konsumen akhir.
4. Assauri berpendapat bahwa distribusi merupakan memindahkan produk dari sumber produksi kepada konsumen pada waktu yang sesuai dan tepat
5. Pengertian distribusi menurut Basu Swastha adalah saluran pemasaran yang dipakai oleh produsen untuk mengirimkan produknya kepada konsumen.

Distribusi merupakan kegiatan atau aktivitas penyaluran produk baik berupa barang maupun jasa dari produsen kepada konsumen agar produk tersebut dapat sampai dan digunakan dengan tepat untuk meningkatkan volume penjualan. Saluran Distribusi benih merupakan jalur yang digunakan oleh produsen untuk menyalurkan benih yang dimiliki hingga sampai pada konsumen (petani, kelompok tani, pelaku usaha) dengan tepat. Saluran distribusi sangat penting karena ketersediaan benih yang tepat baik itu jenis,

jumlah, mutu, dan waktu sangat menentukan keberhasilan produksi pertanian. Pada saluran distribusi benih melibatkan banyak pihak perantara sebelum sampai pada konsumen, mulai dari pedagang besar, pengecer, hingga lembaga penyuluh pertanian dan koperasi. Distribusi benih menjadi kunci dalam ilmu dan teknologi benih karena memastikan benih yang berkualitas tinggi dapat sampai pada petani dengan afektif dan efisien. Fungsi distribusi menurut antara lain (Agustina, 2023):

1. Kegiatan distribusi dilakukan dengan maksud untuk menyalurkan barang dari produsen kepada konsumen.
2. Distribusi dapat membantu kelancaran dari pemasaran suatu produk dan mempertahankan kualitas dari produk, sehingga barang atau produk yang dimiliki produsen dapat segera terjual dan tidak mengalami penurunan kualitas.

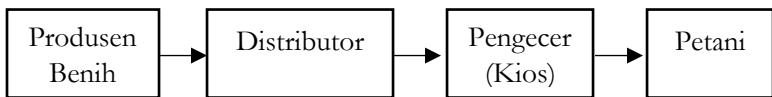
Kegiatan distribusi benih memiliki tujuan utama yaitu menyalurkan dan mengantarkan benih dari produsen kepada konsumen dengan efektif dan efisien. Selain itu pendistribusian benih dapat membantu kelancaran pemasaran produk agar benih dapat segera terjual sehingga kondisi fisik benih, mutu benih, hingga nilai ekonomis benih tetap terjaga melalui sistem pengemasan, penyimpanan, dan penanganan yang sesuai standar sehingga tidak mengalami penurunan kualitas.

Waktu merupakan faktor yang sangat menentukan dalam saluran distribusi. Manfaat suatu barang akan optimal apabila barang tersebut tersedia tepat pada saat dibutuhkan. Sebaliknya, distribusi yang terlambat dapat menimbulkan kerugian, baik bagi produsen yang kehilangan potensi keuntungan maupun bagi konsumen yang berkurang tingkat kepuasannya (Agustina, 2023). Oleh karena itu perlu dipertimbangkan penanganan dan waktu yang dibutuhkan pada penyaluran benih. Benih merupakan organisme hidup, maka dari itu proses pemindahan dan penyalurannya perlu mendapatkan perhatian khusus agar tetap terjaga kualitasnya. Ketika benih dipindahkan dari satu daerah ke daerah lain, kualitasnya sering mengalami penurunan akibat suhu ekstrem dan kelembapan tinggi yang timbul dari kondisi penyimpanan dan transportasi yang kurang memadai. Perlu diperhatikan jenis transportasi, cara penumpukan, suhu, dan sinar. Pengangkutan disesuaikan dengan jenis benih yang akan didistribusikan.

Pihak yang terlibat dalam kegiatan distribusi benih yaitu Produsen Benih yang melakukan kegiatan produksi benih mulai dari pengolahan, perbanyakan benih, pengujian mutu, hingga pemasaran dengan berbagai varietas. Distributor/Pedagang Besar sebagai penghubung antara produsen dan

pengecer yang membeli benih dalam jumlah besar lalu melakukan pengeceran ke berbagai daerah. Pengecer (*Retailer*) disini merupakan kios atau toko sarana produksi yang menjual benih langsung ke petani sesuai dengan kebutuhannya. Selain melakukan jual beli, mereka juga memberikan informasi dasar tentang penggunaan benih. Petani/Konsumen sebagai penerima akhir dalam distribusi benih yang melakukan pembelian ke pengecer atau distributor dengan mempertimbangkan harga, mutu benih, dan kesesuaian varietas dengan kondisi lahan. Distribusi benih dibagi menjadi 2 jenis antara lain:

1. Distribusi Langsung. Distribusi langsung adalah penyaluran barang atau produk langsung kepada konsumen tanpa melalui perantara. Pada distribusi ini petani langsung melakukan pemesanan kepada sales atau distributor langsung dari perusahaan produsen. Distribusi benih dengan jenis ini cocok untuk benih spesifik, produksi terbatas, atau program pemerintah.
2. Distribusi Tidak Langsung. Penyaluran barang atau produk dengan melalui satu atau lebih perantara untuk sampai kepada konsumen. Distribusi ini Paling umum untuk benih komersial dalam skala besar. Pada distribusi tidak langsung terdapat perantara penyaluran sebelum sampai pada petani tapi melalui distributor, pengecer (kios) kemudian baru bisa sampai di tangan petani.



Gambar 52. Distribusi Benih Tidak Langsung

Ditinjau dari jumlah benih yang disalurkan, distribusi benih dibedakan menjadi distribusi benih varietas publik dan distribusi benih varietas komersial. Kedua benih tersebut memiliki distribusi yang berbeda. Menurut (Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman pangan, 2015), alur distribusi benih varietas publik melalui beberapa tahap yaitu:

1. Penyaluran benih penjenis (BS). Dilakukan untuk memastikan ketersediaan benih sumber yang benar-benar murni dan memiliki kualitas genetik terbaik. Penyaluran benih ini ke balai benih tingkat provinsi atau lembaga perbenihan lainnya yang dilakukan oleh Direktorat Perbenihan sebagai lembaga pengendali mutu perbenihan nasional, namun dalam kondisi tertentu bisa juga langsung dilakukan oleh institusi penyelenggara pemuliaan seperti Balai Besar Penelitian Tanaman Padi (BB Padi).

2. Penyaluran benih dasar (FS/BD). Memperbanyak benih penjenis agar tersedia cukup untuk memenuhi kebutuhan produksi benih selanjutnya. Pendistribusian kepada balai benih, perusahaan benih swasta, atau penangkar benih profesional yang berada di tingkat kabupaten dan dikoordinasikan oleh Dinas Pertanian Provinsi atau Balai Benih Provinsi untuk menjamin penyebaran merata dan tepat sasaran.
3. Penyaluran benih pokok (SS/BP). Penyaluran untuk memperluas produksi benih sehingga siap menjadi benih sebar. Benih ini disalurkan kepada perusahaan benih swasta maupun penangkar benih oleh balai benih di tingkat kabupaten, atau langsung oleh perusahaan benih swasta maupun penangkar benih profesional. Mekanisme ini memastikan bahwa benih berkualitas tersedia sampai ke tahap produksi benih sebar di lapangan.

Sedangkan distribusi benih varietas komersial antara lain:

1. Perusahaan memproduksi benih komersial dan mengemasnya, kemudian pedagang besar membeli benih dalam jumlah besar dari produsen lalu menyimpan stok, mengatur logistik, dan menyalurkan benih ke berbagai wilayah. Selanjutnya pengecer (kios/toko) membeli benih dari pedagang besar dan menjualnya kepada petani sesuai kebutuhannya untuk kemudian dimanfaatkan.
2. Perusahaan memproduksi benih komersial dan mengemasnya, kemudian Distributor membeli dan menyimpan, mengatur transportasi, serta mendistribusikan benih ke penyalur di berbagai wilayah. Selanjutnya penyalur yang sudah bekerjasama dengan produsen akan menyalurkan benih dari distributor dengan ukuran kecil. Kemudian pengecer (toko/kios) akan menerima benih dan menjual kepada petani dengan ukuran sesuai kebutuhannya.

14.2 Strategi Pemasaran Benih Komersial

Pemasaran merupakan kegiatan sosial dan manajerial yang memungkinkan individu maupun kelompok mendapatkan apa yang mereka butuhkan dan inginkan melalui penciptaan, penawaran, dan pertukaran hal-hal yang bernilai bagi masing-masing pihak. Sedangkan manajemen pemasaran adalah proses perencanaan dan pelaksanaan terkait penciptaan, penetapan harga, promosi, dan distribusi barang, jasa, atau gagasan dengan tujuan menciptakan pertukaran yang memuaskan kebutuhan pelanggan sekaligus mencapai tujuan organisasi (Rachmawati et al., 2024). Pemasaran merupakan Proses manajerial dan sosial yang memungkinkan penciptaan,

komunikasi, pengiriman, dan pertukaran nilai kepada pelanggan, klien, mitra, dan masyarakat demi memenuhi kebutuhan dan keinginan mereka serta mencapai tujuan organisasi maupun individu. Untuk mencapai tujuan tersebut diperlukan yang namanya strategi dalam pemasaran.

Dilihat dari jumlah benih yang disebarluaskan, distribusi benih dibedakan menjadi benih varietas publik dan komersial. Varietas publik merupakan varietas yang dikembangkan oleh pemulia, baik di lembaga pemerintah maupun nonpemerintah, dengan tujuan utama untuk memenuhi kebutuhan masyarakat atau petani. Sedangkan varietas komersial adalah varietas yang dikembangkan oleh lembaga pemerintah maupun swasta, di mana hak kepemilikannya dimiliki secara eksklusif oleh produsen benih (Wahyuni et al., 2021). Masyarakat yang membutuhkan benih tersebut dapat membelinya melalui agen resmi atau kios yang telah ditunjuk di pasar.

Dalam pemasaran benih dibutuhkan strategi untuk memudahkan. Strategi pemasaran benih memiliki beberapa tujuan yaitu:

1. Meningkatkan Penjualan; Agar benih yang diproduksi dapat terserap oleh pasar secara maksimal, meningkatkan pendapatan produsen dan keberlanjutan usaha.
2. Menjangkau Petani secara Luas; Memastikan benih komersial tersedia dan mudah diakses oleh petani di berbagai wilayah, termasuk daerah terpencil, sehingga distribusi lebih merata.
3. Menjaga Mutu Benih; Menjamin kualitas benih tetap terjaga dari produsen hingga sampai ke tangan petani melalui pengemasan, penyimpanan, dan distribusi yang tepat.

Dalam strategi pemasaran terdapat yang namanya marketing mix, dimana marketing mix ini merupakan kombinasi variabel pemasaran yang digunakan perusahaan untuk mempromosikan produk atau layanannya secara efektif di pasar. Pada strategi pemasaran benih menerapkan marketing mix untuk menarik konsumen agar terus menggunakan produk benih tersebut. Marketing mix pada strategi pemasaran benih yaitu (Fatikhillah et al., 2015):

1. *Product*. Strategi produk mencakup penyediaan berbagai varietas dan jenis benih yang disesuaikan dengan kebutuhan masing-masing segmen pasar. Selain itu, kemasan produk harus menarik, dan pegawai yang bertugas perlu memahami keunggulan maupun kelemahan setiap produk agar dapat memberikan informasi yang tepat, sehingga produk menjadi disukai oleh petani.
2. *Promotion*. Promosi dilakukan baik melalui interaksi langsung dengan pelanggan maupun melalui berbagai media iklan, seperti radio, media

elektronik, dan media cetak. Kegiatan promosi ini terbukti efektif dalam memasarkan produk benih kepada konsumen. Dengan penerapan berbagai strategi promosi benih yang tepat, perusahaan dapat mencapai target pemasaran benih secara maksimal sesuai rencana yang telah ditetapkan

3. *Price*. Penentuan nilai yang harus dibayar konsumen untuk mendapatkan benih. Strategi harga dilakukan dengan menetapkan harga benih yang terjangkau bagi konsumen sesuai produk yang diinginkan. Penentuan harga mempertimbangkan keunggulan tiap varietas, biaya produksi hingga siap jual, biaya promosi, biaya distribusi, serta harga produk pesaing. Dengan pendekatan ini, perusahaan dapat meminimalkan potensi kerugian.
4. *Place*. Saluran distribusi memastikan produk tersedia dan mudah diakses oleh konsumen. Pemilihan lokasi penjualan benih yang strategis sangat krusial untuk mendukung penjualan optimal serta mempermudah pelanggan mendapatkan benih. Agar dapat bersaing di pasar, penempatan produk benih harus disesuaikan dengan kebutuhan konsumen.
5. *People*. Seluruh pihak yang terlibat dalam kegiatan pemasaran benih, mulai dari staf penjualan hingga tim layanan pelanggan yang berinteraksi langsung dengan konsumen. Interaksi positif dari orang-orang ini sangat krusial dalam membangun hubungan baik dengan pelanggan.

14.3 Peran Lembaga Swasta dan Pemerintah

Keberhasilan distribusi dan pemasaran benih tidak hanya bergantung pada 1 pihak atau produsen saja, akan tetapi akan sangat dipengaruhi oleh beberapa kerjasama yang baik antara lembaga pemerintah dan sektor swasta. Kedua lembaga tersebut berperan menjaga ketersediaan benih bermutu agar sampai ke petani tepat waktu, tepat jumlah, dan dengan harga yang wajar. Lembaga pemerintah memiliki peran dalam distribusi dan pemasaran benih, yaitu:

1. Melakukan regulasi dan pengawasan; Kementerian Pertanian dan Badan Pengawas Sertifikasi Benih memiliki peran menyusun kebijakan, peraturan, dan standar mutu benih. Selain itu pemerintah melakukan sertifikasi dan pengawasan peredaran benih agar sesuai dengan ketentuan hukum dan mencegah adanya benih ilegal atau palsu.
2. Penyediaan benih sumber; Balai Penelitian Tanaman dan Balai Benih menyediakan benih dasar, pokok, dan induk bagi produsen swasta untuk

- memperbanyak benih turunan. Serta menjamin ketersediaan varietas unggul baru.
3. Program Bantuan dan Subsidi; Lembaga pemerintah seperti Unit Pelaksana Teknis Dinas Pertanian (UPT) menyalurkan benih bersertifikat melalui program bantuan untuk mendukung musim tanam dan mendorong petani mengadopsi varietas unggul dengan harga terjangkau.
 4. Penyuluhan pertanian; Lembaga pemerintah memiliki peran dalam memberikan informasi, edukasi, dan pendampingan kepada petani terkait pertanian terutama teknologi benih dan cara budidaya yang baik.
- Lembaga swasta merupakan organisasi atau perusahaan nonpemerintah yang melakukan kegiatan produksi, memperbanyak, menyalurkan, dan memasarkan benih komersial kepada petani. Lembaga swasta mampu menjadi pelengkap peran pemerintah dalam penyediaan benih unggul dan memperluas akses terhadap benih tersebut. Peran lembaga swasta dalam distribusi dan pemasaran benih yaitu:

1. Produksi massal benih. Lembaga swasta seperti produsen memiliki peran memperbanyak benih unggul dan mengembangkan fasilitas serta pengolahan benih untuk memenuhi kebutuhan konsumennya
2. Distribusi dan jaringan pemasaran. Distributor memiliki peran membangun jalur distribusi benih yang lebih luas mulai dari distributor hingga pengecer. Serta mempercepat penyaluran benih yang dimiliki produsen agar tetap terjaga kualitas dan segera sampai pada petani.
3. Promosi dan branding. Lembaga swasta seperti pengecer dan *E-Commerce* dapat membantu melakukan pemasaran produk, edukasi penggunaan benih dan pemasarannya melalui media manapun.
4. Inovasi produk dan pelayanan. Bekerja sama dengan pemerintah melakukan pengembangan varietas benih baru dan teknis budidaya.

Melakukan kegiatan perbenihan diperlukan kerjasama antara lembaga swasta dan pemerintah untuk mencapai keberhasilan distribusi dan pemasaran benih. Kerjasama tersebut dapat membantu menjamin ketersediaan dan mutu benih bersertifikat, memperluas jangkauan distribusi, mendorong inovasi sehingga dapat meningkatkan produksi pertanian. Bentuk kolaborasi antara lembaga swasta dan pemerintah dapat dilakukan dengan berbagai macam bentuk, antara lain: Kemitraan produksi dan distribusi. Pada kolaborasi ini pemerintah berperan sebagai penyedia benih sumber yang berkualitas dan terjamin mutunya, sedangkan lembaga swasta memperbanyak benih tersebut dalam skala besar dan mendistribusikannya kepada konsumen. Serta

penyuluhan pertanian bersama. Penyuluh pertanian dan perusahaan benih bekerjasama menyelenggarakan pelatihan, demplot, dan sosialisasi terkait penggunaan benih sehingga petani dapat memperoleh informasi yang luas.

14.4 Permasalahan Distribusi di Daerah Terpencil

Distribusi sering kali menghadapi tantangan geografis yang kompleks, seperti aksesibilitas dan infrastruktur jalan yang terbatas. Kendala distribusi muncul akibat berbagai faktor yaitu infrastruktur yang belum merata terutama di wilayah pedalaman dan kondisi jalan yang kurang memadai sehingga menyulitkan transportasi hasil panen serta menghambat petani untuk menjangkau pasar yang lebih luas dan efisien sehingga memperpanjang waktu pengiriman (Syarif, 2025). Banyak petani yang tinggal di daerah terpencil dan sulit dijangkau oleh sistem distribusi yang efisien dan menyebabkan biaya pengiriman produk pertanian menjadi sangat tinggi, serta dapat mengurangi keuntungan petani. Permasalahan yang timbul pada distribusi di daerah terpencil yaitu (Yanti & Prayitno, 2025):

1. Keterbatasan Infrastruktur. Keterbatasan infrastruktur merupakan salah satu kendala utama dalam proses distribusi terutama di daerah-daerah terpencil. Banyak jalan di wilayah tersebut masih berupa tanah dan berbatu sehingga tidak mudah dilalui oleh kendaraan yang akan melakukan transportasi. Hal ini dapat memperlambat kegiatan distribusi dan menyebabkan peningkatan biaya transportasi serta kerusakan barang sehingga dapat menurunkan kualitas dan mutu produk.
2. Topografi yang kompleks. Daerah petani yang di pegunungan dan perbukitan yang jalan curam, bebatuan, dan akses yang terbatas menuntut menggunakan kendaraan khusus dan perencanaan yang lebih matang. Hal ini dapat menyebabkan peningkatan biaya operasional pada saat pendistribusian.
3. Pengaruh musim dan cuaca ekstrem. Perubahan musim dan cuaca ekstrem memiliki dampak signifikan terhadap proses distribusi. Pada saat musim hujan jalan akan licin dan rusak yang dapat menghambat akses transportasi. Sedangkan pada saat suhu panas yang berlebihan akan mempengaruhi mutu suatu produk.
4. Keterbatasan sumber daya manusia. Keterbatasan ini menjadi salah satu faktor penghambat distribusi, khususnya di daerah terpencil. Di wilayah-wilayah ini sering kali sulit menemukan tenaga kerja yang terampil dan berpengalaman hal ini dapat berdampak pada kurang optimalnya proses pengelolaan barang, penataan stok, pencatatan administrasi, hingga

pelayanan kepada petani atau konsumen akhir. Akibatnya, distribusi menjadi lebih lambat, risiko kesalahan meningkat, dan mutu layanan pun menurun. Dalam jangka panjang, kondisi ini dapat mengurangi kepercayaan konsumen dan meningkatkan biaya operasional perusahaan.

Keterbatasan teknologi juga menjadi permasalahan pada saat distribusi di daerah terpencil. Kesenjangan infrastruktur teknologi antara daerah perkotaan dan pedesaan menciptakan keterbatasan akses terhadap teknologi yang berujung pada kesulitan operasional (Saefullah et al., 2024). Kesulitan akses internet juga dapat menjadi pemicu permasalahan distribusi, sehingga petani atau sumber daya yang ada di daerah terpencil akan susah dan lebih lambat memperoleh informasi sehingga menyebabkan terbatasnya komunikasi dan penggunaan teknologi.

Apabila kendala ini diabaikan maka akan menyebabkan terhambatnya kegiatan distribusi, meningkatkan biaya transportasi, dan mengurangi keuntungan yang didapat petani. Maka dari itu perlu dilakukan solusi untuk mengatasi kendala tersebut, yaitu (Yanti & Prayitno, 2025):

1. Menggunakan kendaraan khusus yang dirancang untuk jalan tersebut sehingga bisa digunakan memperlancar kegiatan distribusi
2. Melakukan perencanaan dengan matang terkait jalur yang akan dilalui dengan cara menggunakan teknologi navigasi untuk memilih jalur paling efisien dan memperpendek waktu tempuh.
3. Distributor membangun kemitraan yang baik dengan masyarakat setempat untuk memperoleh informasi terkini tentang kondisi jalan dan cuaca serta segala sesuatu yang berkaitan dengan pendistribusian produk.
4. Menyelenggarakan program pelatihan bagi tenaga kerja lokal guna meningkatkan efisiensi dan efektivitas proses distribusi.

14.5 Inovasi Digital dalam Pemasaran Benih

Pemasaran melalui digital atau yang biasa disebut dengan digital marketing saat ini menjadi hal yang umum dilakukan oleh pelaku usaha atau bisnis. *Digital marketing* adalah upaya pemasaran yang dilakukan melalui perangkat terkoneksi internet dengan menggunakan berbagai strategi dan media digital, yang bertujuan membangun komunikasi dengan calon pelanggan secara *online* (Chakti, 2019). Strategi pemasaran digital saat ini memegang peranan penting dalam upaya meningkatkan penjualan produk di era persaingan yang semakin ketat. Dalam agribisnis, strategi pemasaran digital memanfaatkan berbagai platform digital seperti media sosial dan situs web untuk memasarkan produk atau layanan sehingga produsen dapat

menjangkau konsumen secara lebih efisien dan dengan biaya lebih rendah dibandingkan metode tradisional (Saputra et al., 2025).

Pemasaran benih yang optimal menjadi faktor kunci peningkatan produktivitas pertanian karena memberikan akses kepada petani terhadap benih berkualitas tinggi, termasuk varietas unggul yang mampu meningkatkan hasil panen, ketahanan terhadap hama dan penyakit, serta kemampuan beradaptasi dengan perubahan iklim. Selain itu, pemasaran yang terkelola dengan baik memastikan penyaluran benih bermutu dilakukan secara tepat waktu, tempat, jumlah, dan harga, sehingga mendukung ketahanan pangan nasional sekaligus meningkatkan kesejahteraan petani.

Digitalisasi pemasaran benih menjadi penting karena mengikuti perubahan perilaku petani yang kini semakin akrab dengan teknologi digital dan semakin berkembangnya zaman. Petani tidak lagi hanya mengandalkan toko fisik, tetapi juga mencari informasi varietas, harga, dan cara budidaya melalui ponsel atau media sosial. Melalui platform digital, produsen dan distributor benih dapat menjangkau petani di berbagai wilayah, termasuk daerah terpencil, sehingga mempermudah akses petani memperoleh benih unggul tanpa harus datang langsung ke toko. Selain itu, pemasaran berbasis digital menghadirkan transparansi yang lebih baik, seperti informasi mutu benih, sertifikasi, harga, ketersediaan stok, hingga ulasan pengguna, sehingga meningkatkan kepercayaan petani terhadap produk yang ditawarkan. Bentuk inovasi digital pemasaran benih antara lain:

1. Platform *E-Commerce* dan *Marketplace* Pertanian. Produsen benih dan distributor memasarkan benih melalui platform daring, sehingga petani dapat memesan langsung dari produsen atau agen resmi tanpa harus pergi ke kota, sehingga menghemat waktu dan biaya transportasi
2. Aplikasi *mobile* dan *website* resmi. Aplikasi *mobile* dan *website* resmi menampilkan katalog benih, lokasi agen, stok, harga, dan panduan teknis, sehingga petani dapat membandingkan varietas dan memesan benih secara langsung.
3. Sistem informasi benih nasional. Sistem Informasi Benih Nasional yang dikembangkan oleh pemerintah dan swasta bermanfaat untuk memantau mutu benih serta mempermudah distribusi ke petani
4. Pemanfaatan media sosial. Pemanfaatan media sosial seperti Facebook, Instagram, WhatsApp, dan YouTube digunakan sebagai strategi untuk mempromosikan varietas benih baru. Promosi bisa berupa gambar, poster, dan video iklan promosi

5. Penyuluhan dan Konsultasi Daring. Melalui webinar, *live streaming*, atau grup *chat*, petani dapat berkonsultasi dengan pakar benih, sehingga transfer pengetahuan tentang budidaya, penyimpanan, dan penanganan benih menjadi lebih efektif.
6. Integrasi Pembayaran dan Pengiriman. Sistem pembayaran digital dan layanan logistik terintegrasi memudahkan petani bertransaksi sekaligus memastikan benih sampai dalam kondisi baik melalui fitur tracking
7. Analisis Data dan Personalisasi Penawaran. Data transaksi dan preferensi petani dianalisis untuk menyesuaikan penawaran, misalnya merekomendasikan varietas sesuai lokasi, musim tanam, dan kebutuhan petani.

Digital marketing adalah kegiatan promosi dan pencarian pasar secara daring melalui berbagai platform digital, seperti media sosial, yang memanfaatkan dunia digital tidak hanya sebagai penghubung manusia dengan perangkat, tetapi juga sebagai sarana interaksi antarindividu di seluruh dunia (Nufuz et al., 2025). Inovasi digital dalam pemasaran pasti terdapat keuntungan dan tantangan dalam penerapannya. Keuntungan menggunakan digital marketing dalam pemasaran produk antara lain (Utami, 2020):

1. Menghubungkan langsung produsen atau penjual dengan konsumen melalui jaringan internet.
2. Memperluas peluang penjualan karena jarak dan waktu tidak lagi menjadi hambatan utama.
3. Menghemat biaya promosi dibandingkan media konvensional seperti cetak, televisi, atau radio.
4. Memungkinkan penjual memberikan layanan kepada pelanggan secara real time.
5. Menjangkau pelanggan melalui perangkat mobile kapan saja dan di mana saja.
6. Memberikan potensi keuntungan yang lebih besar dibandingkan biaya iklan yang dikeluarkan.
7. Memperkuat dan menjaga posisi merek agar tetap unggul di tengah persaingan.
8. Membuka peluang bagi usaha mikro untuk bersaing dengan perusahaan besar.
9. Membantu pengusaha kecil atau pemula beradaptasi dengan era IoT yang serba *online*.
10. Memperluas kesempatan branding agar produk lebih dikenal dan melekat di hati masyarakat sehingga loyalitas konsumen meningkat.

Tantangan yang dihadapi pada saat melakukan digital marketing (Nufuz *et al.*, 2025):

1. Rendahnya literasi digital tim pemasaran
Banyak anggota tim pemasaran belum menguasai strategi digital seperti SEO, iklan *online*, dan analisis data. Hal ini membuat mereka kesulitan memaksimalkan potensi teknologi digital yang tersedia.
2. Efektivitas strategi digital belum optimal
Karena keterbatasan pengetahuan dan pengalaman, strategi pemasaran digital yang dijalankan belum mencapai hasil yang maksimal, sehingga penjualan produk belum meningkat secara signifikan.
3. Keterbatasan anggaran untuk platform digital sendiri
Membangun situs *e-commerce* atau aplikasi khusus membutuhkan biaya besar. Keterbatasan dana ini menjadi hambatan untuk mengembangkan platform digital yang sepenuhnya dikelola oleh perusahaan.

Selain itu keterbatasan di beberapa daerah terpencil, akses internet masih terbatas akibat infrastruktur jaringan yang kurang, biaya tinggi, dan kondisi geografis sulit, sehingga petani sulit mengakses aplikasi, *website*, platform *e-commerce*, dan layanan digital lainnya, yang menghambat informasi benih unggul, stok, harga, dan konsultasi daring, sehingga adopsi teknologi dan produktivitas pertanian menjadi terbatas.

DAFTAR PUSTAKA

- Agustina, et al. 2023. Manajemen Distribusi. Jakarta selatan: Cendikia Mulia Mandiri.
- Arif, M. and Sismar, A. 2024. Peran Saluran Distribusi Dalam Meningkatkan Volume Penjualan Pada Toko Sinar Aneka Sorong Papua Barat Daya. *Jurnal Bisnis dan Kewirausahaan*. 13(1). pp. 47–55.
- Chakti, A.G. 2019. *The Book Of Digital Marketing: Buku Pemasaran Digital*. Makassar: Celebes Media Perkasa.
- Fatikhillah, M., Susilo, B. and Yulianingsih, R. 2015. Identifikasi Saluran Pemasaran dan Distribusi Benih Jagung Hibrida Pioneer di PT. DuPont Indonesia. *Jurnal Keteknikan Pertanian Tropis dan Biosistem*. 3(3). pp. 338–348.
- Nufuz, D.A. et al. 2025. Strategi Digital Marketing Dalam Meningkatkan Penjualan Produk Di PT Benih Citra Asia. *Jurnal Penelitian Nusantara*. 1(3). pp. 78–85.
- Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman pangan, K. 2015. *Pedoman Umum Produksi Benih Sumber Padi*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan.
- Rachmawati, I., Aji, A.P. and Indratmoko, S. 2024. *Manajemen Pemasaran Konsep, Strategi, dan Implementasi*. Cilacap: UNAIC Press Cilacap.
- Saefullah, Y., Kirono, I. and Ismanto, H. 2024. Pengawasan Penyaluran Distribusi Logistik Bahan Pangan Pemerintah Dengan Menggunakan Website E-Filling PT Pos Regional V Surabaya. *Jurnal Ekonomi Manajemen Sistem Informasi*. 6(2), pp. 1101–1109.
- Saputra, H. et al. 2025. Strategi Pemasaran Digital dalam Pengembangan Usaha Agribisnis Rumah Anggur Ardo. *Journal of Education Transportation and Business*. 2(1). pp. 18–27.
- Syarif, S.M. 2025. Analisis Rantai Distribusi Hasil Panen Petani Di Wilayah Madura. *Iltizam : Jurnal Ekonomi dan Keuangan Islam*. 3(1). pp. 29–36.

- Tegar, N. 2019. *Panduan Lengkap Manajemen Distribusi*. Yogyakarta: Anak Hebat Indonesia.
- Utami, D.P. 2020. *Pengenalan Digital Marketing dalam Pemasaran Produk Pertanian Untuk Petani Milenial Desa Wonotulus Kecamatan Purworejo Kabupaten Purworejo*. Seminar Nasional Karya Pengabdian Fakultas Pertanian Universitas Muhammadiyah Mataram. pp. 25–31.
- Wahyuni, A. et al. 2021. *Teknologi Dan Produksi Benih*. Medan: Yayasan Kita Menulis.
- Yanti, N.W.P. and Prayitno, J. 2025. Strategi Efisiensi Distribusi Produk Makanan Ringan Dalam Menghadapi Tantangan Geografis Di Kabupaten Lombok Tengah. *EKOMA : Jurnal Ekonomi, Manajemen, Akuntansi*. 4(2). pp. 3719–3725.

BIODATA PENULIS



Venti Jatsiyah, S.P., M.Si.

Dosen Program Studi Teknologi Produksi
Tanaman Perkebunan
Politeknik Negeri Ketapang

Venti Jatsiyah, S.P., M.Si. lahir di Sambas, Kalimantan Barat pada tanggal 30 Agustus 1988. Menyelesaikan pendidikan sarjana (S1) di Fakultas Pertanian, Universitas Tanjungpura (UNTAN) dengan fokus pada ilmu agronomi, kemudian melanjutkan studi magister (S2) di Institut Pertanian Bogor (IPB) pada program studi Agronomi dan Hortikultura.

Saat ini mengajar di Politeknik Negeri Ketapang, tepatnya pada Program Studi Teknologi Produksi Tanaman Perkebunan. Aktif dalam kegiatan akademik dan penelitian, dengan minat utama pada bidang agronomi dan budidaya tanaman, terutama terkait pengembangan teknologi pertanian di lahan suboptimal dan peningkatan produktivitas tanaman perkebunan.

Kegiatan pengajaran dan penelitian dilakukan di kampus Politeknik Negeri Ketapang yang berlokasi di Jalan Rangka Sentap Dalong, Sukaharja, Kecamatan Delta Pawan, Kabupaten Ketapang.

Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: venti.jatsiyah@politap.ac.id

BIODATA PENULIS



Dr. Ir. Enny Adelina, M.P.

Dosen Program Studi Agroteknologi
Fakultas Pertanian
Universitas Tadulako

Penulis lahir di Bandung tanggal 23 Oktober 1963. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Agroteknologi Fakultas Pertanian Universitas Tadulako. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Fakultas Pertanian Jurusan Budi Daya Tanaman Universitas Tadulako tahun 1987, melanjutkan S2 pada Program Pascasarjana Prodi Agronomi Universitas Sumatera Utara tahun 1997 dan S3 pada Program Doktor Fakultas Pertanian Prodi Ilmu Pertanian Universitas Brawijaya tahun 2015.

Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: adelina2315@untad.ac.id.

BIODATA PENULIS



Dr. Bachtiar, S.P., M.P.

Dosen Program Studi Sains Pertanian
Pascasarjana
Universitas Gorontalo

Penulis dilahirkan di Kolaka Sulawesi Tenggara pada Tanggal 5 Februari 1968. Sejak Tahun 1988 sampai tahun 1993 menempuh pendidikan di Fakultas Pertanian Universitas Hasanuddin, Jurusan Budidaya Pertanian Program Studi Agronomi. Selama menempuh pendidikan di S1, Penulis aktif mengajar matakuliah Ilmu-Ilmu Pertanian, terutama Fisiologi Tanaman dan Biologi di berbagai perguruan tinggi negeri dan swasta di Ujung Pandang (Makassar sekarang). Tahun 1997 menyelesaikan S2 pada Program Studi Sistem-Sistem Pertanian Program Pascasarjana Universitas Hasanuddin. Gelar Doktor di bidang Pertanian khususnya Agronomi dan Hortikultura diraih pada tahun 2016 di Institut Pertanian Bogor, dengan judul Disertasi: "Studi Fisiologis dan Kecukupan Hara Kedelai dengan Budidaya Jenuh Air Di Tanah Bergambut dan Mineral Lahan Pasang Surut".

Sejak tahun 2001 sampai sekarang bekerja sebagai Dosen di tiga lembaga pendidikan yaitu Strata satu (S1) Program Studi Agronomi di Fakultas Pertanian Universitas Ichsan tahun 2001 - 2002, dan juga mengajar Matakuliah Statistik di Akademi Komputer Mal Komputer tahun 2002 – 2005. Sejak tahun 2003 – 2023 ditugaskan pada Program Studi Kehutanan di Fakultas Kehutanan Universitas Gorontalo dan kembali pindah homebase ke Program Studi Sains Pertanian (S2) Pascasarjana Universitas Gorontalo pada tahun 2023 – sekarang. Selama bergelut di bidang pendidikan khususnya sebagai Dosen, Penulis pernah bertugas menjabat sebagai Kepala Laboratorium Dasar, Kepala Pusat Penelitian Pertanian Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat, Dekan Fakultas Pertanian Universitas Ichsan Gorontalo tahun 2001-2002 dan Fakultas Kehutanan 2017-2022.

Saat ini aktif bekerja sebagai peneliti dan dosen di Pascasarjana dan mengampu matakuliah Model-model Sistem Pertanian, Manajemen Sumberdaya Pertanian, Metode Statistik, Fisiologi Lingkungan Tanaman, Pemuliaan Pohon, Dasar Klimatologi dll. Beberapa artikel pernah dimuat di Jurnal Nasional Sinta 2 dan Jurnal Internasional. Buku kolaborasi yang telah

ditulis dan diterbitkan antara lain: 1. Dasar-dasar Agronomi (2024), 2. Ilmu Pertanian (2024), 3. Dasar-Dasar Budidaya Pertanian. Pernah menjadi Editor in Chief dan sekarang menjadi Reviewer pada Jurnal Gorontalo Journal of Forestry Research (GJFR).

Sebagai penulis juga pernah aktif sebagai pengurus maupun anggota organisasi profesi di daerah yakni, DPW-IDI (Ikatan Dosen Indonesia) Gorontalo, PERAGI (Perhimpunan Agronomi Indonesia), Pengurus DPD HA IPB Gorontalo (Himpunan Alumni Institut Pertanian Bogor), APPERTI (Asosiasi Penyelenggara Perguruan Tinggi) Provinsi Gorontalo. Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: tiarfpug@gmail.com

BIODATA PENULIS



Dr. Ir. Maemunah, M.P.

Dosen Program Studi Agroteknologi
Fakultas Pertanian
Universitas Tadulako

Penulis lahir di Lahir di Maros, Sulawesi Selatan: 19 Juli 1968. Meraih gelar Sarjana Pertanian (1991) dan Magister Ilmu Pertanian (1998) Di Universitas Hasanudin Makassar, Mengikuti South Course di Panorama TAFE dan Flinders University di Adelaide South Australia (2004 – 2006), serta menyelesaikan program doktor di Universitas Barawijaja (2015). Tercatat sebagai Dosen di Fakultas Pertanian Universitas Tadulako sejak 1992, aktif sebagai dosen Prodi Agroteknologi sebagai Peneliti di bidang Produksi Benih Tanaman. Buku yang telah ditulis antara lain: Penanganan Benih Aren, Pemuliaan Tanaman Hortikultura, Analisis Pertumbuhan Tanaman dan Penanganan Produksi Benih Bawang VLP dan jurnal tentang perbenihan tanaman.

Email: maemunah.tadulako2@gmail.com atau maemunahjufrie@untad.ac.id

BIODATA PENULIS



Prof. Dr. Ir. Sakka Samudin, M.P.

Dosen Program Studi Agroteknologi
Fakultas Pertanian
Universitas Tadulako

Penulis lahir di Tentena Kabupaten Poso Provinsi Sulawesi Tengah tanggal 28 Desember 1966. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Agroteknologi Fakultas Pertanian Universitas Tadulako. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Budidaya Pertanian Universitas Tadulako, tahun 1990. Strata dua pada Program Studi Magister Ilmu Pertanian Universitas Brawijaya, lulus tahun 1997. Strata tiga pada Program Doktor Ilmu Pertanian Universitas Brawijaya Malang, lulus tahun 2002. Penulis mengajar Matakuliah Genetika dan Pemuliaan Tanaman, Pemuliaan Tanaman Lanjutan, Bioteknologi Pertanian, Teknologi Produksi Bahan Tanam, Teknologi Produksi Benih Unggul, dan Teknik Penelitian dan Penulisan Ilmiah. Selain mengajar, penulis telah menulis beberapa buku yaitu Pemuliaan Tanaman I suatu konsep dasar, Pemuliaan Tanaman II suatu konsep Teoritis, Pemuliaan Tanaman III suatu terapan, dan Parameter Genetik Tanaman Tembakau Madura, Keragaman genetik padi gogo : landasan untuk pemuliaan tanaman berkelanjutan, Produksi dan penanganan benih bawang merah Varietas Lembah Palu (VLP), Budidaya, Fermentasi, dan Pengolahan Biji Kakao Menjadi Blok Cokelat, Experimental Impact of Drought on Germination of Upland Rice Using PEG 6000, Dasar-Dasar Agronomi dan Sistem Pertanian Terpadu dan Teknologi Produksi Tanaman Pangan. Artikel yang ditulis telah diterbitkan pada jurnal nasional terakreditasi kementerian pendidikan tinggi, terakreditasi internasional maupun bereputasi.

Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: sakka01@yahoo.com

BIODATA PENULIS

Muhammad Sahbudin, S.T.P., M.T

Dosen Program Studi Budidaya Tanaman Perkebunan
Politeknik LPP Yogyakarta



Penulis lahir di Bima NTB tanggal 19 September 2000. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Budidaya Tanaman Perkebunan Politeknik LPP Yogyakarta. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Teknik Pertanian di Universitas Muhammadiyah Mataram dan melanjutkan S2 pada Jurusan Teknik Pertanian dan Biosistem di Institut Pertanian Bogor. Selain aktif bekerja, penulis juga menekuni bidang tulis menulis.

Penulis memulai karir sejak kuliah mulai dari asisten praktikum beberapa mata kuliah saat program sarjana hingga menjadi asisten dosen saat pascasarjana di IPB, selain itu penulis juga bekerja paruh waktu di PT. Daud Teknik Maju di Bogor sebagai drafter. Penulis juga aktif berorganisasi diantaranya Himpunan Mahasiswa Donggo Mataram (Sekretaris Umum), HMJ Teknik Pertanian (Ketua Umum), LPM Dimensi (Pimpinan Umum) dan HMI (Anggota). Saat S2 penulis juga aktif di Himpunan Mahasiswa Muslim dan Himpunan Mahasiswa Wirausaha IPB.

Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: muhammadsahbudin4@gmail.com

BIODATA PENULIS



Khansa Amara, S.P., M.Si

Dosen Program Studi Agroteknologi
Fakultas Pertanian
Universitas Pembangunan Nasional “Veteran”
Jawa Timur

Penulis lahir di Surabaya tanggal 2 Desember 1998. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Agroteknologi Fakultas Pertanian Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Agroteknologi dan melanjutkan S2 pada Jurusan Fitopatologi. Selain aktif bekerja, penulis juga menekuni bidang tulis menulis.

Penulis terbuka terhadap jenis kolaborasi menulis maupun penelitian dengan kedalaman penulis berupa proteksi tanaman. Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: khansa_amara.agrotek@upnjatim.ac.id.

BIODATA PENULIS

Jeki, S.P., M.Sc.

Dosen Program Studi Agroteknologi
Fakultas Pertanian
Universitas Tadulako



Penulis lahir di Binangga, Kabupaten Parigi Moutong, Sulawesi Tengah, tanggal 9 Oktober 1986. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Tadulako. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Program Studi Agronomi (Peminatan Pemuliaan Tanaman) Universitas Tadulako, dan melanjutkan S2 pada Program Studi Agronomi Universitas Gadjah Mada. Saat buku ini ditulis, penulis sedang menempuh Pendidikan S3 pada Program Studi Agronomi dan Hortikultura (Peminatan Ilmu Benih) IPB University.

Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: ekmir86@gmail.com.

BIODATA PENULIS



Indri Fariroh, S.P., M.Si.

Dosen Program Studi Agronomi
Fakultas Pertanian
Universitas Jember

Penulis lahir di Probolinggo pada tanggal 29 Desember 1989. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Agronomi, Fakultas Pertanian, Universitas Jember sejak tahun 2019 hingga sekarang. Penulis menyelesaikan pendidikan S1 di Departemen Agronomi dan Hortikultura, Fakultas Pertanian, IPB University. Penulis kemudian melanjutkan S2 di Program Studi Ilmu dan Teknologi Benih, Departemen Agronomi dan Hortikultura, Fakultas Pertanian, IPB University. Selain aktif bekerja sebagai dosen, penulis juga merupakan Kepala Laboratorium Produksi dan Teknologi Benih di Prodi Agronomi sejak tahun 2022 hingga sekarang.

Beberapa mata kuliah yang diampu adalah Pengantar Ilmu Tanaman, Dasar-Dasar Agronomi, Botani, Budidaya Tanaman Perkebunan Karet dan Sawit, Budidaya Tanaman Rempah dan Obat, Teknologi Produksi dan Sertifikasi Benih, Agroekologi, Pengantar Teknologi Pertanian, Pertanian Berkelanjutan, Dasar-Dasar Perlindungan Tanaman, Budidaya Tanaman Hortikultura, Agrolanskap, serta Manajemen Produksi Tanaman. Penulis juga melakukan penelitian di bidang ilmu dan teknologi benih seperti dormansi pada benih selada, invigorasi pada benih edamame menggunakan mikoriza dan magnetopriming (ELF), matricconditioning benih kedelai menggunakan vermikompos, invigorasi benih sorgum menggunakan bahan organik dan anorganik, serta pengujian mutu benih secara cepat menggunakan X-ray dan image processing.

Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: indrifariroh@unej.ac.id.

BIODATA PENULIS



Sepsriyanti Kannapadang, S.P., M.Si.

Dosen Program Studi Agroteknologi
Fakultas Pertanian
Universitas Kristen Indonesia Toraja

Penulis lahir di Tampo tanggal 16 September 1992. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Agroteknologi Fakultas Pertanian Universitas Kristen Indonesia Toraja. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Proteksi Tanaman dan melanjutkan S2 pada Jurusan Agroteknologi. Selain aktif bekerja, penulis juga menekuni bidang tulis menulis.

Mengampu mata kuliah Dasar-dasar Perlindungan Tanaman, Fitopatologi, Teknologi Benih, Pemuliaan Tanaman, Teknik Persilangan Buatan dan Pengendalian Hama Penyakit Pasca Panen. Selama ini aktif dalam kegiatan penelitian dan pengabdian masyarakat di bidang perlindungan tanaman, pengendalian hama terpadu, dan pengembangan agroekosistem berkelanjutan. Dengan latar belakang akademik di bidang perlindungan tanaman, saya berkomitmen untuk mengintegrasikan ilmu pengetahuan dan teknologi dalam praktik pertanian ramah lingkungan yang aplikatif di tingkat petani. Beberapa karya tulis dan modul ajar telah menjadi rujukan pembelajaran di lingkup perguruan tinggi maupun pelatihan pertanian.

Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: sepsriyanti@ukitoraja.ac.id

BIODATA PENULIS



Nur Meili Zakiyah, S.Pd., M.Biotek.
Dosen Program Studi S1 Agroteknologi
Fakultas Pertanian
Universitas Pembangunan Nasional “Veteran”
Jawa Timur

Penulis lahir di Gresik tanggal 25 Mei 1993. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Pendidikan Biologi dan melanjutkan S2 pada Jurusan Bioteknologi. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi S1 Agroteknologi Fakultas Pertanian Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur dengan minat riset utama eksplorasi genetika untuk pemuliaan tanaman pangan.

Sebagai kontributor dalam buku ini, penulis berharap dapat memberikan wawasan ilmiah yang bermanfaat bagi peneliti, mahasiswa, dan praktisi di bidang bioteknologi pertanian. Ia berkomitmen untuk terus mengembangkan penelitian berbasis bioteknologi yang berkelanjutan serta mendorong kolaborasi multidisiplin untuk memecahkan tantangan di bidang pertanian modern.

Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: nur_meili.agrotek@upn.ac.id.

BIODATA PENULIS



Bahrul Rizki Ramadhan, S.P., M.P.

Dosen Program Studi Agroteknologi
Fakultas Pertanian
Universitas Pembangunan Nasional “Veteran”
Jawa Timur

Penulis lahir di Surabaya, 26 Januari 1996. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur.

Menyelesaikan pendidikan S1 pada Program Studi Agroekoteknologi Minat Budidaya Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Brawijaya. Selain itu penulis juga melanjutkan S2 pada Program Studi Agronomi Minat Manajemen Produksi Tanaman Fakultas Pertanian, Universitas Brawijaya. Selain aktif bekerja, penulis juga menekuni bidang tulis menulis.

Penulis merupakan akademisi dan praktisi pertanian yang memiliki keahlian di bidang budidaya hidroponik dan pertanian yang berkelanjutan. Kariernya dimulai pada tahun 2017 sebagai Staf Magang di PT. Liberia Persada Kebun Sayur Surabaya Hidroponik, dan pada tahun yang sama menerima Beasiswa PPA dari Kemenristekdikti atas prestasi akademik di Universitas Brawijaya. Pada 2018 - 2019, penulis menjadi pemateri pelatihan hidroponik di Surabaya, dan sejak saat itu aktif sebagai pendiri dan pemilik Kebun Nini Hidroponik Lamongan, yang berfokus pada produksi tanaman budidaya hortikultura serta edukasi pertanian hidroponik yang berbasis pemberdayaan lokal. Tahun 2024, penulis menjadi *Trainer Project Green Learning for Sustainable Future* – Hidroponik bersama CAKAP.COM di sepuluh sekolah di Indonesia Timur.

Pada tahun 2024, penulis resmi menjabat sebagai dosen tetap di Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, serta menjadi anggota aktif PERAGI (Perhimpunan Agronomi Indonesia / *Indonesian Society for Agronomy*). Dengan perpaduan pengalaman praktik, pelatihan, dan pendidikan tinggi, penulis berkomitmen untuk mendukung dalam kemajuan pertanian nasional yang produktif dan berkelanjutan. Penulis dapat dihubungi melalui alamat e-mail: bahrul_rizki.agrotek@upnjatim.ac.id

BIODATA PENULIS



Maria Azizah, S.P., M.Si.

Dosen Program Studi Teknik Produksi Benih
Jurusan Produksi Pertanian
Politeknik Negeri Jember

Penulis lahir di Banyuwangi 10 Februari 1988. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Produksi Benih Jurusan Produksi Pertanian Politeknik Negeri Jember. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Departemen Agronomi dan Hortikultura IPB dan melanjutkan S2 pada Program Studi Ilmu dan Teknologi Benih Sekolah Pascasarjana IPB. Selain aktif bekerja, penulis juga menekuni bidang tulis menulis. Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: maria_azizah@polije.ac.id.

BIODATA PENULIS



Farah Rosyidah Diyana, S.Tr.P., M.P

Dosen Program Studi Agroteknologi
Fakultas Teknologi dan Rekayasa
Universitas Sunan Gresik

Penulis lahir di Lamongan tanggal 31 Agustus 1999. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Agroteknologi Fakultas Teknologi dan Rekayasa Universitas Sunan Gresik. Menyelesaikan pendidikan S1 Jurusan Manajemen Agroindustri di Politeknik Negeri Jember pada tahun 2021 dan melanjutkan S2 Jurusan Agribisnis di Universitas Brawijaya tahun 2024. Selama menempuh pendidikan, penulis aktif mengikuti organisasi dan menjadi salahsatu pengurus didalamnya. Selain aktif bekerja, penulis juga menekuni bidang tulis menulis. Buku “Ilmu Dan Teknologi” ini merupakan karya keduanya dalam bentuk tulisan buku. Buku pertama yang sudah penulis buat berjudul “Manajemen Risiko Bisnis Waralaba”. Penulis berharap buku ini dapat bermanfaat dan membantu.

Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: farah.rd@lecturer.usg.ac.id