

Buku Ajar

FISIOLOGI DAN TEKNOLOGI

PASCAPANEN PERTANIAN TANAMAN

TROPIKA LEMBAB



Marwati, S.TP., M.P.
Hj. Maulida Rachawati, SP.,MP
Dr. Ir. Miftakhur Rohmah, S.P., M.P
Nuzlul Musdalifah, S.TP., M.Si
Melda Nurmaisari, S.TP., M.T.P

BUKU AJAR
FISIOLOGI DAN TEKNOLOGI PASCAPANEN
PERTANIAN TANAMAN TROPIKA LEMBAB

Marwati, S.TP., M.P.
Hj. Maulida Rachawati, SP.,MP
Dr. Ir. Miftakhur Rohmah, S.P., M.P
Nuzlul Musdalifah, S.TP., M.Si
Melda Nurmaisari, S.TP., M.T.P



GET PRESS INDONESIA

BUKU AJAR
FISIOLOGI DAN TEKNOLOGI PASCAPANEN PERTANIAN
TANAMAN TROPIKA LEMBAB

Penulis :

Marwati, S.TP., M.P.
Hj. Maulida Rachawati, SP.,MP
Dr. Ir. Miftakhur Rohmah, S.P., M.P
Nuzlul Musdalifah, S.TP., M.Si
Melda Nurmaisari, S.TP., M.T.P

ISBN: 978-634-255-773-0

Editor : Mila Sari, M.Si.

Desain Sampul dan Tata Letak : Handri Maika Saputra, S.ST.

PENERBIT GET PRESS INDONESIA

Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022
Jl. Palarik RT 01 RW 06 Kelurahan Air Pacah
Kecamatan Koto Tangah Padang Sumatera Barat
website: www.getpress.co.id
email: adm.getpress@gmail.com

Cetakan pertama, September 2026

Hak cipta dilindungi undang-undang.

Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk
dan dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunia-Nya, sehingga buku ajar yang berjudul “Fisiologi dan Teknologi Pascapanen Pertanian Tanaman Tropika Lembab” ini dapat diselesaikan dan hadir di hadapan pembaca.

Indonesia sebagai negara beriklim tropika lembab memiliki kekayaan sumber daya hayati yang sangat melimpah, khususnya pada sektor pertanian. Kondisi agroklimat yang khas memberikan keunggulan sekaligus tantangan dalam pengelolaan hasil pertanian, terutama pada aspek fisiologi tanaman dan penanganan pascapanen. Karakteristik lingkungan tropis yang cenderung memiliki suhu dan kelembaban tinggi berpengaruh signifikan terhadap laju respirasi, transpirasi, serta proses deteriorasi komoditas pertanian.

Buku ini disusun sebagai upaya untuk memberikan pemahaman komprehensif mengenai prinsip-prinsip fisiologi tanaman setelah panen serta penerapan teknologi pascapanen yang tepat guna. Pembahasan diawali dengan konsep dasar fisiologi pascapanen, mencakup perubahan biokimia dan fisiologis yang terjadi pada komoditas pertanian, dilanjutkan dengan faktor-faktor yang memengaruhi kualitas dan daya simpan hasil pertanian di wilayah tropika lembab.

Selanjutnya, buku ini mengulas berbagai teknologi penanganan pascapanen, baik secara tradisional maupun modern, yang meliputi teknik pemanenan, penanganan awal, penyimpanan, pengemasan, hingga distribusi. Pendekatan teknologi yang disajikan tidak hanya berorientasi pada peningkatan kualitas produk, tetapi juga pada efisiensi, keberlanjutan, serta penerapan di tingkat petani dan pelaku usaha agribisnis.

Selain itu, aspek penting seperti kehilangan hasil (losses), pengendalian kerusakan, serta penerapan standar mutu juga dibahas secara sistematis sebagai bagian dari upaya peningkatan nilai tambah produk pertanian. Dalam konteks yang lebih luas, buku ini juga menyoroti peran inovasi dan teknologi dalam mendukung ketahanan pangan dan peningkatan daya saing komoditas pertanian Indonesia di pasar global.

Kami menyadari bahwa penyusunan buku ini tidak terlepas dari berbagai dukungan dan kontribusi dari berbagai pihak. Oleh karena itu, kami menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu dalam proses penyusunan buku ini.

Akhir kata, kami berharap buku ini dapat memberikan manfaat, menambah wawasan, serta menjadi referensi yang berguna bagi mahasiswa, akademisi, peneliti, serta praktisi di bidang pertanian, khususnya dalam kajian fisiologi dan teknologi pascapanen di wilayah tropika lembab.

Padang, Mei 2026

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI.....	iii
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL.....	ix
BAB 1 PENGANTAR FISILOGI DAN TEKNOLOGI	
PASCAPANEN.....	1
DESKRIPSI PEMBELAJARAN	1
KOMPETENSI PEMBELAJARAN	2
PETA KONSEP PEMBELAJARAN	2
1.1 Definisi fisiologi pascapanen	3
1.2 Definisi teknologi pascapanen	4
1.3 Ruang lingkup kajian pascapanen	6
1.4 Peranan pascapanen dalam sistem pangan	8
1.5 Tantangan pascapanen di daerah tropika	10
RANGKUMAN.....	12
TES FORMATIF	13
DAFTAR PUSTAKA.....	17
BAB 2 KARAKTERISTIK FISILOGIS HASIL PERTANIAN....	19
DESKRIPSI PEMBELAJARAN	19
KOMPETENSI PEMBELAJARAN	20
PETA KONSEP PEMBELAJARAN	21
2.1 Struktur dan Jaringan Hasil Pertanian.....	21
2.2 Komposisi Kimia Hasil Pertanian.....	24
2.3 Kandungan air dan aktivitas air	28
2.4 Aktivitas enzim.....	31
2.5 Aktivitas metabolisme komoditas	34
2.6 Faktor yang mempengaruhi sifat fisiologis komoditas...	36
RANGKUMAN.....	38
TES FORMATIF	39
DAFTAR PUSTAKA.....	44

BAB 3 METABOLISME PASCAPANEN	47
DESKRIPSI PEMBELAJARAN	47
KOMPETENSI PEMBELAJARAN	48
PETA KONSEP PEMBELAJARAN	48
3.1 Konsep Metabolisme Pascapanen	49
3.2 Respirasi	51
3.3 Transpirasi	55
3.4 Produksi dan Peranan Etilen	57
3.5 Produksi Etilen	59
3.6 Perubahan Komposisi Kimiawi	60
RANGKUMAN	65
TES FORMATIF	66
DAFTAR PUSTAKA	72
BAB 4 PEMATANGAN BUAH	75
DESKRIPSI PEMBELAJARAN	75
KOMPETENSI PEMBELAJARAN	76
PETA KONSEP PEMBELAJARAN	77
4.1 Konsep Pematangan Buah	78
4.2 Perubahan Fisiologis Selama Pematangan	80
4.3 Buah Klimaterik dan Non-Klimaterik	85
4.4 Regulasi Hormon Pada Pematangan Buah	88
RANGKUMAN	93
TES FORMATIF	94
DAFTAR PUSTAKA	98
BAB 5 SENESCENCE DAN PENUAAN	101
DESKRIPSI PEMBELAJARAN	101
KOMPETENSI PEMBELAJARAN	101
PETA KONSEP PEMBELAJARAN	103
5.1 Konsep Senescence	103
5.2 Perubahan Fisiologis Selama Penuaan	106
5.3 Degradasi Membran Sel	110
5.4 Faktor yang Mempercepat Senescence	113
RANGKUMAN	119

TES FORMATIF ESSAI	120
DAFTAR PUSTAKA.....	124
BAB 6 KERUSAKAN PASCAPANEN	127
DESKRIPSI PEMBELAJARAN	127
PETA KONSEP PEMBELAJARAN	128
6.1 Kerusakan Fisiologis	128
6.2 Kerusakan Mekanis.....	132
6.3 Kerusakan Mikrobiologis	133
6.4 Penyakit Pascapanen	135
6.5 Faktor Lingkungan Penyebab Kerusakan.....	138
RANGKUMAN.....	140
TES FORMATIF ESSAI	141
DAFTAR PUSTAKA.....	143
BAB 7 SISTEM PENANGANAN PASCAPANEN	147
DESKRIPSI PEMBELAJARAN	147
KOMPETENSI PEMBELAJARAN	147
PETA KONSEP PEMBELAJARAN	149
7.1 Pendahuluan.....	150
7.2 Teknik Pemanenan	151
7.3 Penanganan Awal Pascapanen.....	156
7.4 Sortasi	158
7.5 Grading	160
7.6 Pencucian.....	163
7.7 Curing.....	165
7.8 Sanitasi.....	168
RANGKUMAN.....	171
TES FORMATIF	172
DAFTAR PUSTAKA.....	175
BAB 8 PENYIMPANAN HASIL PERTANIAN	179
DESKRIPSI PEMBELAJARAN	179
KOMPETENSI PEMBELAJARAN	179
PETA KONSEP PEMBELAJARAN	180
8.1 Prinsip Penyimpanan.....	180

8.2 Cold Storage.....	183
8.3 <i>Controlled Atmosphere Storage</i> (CA Storage).....	185
8.4 <i>Modified Atmosphere Storage</i> (MA Storage)	186
8.5 Penyimpanan Hipobarik (Hypobaric Storage).....	188
8.6 <i>Chilling Injury</i>	189
8.7 <i>Cold Chain System</i>	191
RANGKUMAN	193
TES FORMATIF ESSAI	194
DAFTAR PUSTAKA	198
BAB 9 PENGEMASAN PRODUK PERTANIAN	203
DESKRIPSI PEMBELAJARAN	203
KOMPETENSI PEMBELAJARAN	204
PETA KONSEP PEMBELAJARAN	205
9.1 Fungsi Pengemasan.....	205
9.2 Jenis Bahan Pengemas.....	207
9.3 Teknologi Pengemasan	210
9.4 Edible Coating.....	212
9.5 Kemasan Ramah Lingkungan	215
RANGKUMAN	219
TES FORMATIF	221
LATIHAN PROBLEM BASE LEARNING (PBL).....	221
DAFTAR PUSTAKA	223
BAB 10 TRANSPORTASI DAN DISTRIBUSI	229
DESKRIPSI PEMBELAJARAN	229
KOMPETENSI PEMBELAJARAN	229
PETA KONSEP PEMBELAJARAN.....	230
10.1 Prinsip Transportasi Komoditas Segar	231
10.2 Sistem Rantai Dingin (<i>Cold Chain</i>)	232
10.3 Distribusi Produk Hortikultura	233
10.4 Manajemen Logistik Pascapanen	234
TES FORMATIF	237
DAFTAR PUSTAKA.....	239

BAB 11 PASCAPANEN KOMODITAS TROPIKA LEMBAB	
DI KALIMANTAN TIMUR.....	241
DESKRIPSI PEMBELAJARAN	241
KOMPETENSI PEMBELAJARAN	241
PETA KONSEP PEMBELAJARAN	242
11.1 Pascapanen Buah Tropika Kalimantan Timur	243
11.2 Pascapanen Sayuran Tropika.....	247
11.3 Pascapanen Rempah dan Tanaman Obat.....	250
11.4 Pascapenen Serelia Tropika	253
11.5 Sistem Distribusi Produk Tropika Kalimantan Timur ..	255
RANGKUMAN.....	258
TES FORMATIF	259
DAFTAR PUSTAKA.....	262
BIODATA PENULIS.....	265

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1. Enzim-enzim yang terlibat dalam berbagai proses fisiologis utama pada buah selama tahap pascapanen.....	32
Gambar 3. 1. Ilustrasi respirasi pada buah	51
Gambar 3. 2. Perubahan komposisi gas pisang, jambu biji dan mangga dalam respirometer pada suhu 28°C; (a) O₂ ; (b) CO₂	53
Gambar 3. 3. Transpirasi sebagai pengatur suhu tumbuhan.....	56
Gambar 3. 4. Lintasan biosintesis etilen	58
Gambar 3. 5. Jalur Biosintesis Etilen.....	59
Gambar 3. 6. Lintasan konversi sukrosa menjadi pati yang dikatalis oleh enzim pati-glukosiltransferase	60
Gambar 3. 7. Mekanisme perubahan pektin selama pematangan yang berpengaruh dalam pematangan buah	62
Gambar 9. 1. Opsi pengelolaan limbah plastik dalam siklus hidup produk polimer.....	216

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1. Faktor penyebab kehilangan pasca panen pada tumbuhan.....	49
Tabel 3. 2. Klasifikasi komoditas berdasar laju respirasi.....	54
Tabel 3. 3. Faktor yang mempengaruhi kecepatan transpirasi	55
Tabel 4. 1. Laju Respirasi Representatif Beberapa Komoditas Hortikultura pada Suhu 5°C.....	81
Tabel 4. 2. Perbandingan Komprehensif Buah Klimakterik dan Non-Klimakterik.....	85
Tabel 4. 3. Komponen Utama Jalur Transduksi Sinyal ABA pada Pematangan Buah Non-Klimakterik.....	91
Tabel 5. 1. Perbandingan karakteristik senescence pada berbagai tipe komoditas pascapanen.....	105
Tabel 5. 2. Perubahan parameter fisiologis selama tahapan senescence dan dampaknya pada kualitas pascapanen	109
Tabel 5. 3. Faktor-faktor pemercepat senescence, mekanisme, dan strategi pengendaliannya	117
Tabel 6. 1. Laju respirasi, tipe klimakterik, dan perkiraan daya simpan beberapa komoditas pascapanen.....	130
Tabel 6. 2. Penyakit pascapanen utama pada komoditas tropika dan kondisi risiko tingginya.....	137
Tabel 7. 1. Indikator kematangan beberapa komoditas hortikultura utama.....	152
Tabel 7. 2. Kriteria umum klasifikasi mutu produk hortikultura.....	161
Tabel 7. 3. Kondisi curing optimal untuk berbagai komoditas umbi dan akar	166
Tabel 7. 4. Perbandingan agen sanitasi utama dalam penanganan pascapanen (diadaptasi dari.....	170

Tabel 8. 1. Faktor-faktor lingkungan dan pengaruhnya terhadap umur simpan komoditas pertanian.....	182
Tabel 8. 2. Suhu dan kelembaban optimal cold storage berbagai komoditas.....	184
Tabel 8. 3. Suhu kritis chilling injury dan gejala utama pada berbagai komoditas.....	190
Tabel 11. 1. Parameter kadar air kritis sereal tropika Kalimantan Timur	254

BAB 1

PENGANTAR FISILOGI DAN TEKNOLOGI PASCAPANEN

DESKRIPSI PEMBELAJARAN

Bab 1 Pendahuluan Fisiologi dan Teknologi Pascapanen memberikan dasar pemahaman mengenai penanganan hasil pertanian setelah panen, diawali dengan pembahasan fisiologi pascapanen yang mencakup proses biologis, biokimia, dan fisik pada komoditas yang masih hidup setelah dipanen. Selanjutnya dijelaskan pengertian pascapanen sebagai seluruh kegiatan sejak panen hingga produk siap dikonsumsi atau diolah, serta konsep teknologi pascapanen sebagai penerapan ilmu dan teknik untuk mempertahankan mutu, memperpanjang umur simpan, dan mengurangi kehilangan hasil. Bab ini juga membahas karakteristik hasil pertanian yang umumnya mudah rusak, bersifat musiman, dan tetap melakukan aktivitas metabolisme seperti respirasi, transpirasi, pematangan, dan senescence yang dapat menurunkan kualitas. Oleh karena itu, pemahaman fisiologi dan teknologi pascapanen sangat penting untuk menjaga mutu, nilai gizi, serta keamanan pangan, sekaligus meminimalkan kerugian, terutama di daerah tropika yang kondisi lingkungannya mempercepat kerusakan komoditas.

KOMPETENSI PEMBELAJARAN

Setelah mengikuti bab 1 pendahuluan ini diharapkan mahasiswa dan mahasiswi memiliki pengetahuan dan kemampuan:

1. Menjelaskan pengertian pasca panen, ruang lingkup fisiologi pasca panen, dan konsep teknologi pasca panen
2. Mengidentifikasi karakteristik hasil pertanian setelah panen dan
3. Menganalisis pentingnya studi fisiologi dan teknologi pasca panen.

PETA KONSEP PEMBELAJARAN



1.1 Definisi fisiologi pascapanen

Fisiologi pascapanen merupakan cabang ilmu yang mempelajari berbagai proses biologis, biokimia, dan fisik yang terjadi pada komoditas pertanian setelah dipanen. Setelah dipisahkan dari tanaman induknya, organ tanaman seperti buah, sayuran, bunga, dan umbi sebenarnya masih berada dalam kondisi hidup (*living tissues*), sehingga tetap menjalankan aktivitas metabolisme. Proses-proses tersebut meliputi respirasi, transpirasi, sintesis dan degradasi senyawa organik, serta perubahan struktural pada jaringan. Oleh karena itu, kondisi pascapanen tidak dapat dianggap sebagai kondisi statis, melainkan fase dinamis yang sangat menentukan kualitas akhir produk.

Salah satu proses utama dalam fisiologi pascapanen adalah respirasi, yaitu proses pemecahan substrat seperti gula menjadi energi, karbon dioksida, dan air. Laju respirasi yang tinggi akan mempercepat penggunaan cadangan makanan dalam jaringan sehingga mempercepat penurunan mutu. Selain itu, transpirasi menyebabkan kehilangan air dari jaringan yang berakibat pada penyusutan bobot dan penurunan kesegaran. Pada komoditas klimakterik, seperti pisang dan mangga, terjadi lonjakan respirasi dan produksi etilen yang memicu proses pematangan. Sebaliknya, komoditas non-klimakterik memiliki pola pematangan yang berbeda, sehingga memerlukan penanganan yang spesifik (Awasthi et al., 2024).

Perubahan fisiologis pascapanen juga melibatkan aktivitas enzimatik yang kompleks, seperti degradasi klorofil yang menyebabkan perubahan warna, pelunakan jaringan akibat aktivitas enzim pektinase, serta perubahan komposisi gula dan asam organik yang memengaruhi rasa. Selain itu, terjadi proses senescence (penuaan) yang ditandai dengan menurunnya integritas sel, meningkatnya permeabilitas

membran, dan akhirnya kerusakan jaringan. Selama proses ini, komoditas menjadi lebih rentan terhadap serangan mikroorganisme seperti bakteri dan jamur yang dapat mempercepat pembusukan (Diane M. Barret, Laszlo Somogyi, 2004).

Pemahaman mendalam mengenai fisiologi pascapanen sangat penting sebagai dasar dalam penerapan teknologi penanganan yang tepat. Pengendalian faktor lingkungan seperti suhu, kelembaban relatif, komposisi atmosfer, dan perlakuan mekanis dapat memperlambat laju metabolisme dan memperpanjang umur simpan produk. Dengan demikian, penerapan prinsip fisiologi pascapanen tidak hanya bertujuan untuk mempertahankan mutu fisik dan organoleptik, tetapi juga menjaga kandungan gizi serta keamanan pangan. Hal ini menjadi sangat penting terutama di daerah tropika, di mana kondisi lingkungan cenderung mempercepat laju kerusakan komoditas pertanian.

1.2 Definisi teknologi pascapanen

Teknologi pascapanen merupakan penerapan prinsip-prinsip ilmiah, teknik, dan rekayasa dalam penanganan hasil pertanian sejak panen hingga sampai ke tangan konsumen. Setelah dipanen, komoditas pertanian seperti buah, sayuran, dan hasil hortikultura lainnya masih berada dalam kondisi hidup, sehingga tetap mengalami proses fisiologis yang dapat memengaruhi kualitasnya. Oleh karena itu, diperlukan suatu pendekatan teknologi yang tepat untuk mengendalikan perubahan tersebut agar mutu produk tetap terjaga. Teknologi pascapanen menjadi komponen penting dalam sistem pangan karena berperan sebagai penghubung antara kegiatan produksi di tingkat budidaya dan konsumsi oleh masyarakat (Karadiguddi, n.d.).

Ruang lingkup teknologi pascapanen mencakup berbagai tahapan yang saling berkaitan dan tidak dapat dipisahkan satu sama lain. Tahapan tersebut dimulai dari penanganan awal (*handling*), seperti sortasi dan grading, yang bertujuan untuk memisahkan produk berdasarkan tingkat kematangan, ukuran, dan kualitas. Selanjutnya, proses penyimpanan dilakukan untuk mempertahankan kesegaran dan memperlambat laju kerusakan. Pengemasan dan transportasi juga merupakan bagian penting dalam menjaga kondisi produk selama distribusi, sehingga produk tetap dalam keadaan baik saat sampai ke konsumen.

Tujuan utama dari penerapan teknologi pascapanen adalah untuk mempertahankan mutu produk, baik dari aspek fisik, kimia, maupun mikrobiologis. Mutu fisik meliputi penampilan, warna, tekstur, dan kesegaran, sedangkan mutu kimia berkaitan dengan kandungan gizi dan senyawa penting lainnya. Selain itu, aspek mikrobiologis juga perlu diperhatikan untuk menjamin keamanan pangan. Teknologi pascapanen juga bertujuan memperpanjang umur simpan produk sehingga dapat didistribusikan dalam jangkauan yang lebih luas tanpa mengalami kerusakan yang signifikan.

Berbagai metode dalam teknologi pascapanen dirancang untuk mengendalikan proses fisiologis dan faktor lingkungan yang dapat menyebabkan kerusakan. Pendinginan merupakan salah satu metode yang paling umum digunakan untuk menurunkan laju respirasi dan aktivitas mikroorganisme. Selain itu, penyimpanan dengan atmosfer terkendali (*controlled atmosphere storage*) dapat memperlambat proses pematangan dengan mengatur komposisi gas di sekitar produk. Pengemasan juga memiliki peran penting dalam melindungi produk dari kerusakan mekanis, kontaminasi, serta kehilangan air melalui proses transpirasi.

Selain metode penyimpanan, teknologi pengolahan juga menjadi bagian penting dalam sistem pascapanen.

Teknik seperti pengeringan, pengalengan, pembekuan, dan minimal processing dapat digunakan untuk memperpanjang umur simpan sekaligus meningkatkan kepraktisan produk. Diversifikasi produk melalui pengolahan tidak hanya bertujuan untuk mengurangi kehilangan hasil, tetapi juga memberikan nilai tambah secara ekonomi. Produk olahan memiliki peluang pasar yang lebih luas dan dapat meningkatkan pendapatan petani serta pelaku usaha di sektor agribisnis.

Penerapan teknologi pascapanen secara keseluruhan berperan penting dalam mengurangi kehilangan hasil (*postharvest losses*) yang masih cukup tinggi, terutama di negara berkembang. Kehilangan hasil ini dapat disebabkan oleh kerusakan fisik, aktivitas mikroorganisme, maupun penanganan yang kurang tepat. Dengan penerapan teknologi yang sesuai, efisiensi rantai pasok dapat ditingkatkan, keamanan pangan dapat terjamin, dan ketahanan pangan dapat diperkuat. Oleh karena itu, penguasaan teknologi pascapanen menjadi kunci dalam mewujudkan sistem pangan yang berkelanjutan, efisien, dan berdaya saing tinggi.

1.3 Ruang lingkup kajian pascapanen

Ruang lingkup kajian pascapanen mencakup seluruh rangkaian kegiatan yang dilakukan terhadap hasil pertanian sejak saat panen hingga sebelum tahap pengolahan. Dengan demikian, batasan pascapanen difokuskan pada upaya penanganan produk segar (*fresh produce*) untuk mempertahankan mutu, memperpanjang umur simpan, dan meminimalkan kehilangan hasil. Tahapan ini merupakan bagian krusial dalam sistem agribisnis karena sangat menentukan kualitas akhir produk yang diterima konsumen, baik dari segi fisik, kimia, maupun mikrobiologis.

Secara umum, ruang lingkup pascapanen meliputi pemanenan dengan penentuan waktu dan cara panen yang tepat, penanganan awal (*handling*) seperti sortasi, grading, dan pembersihan, serta penyimpanan dengan pengendalian suhu, kelembaban, dan komposisi atmosfer. Selain itu, pengemasan berperan dalam melindungi produk dari kerusakan mekanis dan kontaminasi, sementara transportasi dan distribusi bertujuan menjaga mutu selama proses pengiriman. Seluruh tahapan ini dirancang untuk mengendalikan laju perubahan fisiologis dan mencegah kerusakan yang dapat menurunkan kualitas produk segar.

Dalam penerapannya, prinsip-prinsip pascapanen memiliki dua pendekatan, yaitu bersifat umum dan spesifik. Secara umum, terdapat prinsip dasar yang berlaku untuk berbagai komoditas, seperti pengendalian suhu, kelembaban, dan penanganan yang hati-hati untuk mengurangi kerusakan mekanis. Namun, setiap komoditas memiliki karakteristik yang berbeda sehingga memerlukan perlakuan khusus. Pada komoditas hortikultura, misalnya buah dan sayuran, penanganan difokuskan pada pengendalian respirasi dan transpirasi melalui pendinginan dan pengemasan. Sementara itu, pada komoditas umbi-umbian seperti kentang dan singkong, penanganan lebih menekankan pada pengendalian luka mekanis, proses curing (penyembuhan luka), serta penyimpanan pada kondisi kering untuk mencegah pembusukan. Pada komoditas sereal seperti padi dan jagung, fokus utama adalah penurunan kadar air melalui pengeringan hingga mencapai kadar aman simpan, serta perlindungan dari hama gudang selama penyimpanan. Dengan demikian, meskipun terdapat prinsip umum yang sama, setiap komoditas memerlukan pendekatan pascapanen yang spesifik sesuai dengan sifat fisiologis dan karakteristiknya.

1.4 Peranan pascapanen dalam sistem pangan

Pascapanen memegang peranan yang sangat penting dalam sistem pangan, terutama dalam menjamin ketersediaan, kualitas, dan keamanan bahan pangan hingga sampai ke konsumen. Setelah proses produksi di tingkat budidaya, hasil pertanian masih menghadapi berbagai risiko kerusakan yang dapat menurunkan mutu dan kuantitas. Kehilangan hasil pascapanen (*postharvest losses*) pada komoditas hortikultura bahkan dapat mencapai 20–50%, terutama di negara berkembang yang memiliki keterbatasan dalam infrastruktur, teknologi, dan manajemen penanganan. Kondisi ini menunjukkan bahwa keberhasilan produksi pertanian belum sepenuhnya menjamin ketersediaan pangan apabila tidak didukung oleh sistem pascapanen yang baik.

Penerapan teknologi pascapanen yang tepat memungkinkan berbagai permasalahan tersebut dapat diminimalkan. Penanganan yang baik mampu mengurangi kehilangan hasil, menjaga kualitas fisik serta kandungan gizi produk, dan memperpanjang umur simpan sehingga produk dapat didistribusikan lebih luas dalam jangka waktu yang lebih lama. Selain itu, penerapan teknologi pascapanen juga berkontribusi dalam meningkatkan nilai tambah produk melalui perbaikan mutu dan penampilan, yang pada akhirnya meningkatkan daya saing di pasar. Aspek keamanan pangan turut menjadi perhatian penting, karena penanganan yang tepat dapat mengurangi risiko kontaminasi mikroba maupun kerusakan yang dapat membahayakan konsumen. Dengan demikian, sektor pascapanen berperan sebagai penghubung strategis antara tahap produksi dan konsumsi dalam sistem pangan. Pascapanen tidak hanya berfungsi mempertahankan hasil yang telah diproduksi, tetapi juga berkontribusi dalam efisiensi distribusi, stabilitas pasokan, serta peningkatan kesejahteraan petani dan pelaku usaha. Dalam konteks

ketahanan pangan, penguatan sistem pascapanen menjadi langkah penting untuk memastikan bahwa pangan yang tersedia tidak hanya cukup secara kuantitas, tetapi juga berkualitas dan aman untuk dikonsumsi.

Selain itu, peranan pascapanen juga sangat erat kaitannya dengan efisiensi rantai pasok pangan (*food supply chain*). Penanganan pascapanen yang baik memungkinkan produk pertanian dapat dipindahkan dari produsen ke konsumen dengan kehilangan yang minimal. Proses seperti sortasi, grading, pengemasan, penyimpanan, dan transportasi yang tepat akan membantu menjaga keseragaman mutu serta mempermudah distribusi (Kader et al., 2002). Dengan demikian, sistem logistik pangan menjadi lebih efisien dan mampu memenuhi kebutuhan pasar secara berkelanjutan.

Di sisi lain, penerapan teknologi pascapanen juga berperan dalam diversifikasi dan pengolahan produk pangan. Komoditas yang mudah rusak dapat diolah menjadi produk dengan umur simpan lebih panjang, seperti pengeringan, pengalengan, atau fermentasi. Upaya ini tidak hanya mengurangi kehilangan hasil, tetapi juga membuka peluang pengembangan industri pangan berbasis hasil pertanian. Diversifikasi produk ini penting dalam meningkatkan nilai ekonomi serta memberikan variasi pilihan bagi konsumen.

Lebih lanjut, penguatan sektor pascapanen turut mendukung pembangunan pertanian berkelanjutan (*sustainable agriculture*). Dengan mengurangi kehilangan hasil dan meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber daya, sistem pascapanen berkontribusi dalam menekan pemborosan pangan (*food waste*). Hal ini sejalan dengan upaya global dalam menjaga ketahanan pangan dan kelestarian lingkungan. Oleh karena itu, pengembangan teknologi dan manajemen pascapanen yang tepat menjadi salah satu strategi penting dalam mewujudkan sistem pangan yang tangguh, efisien, dan berkelanjutan.

1.5 Tantangan pascapanen di daerah tropika

Daerah tropika menghadapi tantangan yang lebih kompleks dalam penanganan pascapanen dibandingkan daerah subtropika. Kondisi lingkungan yang ditandai oleh suhu tinggi dan kelembaban relatif tinggi mempercepat berbagai proses fisiologis dan mikrobiologis pada komoditas pertanian. Akibatnya, produk segar seperti buah, sayuran, dan komoditas lainnya menjadi lebih cepat mengalami penurunan mutu dan kerusakan. Selain itu, intensitas aktivitas mikroorganisme yang lebih tinggi pada kondisi lembab turut memperbesar risiko pembusukan dan kehilangan hasil.

Berbagai tantangan utama dalam pascapanen di daerah tropika meliputi laju respirasi yang tinggi akibat suhu lingkungan yang panas, sehingga metabolisme berlangsung lebih cepat dan umur simpan menjadi lebih pendek. Kehilangan air melalui proses transpirasi juga lebih besar, yang menyebabkan penurunan berat dan kesegaran produk. Di sisi lain, kondisi lingkungan yang lembab sangat mendukung pertumbuhan jamur dan bakteri penyebab kerusakan. Tantangan ini semakin diperparah oleh keterbatasan infrastruktur, seperti kurangnya fasilitas rantai dingin (*cold chain*), penyimpanan yang memadai, serta sistem transportasi yang belum optimal. Selain itu, praktik penanganan yang masih bersifat tradisional dan belum berbasis teknologi turut menyebabkan tingginya tingkat kehilangan hasil.

Untuk mengatasi berbagai permasalahan tersebut, diperlukan upaya yang terintegrasi dan berkelanjutan. Penerapan inovasi teknologi pascapanen, seperti penggunaan pendinginan, pengemasan yang tepat, dan sistem penyimpanan yang efisien, menjadi langkah penting dalam menekan laju kerusakan. Selain itu, peningkatan kapasitas sumber daya manusia melalui pelatihan dan penyuluhan juga sangat diperlukan agar pelaku usaha

mampu menerapkan teknik penanganan yang baik. Penguatan sistem distribusi dan logistik, termasuk pengembangan rantai dingin, menjadi faktor kunci dalam menjaga mutu produk hingga ke konsumen. Dengan pendekatan terpadu, tantangan pascapanen di daerah tropika dapat diminimalkan sehingga mendukung efisiensi sistem pangan secara keseluruhan.

Selain faktor lingkungan dan infrastruktur, aspek penanganan pascapanen di tingkat petani dan pelaku usaha juga menjadi tantangan penting di daerah tropika. Kurangnya pengetahuan mengenai teknik panen yang tepat, seperti waktu panen optimal dan cara penanganan yang hati-hati, seringkali menyebabkan kerusakan mekanis sejak awal. Luka pada produk dapat mempercepat kehilangan air dan menjadi pintu masuk bagi mikroorganisme patogen. Oleh karena itu, penerapan *Good Handling Practices* (GHP) menjadi sangat penting untuk menjaga kualitas produk sejak tahap awal pascapanen (Direktorat et al., 2004; Kader et al., 2002).

Selain itu, keterbatasan akses terhadap teknologi dan pembiayaan juga menjadi hambatan dalam penerapan teknologi pascapanen yang lebih modern. Banyak pelaku usaha kecil masih menggunakan metode tradisional karena keterbatasan modal dan fasilitas. Padahal, penggunaan teknologi sederhana seperti penyimpanan bersuhu rendah, pengemasan yang sesuai, dan ventilasi yang baik dapat secara signifikan mengurangi kehilangan hasil. Dukungan kebijakan pemerintah dan akses terhadap teknologi menjadi faktor penting dalam meningkatkan efisiensi sistem pascapanen di daerah tropika.

Di sisi lain, perubahan iklim juga memberikan tantangan tambahan dalam penanganan pascapanen. Peningkatan suhu dan perubahan pola curah hujan dapat mempercepat kerusakan komoditas serta meningkatkan ketidakpastian dalam distribusi pangan. Kondisi ini menuntut adanya inovasi teknologi yang adaptif serta sistem

manajemen pascapanen yang lebih tangguh. Dengan integrasi antara teknologi, kebijakan, dan peningkatan kapasitas sumber daya manusia, sistem pascapanen di daerah tropika dapat dikembangkan secara berkelanjutan untuk mendukung ketahanan pangan.

RANGKUMAN

Fisiologi dan teknologi pascapanen merupakan bidang penting dalam sistem pertanian yang mempelajari serta mengelola perubahan yang terjadi pada komoditas setelah panen. Secara fisiologis, produk pertanian seperti buah, sayuran, dan umbi masih merupakan jaringan hidup yang terus melakukan aktivitas metabolisme, termasuk respirasi, transpirasi, pematangan, dan senescence. Proses-proses ini bersifat dinamis dan sangat memengaruhi kualitas produk, baik dari segi tekstur, rasa, warna, maupun nilai gizi. Laju respirasi yang tinggi dapat mempercepat penurunan mutu, sementara transpirasi menyebabkan kehilangan air yang berdampak pada kesegaran. Oleh karena itu, diperlukan penerapan teknologi pascapanen sebagai upaya untuk mengendalikan perubahan tersebut melalui berbagai teknik seperti pendinginan, pengemasan, penyimpanan, dan transportasi yang tepat. Ruang lingkup pascapanen mencakup seluruh kegiatan sejak panen hingga sebelum pengolahan, termasuk sortasi, grading, dan distribusi. Peran pascapanen sangat strategis dalam sistem pangan karena dapat mengurangi kehilangan hasil yang cukup tinggi, menjaga kualitas dan keamanan pangan, serta meningkatkan nilai tambah produk. Di daerah tropika, tantangan pascapanen semakin kompleks akibat suhu dan kelembaban yang tinggi yang mempercepat kerusakan serta meningkatkan aktivitas mikroorganisme. Oleh karena itu, penerapan teknologi yang tepat, peningkatan infrastruktur, serta penguatan sumber daya manusia menjadi kunci dalam mengoptimalkan sistem pascapanen guna mendukung

ketahanan pangan, efisiensi distribusi, dan kesejahteraan pelaku usaha pertanian.

TES FORMATIF

Jawablah setiap pertanyaan berikut dengan uraian yang jelas, sistematis, dan menggunakan konsep dari Bab 1 Fisiologi dan Teknologi Pascapanen.

Petunjuk: Setiap soal essay memiliki bobot nilai 20 poin. Total nilai bagian ini adalah 100 poin.

1. Topik 1: Fisiologi Pascapanen-Proses Biologis pada Komoditas Setelah Panen
Jelaskan secara komprehensif mengapa komoditas pertanian seperti buah, sayuran, dan umbi masih dianggap sebagai jaringan hidup setelah dipanen. Uraikan minimal empat proses fisiologis utama yang masih berlangsung, serta bagaimana masing-masing proses tersebut berpengaruh terhadap kualitas dan umur simpan produk pertanian!
2. Topik 2: Teknologi pascapanen-Metode dan Tujuan Penanganan
Teknologi pascapanen mencakup berbagai metode penanganan mulai dari panen hingga produk sampai ke konsumen. Analisislah tujuan utama teknologi pascapanen dan uraikan minimal lima metode teknologi pascapanen yang dapat diterapkan, beserta mekanisme kerja dan manfaat masing-masing metode tersebut dalam mempertahankan mutu produk pertanian!
3. Topik 3: Ruang lingkup dan Peranan Pascapanen dalam Sistem Pangan
Uraikan secara mendalam peranan pascapanen sebagai penghubung strategis antara tahap produksi dan konsumsi dalam sistem pangan. Sertakan analisis mengenai dampak kehilangan hasil pascapanen (*postharvest losses*) terhadap ketahanan pangan, serta

bagaimana penerapan teknologi pascapanen dapat berkontribusi dalam mengurangi kehilangan tersebut!

4. Topik: Karakteristik Komoditas Pertanian dan Tantangan Pascapanen

Komoditas pertanian memiliki karakteristik khusus yang membedakannya dari produk industri. Jelaskan karakteristik umum hasil pertanian yang mempengaruhi penanganan pascapanen, kemudiam bandingkan pendekatan pascapanen yang sesuai untuk tiga jenis komoditas berbeda: buah/sayuran (hortikultura), umbi-umbian, dan serelia!

5. Topik: Tantangan Pascapanen di Daerah Tropika dan Solusinya

Daerah tropika memiliki kondisi lingkungan yang unik sehingga menimbulkan tantangan lebih kompleks dalam penanganan pascapanen. Identifikasi dan analisislah minimal lima tantangan utama pascapanen di daerah tropika, kemudian rumuskan solusi inovatif dan berkelanjutan untuk setiap tantangan tersebut berdasarkan konsep fisiologi dan teknologi pascapanen!

Latihan Project-Based Learning (PjBL)

Latihan PjBL dirancang untuk mengembangkan kemampuan berpikir kritis, kolaborasi, dan pemecahan masalah nyata berdasarkan konsep Bab 1 Fisiologi dan Teknologi Pascapanen.

Petunjuk: Kerjakan setiap proyek secara berkelompok (3-5 mahasiswa). Setiap proyek menghasilkan output yang telah ditentukan dan dipresentasikan di depan kelas.

Proyek PjBL : Investigasi Lapangan Kehilangan Pascapanen

Aspek	Keterangan
Tema Proyek	Analisis Kehilangan Pascapanen Komoditas Lokal di Pasar Tradisional
Durasi	2 minggu
Anggota Tim	3–5 mahasiswa

Deskripsi Proyek:

Mahasiswa melakukan investigasi langsung di pasar tradisional atau sentra distribusi pertanian untuk mengidentifikasi dan menganalisis jenis, penyebab, dan besaran kehilangan pascapanen pada komoditas hortikultura lokal.

Tahapan Kerja:

1. Perencanaan: Pilih 2 komoditas hortikultura lokal (contoh: tomat, pisang, atau cabai). Susun instrumen observasi dan wawancara.
2. Pengumpulan Data: Kunjungi pasar tradisional/sentra distribusi. Lakukan pengamatan visual, wawancara pedagang, dan dokumentasi foto.
3. Analisis: Identifikasi jenis kerusakan (mekanis, fisiologis, mikrobiologis). Hitung estimasi persentase kehilangan. Kaitkan dengan konsep respirasi, transpirasi, dan senescence.
4. Rekomendasi: Rumuskan minimal 3 teknologi pascapanen sederhana yang dapat diterapkan untuk mengurangi kehilangan.

Output Proyek:

- Laporan tertulis (minimal 1500 kata) berisi latar belakang, metode, hasil observasi, analisis, dan rekomendasi.
- Dokumentasi foto lapangan (minimal 10 foto dengan keterangan).
- Presentasi kelompok 10-15 menit.

DAFTAR PUSTAKA

- Awasthi, P., Singh, S. C., & Kumar, R. (2024). *Technology Of Postharvest Horticultural Crops*. Elite Publishing House.
- Diane M. Barret, Laszlo Somogyi, H. R. (2004). *Processing Fruits*. CRC PRESS Boca.
- Direktorat, Pemasaran, D. A. N., Hortikultura, H., Bina, D., Dan, P., Hasil, P., & Pertanian, D. (2004). *GOOD Handling Practices : Komoditi Hortikultura*.
- Kader, A. A., Cook, R. L., Bruhn, C. M., Reid, M. S., & Thompson, J. F. (2002). *Postharvest Technology of Horticulture Crops* (Issue 530). *etables*. 9–17.

BAB 2

KARAKTERISTIK FISILOGIS HASIL PERTANIAN

DESKRIPSI PEMBELAJARAN

Bab 2 membahas karakteristik fisiologis hasil pertanian sebagai dasar penting dalam memahami perubahan yang terjadi setelah panen. Hasil pertanian merupakan bahan hidup yang masih melakukan proses fisiologis seperti respirasi, transpirasi, dan aktivitas enzimatik, sehingga sangat memengaruhi mutu dan umur simpan. Pembahasan dimulai dari struktur dan jaringan hasil pertanian yang meliputi susunan sel serta jenis jaringan seperti parenkim, kolenkim, dan sklerenkim yang berperan dalam menentukan tekstur, kekuatan, serta ketahanan terhadap kerusakan. Selanjutnya, dijelaskan komposisi kimia hasil pertanian yang mencakup kandungan air, karbohidrat, protein, lemak, vitamin, mineral, serta senyawa volatil yang memengaruhi nilai gizi, rasa, dan aroma. Kandungan air dan aktivitas air (aw) juga menjadi fokus karena berhubungan erat dengan stabilitas produk dan potensi pertumbuhan mikroorganisme. Selain itu, aktivitas enzim dibahas sebagai pemicu reaksi biokimia seperti pematangan, pelunakan, dan pencoklatan yang sering terjadi selama penyimpanan. Aktivitas metabolisme komoditas seperti respirasi dan produksi etilen turut menentukan laju kemunduran mutu produk. Pada bagian akhir, diuraikan berbagai faktor yang memengaruhi sifat

fisiologis komoditas, baik faktor internal seperti varietas, umur panen, dan tingkat kematangan, maupun faktor eksternal seperti suhu, kelembaban relatif, komposisi gas di lingkungan penyimpanan, serta perlakuan pascapanen. Dengan memahami karakteristik fisiologis ini, diharapkan pembaca mampu menerapkan teknik penanganan pascapanen yang tepat untuk mempertahankan kualitas, memperpanjang umur simpan, dan meminimalkan kehilangan hasil.

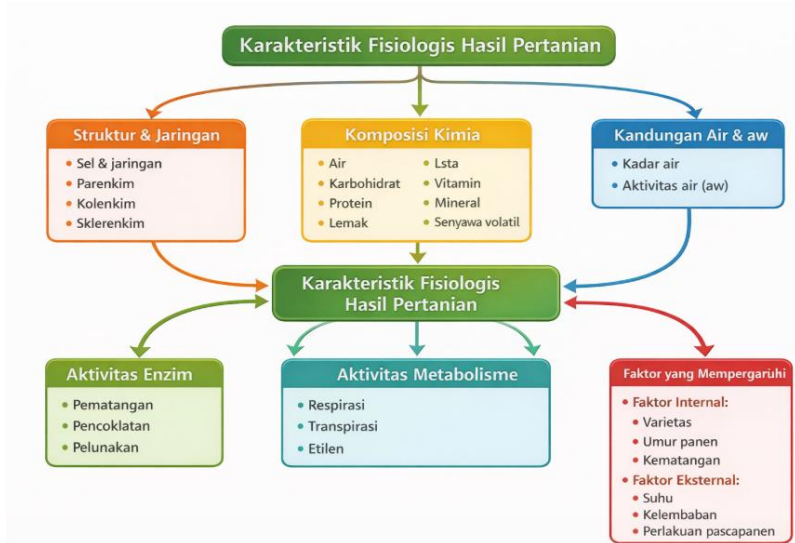
KOMPETENSI PEMBELAJARAN

Setelah mengikuti bab 2 Karakteristik Fisiologis Hasil Pertanian ini diharapkan mahasiswa memiliki pengetahuan dan kemampuan:

1. Mahasiswa mampu menjelaskan struktur dan jaringan hasil pertanian serta kaitannya dengan sifat fisik dan ketahanan komoditas.
2. Mahasiswa mampu mengidentifikasi dan menjelaskan komposisi kimia hasil pertanian serta pengaruhnya terhadap nilai gizi dan mutu produk.
3. Mahasiswa mampu menjelaskan kandungan air dan konsep aktivitas air (aw) serta hubungannya dengan daya simpan dan pertumbuhan mikroorganisme.
4. Mahasiswa mampu menjelaskan peran dan mekanisme aktivitas enzim dalam perubahan fisiologis hasil pertanian selama penyimpanan.
5. Mahasiswa mampu menganalisis aktivitas metabolisme komoditas, seperti respirasi dan produksi etilen, serta dampaknya terhadap kualitas hasil pertanian.

Mahasiswa mampu mengidentifikasi dan mengevaluasi faktor-faktor internal dan eksternal yang memengaruhi sifat fisiologis hasil pertanian dalam penanganan pascapanen.

PETA KONSEP PEMBELAJARAN



2.1 Struktur dan Jaringan Hasil Pertanian

Struktur dan jaringan hasil pertanian merupakan aspek fundamental yang menentukan sifat fisik, fisiologis, dan ketahanan komoditas selama penanganan pascapanen. Secara umum, hasil pertanian tersusun atas sel-sel yang membentuk jaringan tertentu dengan fungsi spesifik. Sel tumbuhan memiliki komponen utama seperti dinding sel, membran plasma, sitoplasma, dan vakuola yang berperan dalam menjaga integritas jaringan. Dinding sel yang tersusun dari selulosa, hemiselulosa, pektin, dan lignin memberikan kekuatan mekanis serta menentukan tekstur produk, sehingga sangat berpengaruh terhadap ketahanan

terhadap tekanan, benturan, dan kerusakan selama distribusi (Kader et al., 2002)

Jaringan parenkim merupakan jaringan yang paling dominan pada sebagian besar hasil pertanian. Jaringan ini tersusun dari sel-sel hidup yang berdinding tipis dan berfungsi sebagai tempat penyimpanan cadangan makanan seperti karbohidrat, air, dan metabolit lainnya. Selain itu, jaringan parenkim juga berperan dalam proses metabolisme seperti respirasi dan sintesis senyawa tertentu. Karena sifatnya yang lunak dan banyak mengandung air, jaringan ini sangat rentan terhadap kerusakan mekanis dan serangan mikroorganisme, yang dapat mempercepat penurunan mutu selama penyimpanan.

Selain parenkim, jaringan kolenkim juga memiliki peran penting dalam memberikan dukungan struktural pada hasil pertanian, terutama pada bagian yang masih aktif tumbuh. Sel-sel kolenkim memiliki dinding yang lebih tebal dibandingkan parenkim, tetapi masih bersifat fleksibel. Hal ini memungkinkan komoditas memiliki elastisitas tertentu sehingga dapat menahan tekanan tanpa mudah rusak. Namun, pada tahap pascapanen, fungsi jaringan ini menjadi terbatas karena aktivitas pertumbuhan sudah berhenti.

Jaringan sklerenkim merupakan jaringan penguat yang memiliki dinding sel sangat tebal dan mengandung lignin, sehingga bersifat keras dan kaku. Jaringan ini berfungsi memberikan kekuatan mekanis yang tinggi dan melindungi bagian dalam komoditas. Contohnya dapat ditemukan pada kulit keras atau bagian biji. Keberadaan jaringan sklerenkim dapat meningkatkan ketahanan terhadap kerusakan fisik, tetapi dalam beberapa kasus juga dapat memengaruhi tekstur yang kurang disukai konsumen, terutama jika terlalu keras.

Struktur jaringan hasil pertanian juga sangat berkaitan dengan sistem transportasi internal, yaitu jaringan xilem dan floem. Xilem berfungsi mengangkut air dan mineral dari akar ke bagian atas tanaman, sedangkan floem

mengangkut hasil fotosintesis ke seluruh bagian tanaman. Setelah panen, aktivitas transportasi ini memang berhenti, tetapi struktur jaringan tersebut tetap memengaruhi distribusi air dan zat terlarut di dalam jaringan, yang pada akhirnya berpengaruh terhadap proses pelayuan, kehilangan air, dan perubahan mutu selama penyimpanan. Selain itu, tekanan turgor sel merupakan faktor penting yang memengaruhi tekstur dan kekerasan hasil pertanian. Tekanan turgor terjadi akibat masuknya air ke dalam sel melalui proses osmosis sehingga sel menjadi tegang dan mempertahankan bentuknya. Pada kondisi segar, tekanan turgor yang tinggi memberikan sifat renyah dan keras, sedangkan penurunan tekanan turgor menyebabkan jaringan menjadi layu dan lunak. Selama proses pematangan dan penyimpanan, tekanan turgor mengalami perubahan akibat kehilangan air serta perubahan komposisi dinding sel. Dinding sel secara kimiawi tersusun atas selulosa sebagai kerangka utama, hemiselulosa sebagai pengikat, zat pektik yang menjaga kekompakan antar sel, serta lignin yang memberikan kekakuan. Selama pematangan, degradasi zat pektik oleh enzim menyebabkan pelunakan jaringan, sehingga bersama dengan penurunan tekanan turgor akan mempercepat penurunan mutu hasil pertanian.

Selain komponen struktural dinding sel, keberadaan karbohidrat seperti selulosa dan hemiselulosa juga berperan penting sebagai penyusun utama jaringan pendukung pada hasil pertanian. Senyawa ini bersifat tidak larut dalam air dan berfungsi memberikan kekuatan serta stabilitas jaringan tanaman. Di sisi lain, senyawa pektik yang terdapat di antara dinding sel berfungsi sebagai “perekat” antar sel sehingga menjaga kekompakan jaringan. Selama proses pematangan, pektin mengalami perubahan dari bentuk tidak larut menjadi larut akibat aktivitas enzim, yang menyebabkan jaringan menjadi lebih lunak dan mudah mengalami kerusakan. Oleh karena itu, komposisi dan perubahan kimiawi dinding sel sangat menentukan sifat tekstur dan

ketahanan hasil pertanian selama penyimpanan. Disamping itu, kandungan air dalam jaringan hasil pertanian juga memiliki peran yang sangat besar dalam mempertahankan struktur sel melalui tekanan turgor. Sebagian besar jaringan hasil pertanian mengandung air dalam jumlah tinggi, bahkan dapat mencapai lebih dari 80–95%, sehingga struktur dan kesegarannya sangat bergantung pada keseimbangan air di dalam sel. Kehilangan air akibat proses transpirasi setelah panen akan menyebabkan penurunan tekanan turgor, yang berdampak pada pelayuan, penyusutan, dan penurunan kerenyahan jaringan. Hal ini menunjukkan bahwa pengendalian kehilangan air menjadi faktor kunci dalam mempertahankan mutu hasil pertanian, karena perubahan kecil pada kandungan air dapat secara signifikan memengaruhi tekstur, penampilan, dan daya simpan komoditas selama penanganan pascapanen. (Gopinadhan, *et al.*, 2008)

2.2 Komposisi Kimia Hasil Pertanian

Komposisi kimia hasil pertanian merupakan faktor penting yang menentukan nilai gizi, mutu, serta daya simpan komoditas setelah panen. Secara umum, hasil pertanian tersusun atas air, karbohidrat, protein, lemak, vitamin, mineral, serta senyawa bioaktif lainnya. Proporsi masing-masing komponen tersebut sangat bervariasi tergantung pada jenis komoditas, tingkat kematangan, serta kondisi lingkungan selama pertumbuhan dan penyimpanan. Pemahaman mengenai komposisi kimia ini sangat penting karena perubahan pada komponen tersebut akan berdampak langsung terhadap kualitas fisik, kimia, dan sensori produk. (Diane, *et al.*, 2004; Gopinadhan, *et al.*, 2008).

Air merupakan komponen terbesar dalam sebagian besar hasil pertanian, dengan kandungan yang dapat mencapai 70–95%. Tingginya kandungan air ini

menyebabkan hasil pertanian bersifat mudah rusak (perishable) karena mendukung aktivitas mikroorganisme dan reaksi biokimia. Selain itu, air juga berperan sebagai pelarut bagi berbagai zat kimia serta sebagai media berlangsungnya reaksi metabolisme. Oleh karena itu, pengendalian kadar air dan aktivitas air menjadi aspek penting dalam teknologi pascapanen untuk memperpanjang umur simpan komoditas.

Karbohidrat merupakan komponen utama berikutnya yang berperan sebagai sumber energi dan penentu cita rasa. Karbohidrat dalam hasil pertanian dapat berupa gula sederhana, pati, dan serat pangan. Gula sederhana seperti glukosa, fruktosa, dan sukrosa memberikan rasa manis, sedangkan pati merupakan cadangan energi yang dapat mengalami hidrolisis menjadi gula selama proses pematangan. Perubahan komposisi karbohidrat ini sangat memengaruhi rasa, tekstur, dan kualitas produk selama penyimpanan.

Protein dalam hasil pertanian umumnya berfungsi sebagai penyusun struktur sel dan enzim yang mengatur berbagai reaksi metabolisme. Meskipun kandungan protein pada sebagian besar hasil pertanian relatif lebih rendah dibandingkan produk hewani, keberadaannya tetap penting dalam menentukan nilai gizi. Selain itu, protein juga dapat mengalami perubahan selama penyimpanan, seperti denaturasi atau degradasi, yang dapat memengaruhi tekstur dan kualitas produk.

Lemak merupakan komponen kimia yang berperan sebagai sumber energi dan pembentuk cita rasa, meskipun jumlahnya relatif kecil pada sebagian besar hasil pertanian. Lemak juga berfungsi sebagai pelarut vitamin yang larut dalam lemak, seperti vitamin A, D, E, dan K. Namun, lemak sangat rentan terhadap oksidasi yang dapat menyebabkan ketengikan (*rancidity*), sehingga memengaruhi aroma dan kualitas produk selama penyimpanan. Oleh karena itu,

pengendalian oksigen dan suhu sangat penting untuk menjaga stabilitas komponen lemak.

Selain komponen utama tersebut, hasil pertanian juga mengandung vitamin, mineral, dan senyawa bioaktif seperti pigmen dan senyawa volatil. Vitamin dan mineral berperan dalam menjaga nilai gizi, sedangkan pigmen seperti klorofil, karotenoid, dan antosianin menentukan warna produk. Senyawa volatil berkontribusi terhadap aroma khas yang memengaruhi penerimaan konsumen. Selama penyimpanan, komponen-komponen ini dapat mengalami degradasi akibat faktor lingkungan seperti suhu, cahaya, dan oksigen, sehingga diperlukan penanganan pascapanen yang tepat untuk mempertahankan kualitas dan nilai gizi hasil pertanian. (Diane, *et al.*, 2004)

Berikut penjelasan masing-masing komposisi dominan pada komoditas hasil pertanian serta kaitannya dengan penyimpanan (Ika Gusriani, *et al.*, 2024):

1. Komoditas hasil pertanian dengan kandungan air tinggi, seperti sayuran daun dan beberapa buah segar, umumnya memiliki sifat sangat mudah rusak karena aktivitas fisiologis dan mikrobiologis yang tinggi. Kandungan air yang besar mendukung laju respirasi dan transpirasi, sehingga selama penyimpanan komoditas ini cepat mengalami pelayuan, penyusutan bobot, serta penurunan kesegaran. Oleh karena itu, pengendalian suhu dan kelembaban relatif sangat penting untuk mempertahankan tekanan turgor dan memperlambat kehilangan air selama penyimpanan.
2. Komoditas yang didominasi oleh karbohidrat, seperti umbi-umbian dan biji-bijian, cenderung memiliki daya simpan yang lebih lama dibandingkan komoditas berkadar air tinggi. Pada umbi, karbohidrat umumnya tersimpan dalam bentuk pati yang dapat mengalami hidrolisis menjadi gula selama penyimpanan, terutama pada suhu rendah atau kondisi tertentu. Perubahan ini dapat memengaruhi rasa menjadi lebih manis atau

bahkan menyebabkan kerusakan fisiologis seperti pencoklatan. Pada biji-bijian, kandungan pati yang tinggi mendukung stabilitas selama penyimpanan, namun tetap rentan terhadap serangan hama dan jamur jika kadar air tidak dikendalikan.

3. Komoditas dengan kandungan protein relatif tinggi, seperti kacang-kacangan dan beberapa biji, memiliki karakteristik penyimpanan yang dipengaruhi oleh stabilitas protein dan aktivitas enzim. Selama penyimpanan, protein dapat mengalami denaturasi atau degradasi yang dapat memengaruhi nilai gizi dan sifat fungsionalnya. Selain itu, interaksi antara protein dan komponen lain seperti air juga dapat memicu perubahan tekstur, terutama jika kondisi penyimpanan tidak optimal.
4. Komoditas yang mengandung lemak dalam jumlah lebih tinggi, seperti kacang tanah, kelapa, dan beberapa biji minyak, sangat rentan terhadap reaksi oksidasi lemak. Selama penyimpanan, oksidasi ini dapat menyebabkan ketengikan yang ditandai dengan perubahan aroma dan rasa yang tidak diinginkan. Proses ini dipercepat oleh adanya oksigen, cahaya, dan suhu tinggi. Oleh karena itu, penyimpanan komoditas berlemak memerlukan kondisi yang terkontrol, seperti penggunaan kemasan kedap udara dan suhu rendah untuk memperlambat reaksi oksidasi.
5. Komoditas yang kaya akan vitamin dan senyawa bioaktif, seperti buah-buahan berwarna cerah, sangat sensitif terhadap kondisi lingkungan selama penyimpanan. Vitamin, khususnya vitamin C, mudah mengalami degradasi akibat paparan oksigen, cahaya, dan suhu tinggi. Demikian pula, pigmen alami seperti klorofil, karotenoid, dan antosianin dapat mengalami perubahan yang menyebabkan penurunan kualitas warna dan daya tarik produk. Oleh karena itu, pengendalian kondisi penyimpanan sangat penting

untuk mempertahankan kandungan nutrisi dan kualitas sensori komoditas.

6. Komoditas dengan kandungan mineral dan serat pangan yang tinggi umumnya lebih stabil secara kimia selama penyimpanan, karena mineral tidak mudah rusak oleh proses fisiologis. Namun demikian, perubahan struktur jaringan akibat kehilangan air atau degradasi komponen lain dapat memengaruhi ketersediaan dan distribusi mineral dalam jaringan. Serat pangan juga berperan dalam mempertahankan struktur fisik komoditas, tetapi selama penyimpanan dapat mengalami perubahan yang memengaruhi tekstur, seperti pelunakan atau pengerasan jaringan. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun relatif stabil, komponen ini tetap berkontribusi terhadap perubahan mutu selama penyimpanan.

2.3 Kandungan air dan aktivitas air

Kandungan air merupakan komponen utama dalam sebagian besar hasil pertanian dan sangat menentukan sifat fisik, fisiologis, serta ketahanan produk selama penyimpanan. Secara umum, hasil pertanian mengandung air dalam jumlah tinggi, berkisar antara 70–95%, tergantung pada jenis komoditas dan tingkat kematangan. Air di dalam jaringan berperan sebagai pelarut berbagai senyawa kimia, media reaksi metabolisme, serta penentu tekanan turgor sel yang menjaga kesegaran dan kekerasan jaringan. Oleh karena itu, kandungan air yang tinggi menjadi salah satu penyebab utama sifat mudah rusak pada hasil pertanian

Air dalam jaringan hasil pertanian tidak hanya berperan secara fisik, tetapi juga sangat memengaruhi aktivitas fisiologis seperti respirasi, transpirasi, dan aktivitas enzim. Semakin tinggi kandungan air, maka semakin aktif proses metabolisme yang berlangsung di dalam jaringan. Hal ini menyebabkan laju respirasi meningkat sehingga

cadangan makanan cepat habis dan produk lebih cepat mengalami *senescence* atau penuaan. Selain itu, kandungan air yang tinggi juga menciptakan kondisi yang ideal bagi pertumbuhan mikroorganisme pembusuk (Kader et al., 2002).

Selain jumlahnya, air dalam bahan pangan juga dapat dibedakan berdasarkan bentuk ikatannya, yaitu air bebas dan air terikat. Air bebas merupakan air yang mudah digunakan sebagai media reaksi kimia, aktivitas enzim, serta pertumbuhan mikroorganisme, sedangkan air terikat berada dalam struktur bahan dan tidak mudah digunakan oleh mikroorganisme. Perbedaan ini sangat penting karena tidak semua kandungan air berkontribusi langsung terhadap kerusakan produk. Aktivitas air (*water activity* atau *aw*) pada dasarnya mencerminkan jumlah air bebas tersebut, sehingga menjadi parameter yang lebih akurat dibandingkan kadar air total dalam menentukan stabilitas bahan pangan. (Dewanti et al., 2024)

Selain kandungan air total, konsep aktivitas air (*water activity* atau *aw*) menjadi parameter penting dalam menentukan stabilitas hasil pertanian. Aktivitas air menunjukkan jumlah air bebas yang tersedia untuk reaksi kimia, aktivitas enzim, dan pertumbuhan mikroorganisme. Nilai *aw* berkisar antara 0 hingga 1, di mana semakin tinggi nilai *aw*, semakin besar kemungkinan terjadinya kerusakan akibat aktivitas biologis. Sebagian besar hasil pertanian segar memiliki nilai *aw* yang tinggi (mendekati 1), sehingga sangat rentan terhadap kerusakan selama penyimpanan

Selama penyimpanan, perubahan kandungan air terutama terjadi akibat proses transpirasi, yaitu kehilangan air ke lingkungan. Kehilangan air ini menyebabkan penurunan tekanan turgor sel, yang berdampak pada pelayuan, pengeriputan, dan penurunan kesegaran produk. Selain itu, kehilangan air juga dapat menyebabkan penyusutan bobot yang merugikan secara ekonomi. Faktor lingkungan seperti suhu, kelembaban relatif, dan aliran

udara sangat memengaruhi laju transpirasi, sehingga perlu dikendalikan untuk mempertahankan kualitas hasil pertanian (Kader et al., 2002).

Di sisi lain, aktivitas air juga berperan dalam menentukan pertumbuhan mikroorganisme selama penyimpanan. Mikroorganisme seperti bakteri, khamir, dan kapang membutuhkan air bebas untuk tumbuh dan berkembang. Bakteri umumnya memerlukan nilai aw yang lebih tinggi dibandingkan kapang, sehingga penurunan aw dapat menjadi strategi efektif untuk menghambat pertumbuhan mikroorganisme. Hal ini dapat dilakukan melalui pengeringan, penambahan zat pengikat air, atau pengendalian kelembaban lingkungan penyimpanan.

Selain itu, keberadaan air dalam bahan pangan juga sangat memengaruhi sifat fisik seperti tekstur dan konsistensi. Kandungan air yang tinggi umumnya menghasilkan tekstur yang segar dan renyah, namun juga meningkatkan kerentanan terhadap kerusakan. Sebaliknya, penurunan kandungan air melalui proses pengeringan dapat memperpanjang umur simpan, tetapi dapat menyebabkan perubahan tekstur menjadi keras atau kering. Oleh karena itu, pengendalian kandungan air dan aktivitas air harus dilakukan secara tepat agar keseimbangan antara mutu sensori dan daya simpan produk tetap terjaga.

Dengan demikian, kandungan air dan aktivitas air merupakan faktor kunci yang sangat memengaruhi mutu dan daya simpan hasil pertanian. Pengelolaan kedua aspek ini melalui pengendalian suhu, kelembaban relatif, serta teknik penyimpanan yang tepat dapat memperlambat proses kerusakan, mempertahankan kesegaran, dan memperpanjang umur simpan komoditas. Oleh karena itu, pemahaman mengenai hubungan antara kandungan air, aktivitas air, dan perubahan fisiologis sangat penting dalam penerapan teknologi pascapanen yang efektif. (Kader et al., 2002).

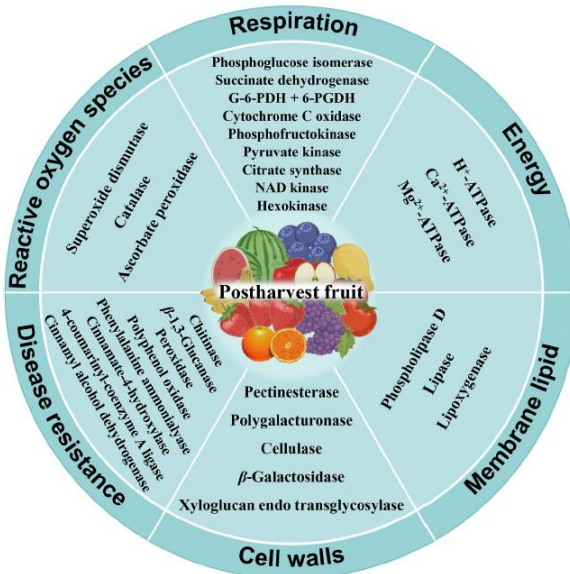
2.4 Aktivitas enzim

Aktivitas enzim merupakan salah satu komponen penting dalam menentukan perubahan fisiologis dan biokimia hasil pertanian setelah panen. Enzim adalah protein biologis yang berfungsi sebagai katalisator dalam berbagai reaksi kimia di dalam sel, seperti respirasi, pematangan, dan degradasi senyawa kompleks. Meskipun hasil pertanian telah dipanen, jaringan masih tetap hidup sehingga aktivitas enzim tetap berlangsung dan bahkan menjadi faktor utama dalam proses perubahan mutu selama penyimpanan. Oleh karena itu, enzim memiliki peran yang sangat signifikan dalam menentukan umur simpan dan kualitas produk. (Kader, 2013)

Selain berperan dalam reaksi fisiologis pascapanen, enzim juga merupakan bagian dari komponen fungsional dalam bahan pangan yang berhubungan erat dengan protein. Enzim sebagai protein spesifik memiliki kemampuan mempercepat reaksi biologis tanpa mengalami perubahan permanen dalam proses tersebut. Dalam bahan pangan, enzim berperan dalam berbagai perubahan kimia seperti pemecahan molekul kompleks menjadi lebih sederhana, misalnya pada proses pematangan dan pembusukan. Aktivitas enzim ini dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan perlakuan yang diberikan pada bahan pangan, seperti pemanasan, penambahan asam atau basa, serta proses pengolahan lainnya yang dapat menyebabkan perubahan struktur protein atau bahkan denaturasi enzim. (Li et al., 2024)

Selama proses pematangan, aktivitas enzim berperan dalam mengubah komponen kimia yang memengaruhi sifat sensori hasil pertanian. Enzim seperti amilase mengubah pati menjadi gula sederhana sehingga meningkatkan rasa manis, sedangkan enzim pektinase dan selulase berperan

dalam degradasi dinding sel yang menyebabkan pelunakan jaringan. Proses ini sangat penting dalam perkembangan kualitas konsumsi, namun jika berlangsung berlebihan selama penyimpanan dapat menyebabkan penurunan mutu seperti tekstur yang terlalu lunak dan tidak menarik.(Li et al., 2024)



Gambar 2. 1. Enzim-enzim yang terlibat dalam berbagai proses fisiologis utama pada buah selama tahap pascapanen. (Li et al., 2024)

Selain itu, aktivitas enzim juga berkaitan erat dengan perubahan komponen penyusun bahan pangan seperti karbohidrat, protein, dan lemak. Enzim dapat mengkatalisis reaksi hidrolisis maupun oksidasi yang berdampak pada perubahan mutu produk, baik yang diinginkan maupun yang merugikan. Misalnya, dalam proses pematangan, enzim membantu meningkatkan kualitas sensori, tetapi dalam

kondisi penyimpanan yang tidak tepat, aktivitas enzim dapat mempercepat kerusakan seperti pembusukan dan penurunan nilai gizi. Oleh karena itu, pemahaman terhadap sifat enzim sebagai bagian dari sistem biologis bahan pangan menjadi penting dalam menentukan metode penanganan pascapanen yang tepat untuk mempertahankan kualitas dan memperpanjang umur simpan .

Selain itu, enzim juga berperan dalam reaksi pencoklatan (*browning*) yang sering terjadi pada hasil pertanian. Enzim polifenol oksidase (PPO) mengkatalisis oksidasi senyawa fenolik menjadi senyawa berwarna coklat ketika jaringan mengalami kerusakan atau terpapar oksigen. Reaksi ini sering ditemukan pada produk yang mengalami luka atau pemotongan, sehingga dapat menurunkan kualitas visual dan daya tarik konsumen. Oleh karena itu, pengendalian aktivitas enzim ini sangat penting dalam penanganan pascapanen.

Aktivitas enzim sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti suhu, pH, ketersediaan oksigen, dan kandungan air. Suhu tinggi umumnya meningkatkan aktivitas enzim hingga mencapai titik optimum, namun suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan denaturasi enzim. Sebaliknya, suhu rendah dapat memperlambat aktivitas enzim sehingga sering digunakan dalam penyimpanan dingin untuk memperpanjang umur simpan hasil pertanian. Selain itu, kadar air dan aktivitas air juga berperan dalam menentukan tingkat aktivitas enzim dalam jaringan.

Selama penyimpanan, aktivitas enzim yang tidak terkendali dapat mempercepat proses kerusakan hasil pertanian. Reaksi enzimatik dapat menyebabkan perubahan warna, tekstur, rasa, dan aroma yang tidak diinginkan. Misalnya, degradasi klorofil oleh enzim dapat menyebabkan perubahan warna hijau menjadi kuning, sementara oksidasi

senyawa lemak oleh enzim lipoksigenase dapat menghasilkan aroma tengik. Oleh karena itu, pengendalian aktivitas enzim menjadi salah satu strategi penting dalam mempertahankan kualitas produk.

Dengan demikian, aktivitas enzim merupakan faktor kunci yang memengaruhi perubahan mutu hasil pertanian selama penyimpanan. Pengendalian aktivitas enzim dapat dilakukan melalui berbagai teknik pascapanen seperti pendinginan, pengurangan oksigen, pengaturan kelembaban, serta perlakuan kimia atau fisik tertentu. Pemahaman yang baik mengenai mekanisme kerja enzim dan faktor-faktor yang memengaruhinya sangat penting dalam upaya mempertahankan kualitas dan memperpanjang umur simpan hasil pertanian.

2.5 Aktivitas metabolisme komoditas

Aktivitas metabolisme komoditas merupakan proses biokimia yang masih berlangsung pada hasil pertanian setelah panen, karena jaringan tanaman tetap hidup meskipun telah dipisahkan dari tanaman induknya. Metabolisme mencakup seluruh reaksi kimia yang terjadi di dalam sel, baik yang bersifat anabolisme (pembentukan senyawa) maupun katabolisme (penguraian senyawa). Proses ini sangat berpengaruh terhadap perubahan mutu selama penyimpanan, karena berkaitan langsung dengan penggunaan cadangan makanan, produksi energi, serta pembentukan senyawa baru yang memengaruhi sifat fisik dan kimia produk (Kader et al., 2002).

Salah satu aktivitas metabolisme utama yang terjadi pada hasil pertanian adalah respirasi. Respirasi merupakan proses penguraian senyawa organik, seperti karbohidrat, menjadi energi, karbon dioksida, dan air. Laju respirasi sangat menentukan kecepatan penurunan mutu komoditas; semakin tinggi laju respirasi, semakin cepat cadangan

makanan habis dan semakin cepat produk mengalami penuaan (senescence). Komoditas dengan laju respirasi tinggi umumnya memiliki umur simpan yang lebih pendek dibandingkan dengan komoditas yang memiliki laju respirasi rendah.(Awasthi et al., 2024)

Selain respirasi, produksi etilen juga merupakan bagian penting dari aktivitas metabolisme yang memengaruhi proses pematangan. Etilen adalah hormon gas yang berperan dalam mengatur pematangan, pelunakan jaringan, perubahan warna, dan pembentukan aroma. Komoditas klimakterik menunjukkan peningkatan tajam dalam produksi etilen dan laju respirasi selama pematangan, sedangkan komoditas non-klimakterik tidak menunjukkan pola tersebut. Keberadaan etilen dalam lingkungan penyimpanan dapat mempercepat pematangan bahkan pada komoditas lain di sekitarnya, sehingga perlu dikendalikan.

Aktivitas metabolisme juga mencakup perubahan senyawa kimia yang memengaruhi kualitas sensori, seperti rasa, warna, dan aroma. Misalnya, pati diubah menjadi gula sederhana yang meningkatkan rasa manis, klorofil terdegradasi sehingga warna hijau berubah menjadi kuning, serta terbentuknya senyawa volatil yang memberikan aroma khas. Meskipun perubahan ini diinginkan pada tahap pematangan konsumsi, proses yang berlanjut selama penyimpanan dapat menyebabkan penurunan kualitas jika tidak dikendalikan.

Faktor lingkungan seperti suhu, kelembaban relatif, komposisi gas (O_2 dan CO_2), serta kerusakan mekanis sangat memengaruhi aktivitas metabolisme komoditas. Suhu rendah dapat memperlambat laju respirasi dan produksi etilen, sehingga sering digunakan dalam penyimpanan dingin untuk memperpanjang umur simpan. Sebaliknya, suhu tinggi dan kerusakan fisik dapat meningkatkan aktivitas metabolisme, yang mempercepat kerusakan produk. Oleh karena itu, pengendalian kondisi lingkungan menjadi kunci dalam manajemen pascapanen.

Dengan demikian, aktivitas metabolisme komoditas merupakan faktor utama yang menentukan perubahan mutu hasil pertanian selama penyimpanan. Pengendalian proses metabolisme melalui teknik seperti pendinginan, pengemasan atmosfer termodifikasi, dan pengendalian etilen dapat membantu memperlambat proses penuaan dan mempertahankan kualitas produk. Pemahaman terhadap aktivitas metabolisme ini sangat penting dalam merancang strategi penanganan pascapanen yang efektif untuk memperpanjang umur simpan dan menjaga mutu hasil pertanian.

2.6 Faktor yang mempengaruhi sifat fisiologis komoditas

Sifat fisiologis komoditas hasil pertanian sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor yang dapat berasal dari dalam (internal) maupun luar (eksternal). Faktor-faktor ini menentukan laju perubahan fisiologis seperti respirasi, transpirasi, aktivitas enzim, serta proses pematangan selama penyimpanan. Pemahaman terhadap faktor-faktor tersebut sangat penting dalam penanganan pascapanen, karena dapat digunakan sebagai dasar untuk mengendalikan laju kerusakan dan mempertahankan mutu produk hingga sampai ke konsumen.(Ferdousi *et al.*, 2024)

Faktor internal meliputi karakteristik genetik atau varietas, tingkat kematangan saat panen, serta struktur dan komposisi kimia komoditas. Setiap varietas memiliki sifat fisiologis yang berbeda, seperti laju respirasi, ketahanan terhadap kerusakan, dan kemampuan penyimpanan. Selain itu, tingkat kematangan saat panen juga sangat menentukan; komoditas yang dipanen terlalu muda atau terlalu matang cenderung memiliki daya simpan yang lebih rendah. Struktur jaringan dan kandungan kimia, seperti kadar air,

karbohidrat, dan senyawa bioaktif, juga memengaruhi respons fisiologis selama penyimpanan.(Diane, *et al.*, 2004)

Faktor eksternal yang paling berpengaruh adalah suhu lingkungan. Suhu merupakan faktor utama yang mengendalikan laju reaksi metabolisme dalam jaringan hasil pertanian. Suhu tinggi akan meningkatkan laju respirasi, aktivitas enzim, dan kehilangan air, sehingga mempercepat penurunan mutu. Sebaliknya, suhu rendah dapat memperlambat proses metabolisme dan memperpanjang umur simpan. Namun, suhu yang terlalu rendah juga dapat menyebabkan kerusakan fisiologis tertentu seperti chilling injury pada beberapa komoditas.(Kader et al., 2002)

Kelembaban relatif udara juga berperan penting dalam memengaruhi sifat fisiologis komoditas, terutama terkait dengan kehilangan air melalui proses transpirasi. Kelembaban yang rendah akan meningkatkan laju kehilangan air sehingga menyebabkan pelayuan dan penyusutan bobot. Sebaliknya, kelembaban yang terlalu tinggi dapat memicu pertumbuhan mikroorganisme dan meningkatkan risiko pembusukan. Oleh karena itu, pengaturan kelembaban yang optimal sangat diperlukan untuk menjaga keseimbangan kadar air dalam jaringan.

Komposisi atmosfer di sekitar komoditas, khususnya kadar oksigen (O_2) dan karbon dioksida (CO_2), juga memengaruhi aktivitas fisiologis. Kadar oksigen yang tinggi dapat meningkatkan respirasi, sedangkan peningkatan karbon dioksida dalam batas tertentu dapat menghambat aktivitas metabolisme. Teknologi seperti penyimpanan atmosfer termodifikasi (*Modified Atmosphere Storage*) memanfaatkan prinsip ini untuk memperlambat proses pematangan dan kerusakan. Selain itu, keberadaan gas etilen di lingkungan penyimpanan juga dapat mempercepat pematangan dan penuaan komoditas.

Selain faktor-faktor tersebut, penanganan mekanis dan kondisi lingkungan lainnya seperti cahaya dan sirkulasi udara juga turut memengaruhi sifat fisiologis komoditas. Kerusakan mekanis akibat benturan atau tekanan dapat meningkatkan laju respirasi dan memicu aktivitas enzim yang menyebabkan kerusakan jaringan. Cahaya dapat memengaruhi perubahan warna dan degradasi senyawa tertentu, sedangkan sirkulasi udara yang baik diperlukan untuk menjaga kondisi lingkungan yang stabil. Dengan demikian, pengelolaan berbagai faktor ini secara terpadu sangat penting dalam mempertahankan kualitas dan memperpanjang umur simpan hasil pertanian.(Awasthi et al., 2024)

RANGKUMAN

Karakteristik fisiologis hasil pertanian merupakan aspek penting yang menentukan perubahan mutu komoditas setelah panen, karena jaringan masih tetap hidup dan melakukan aktivitas biologis. Struktur dan jaringan, seperti sel, parenkim, kolenkim, dan sklerenkim, berperan dalam menentukan tekstur, kekuatan, serta ketahanan terhadap kerusakan, di mana perubahan pada dinding sel dan tekanan turgor menyebabkan pelunakan selama penyimpanan. Komposisi kimia yang meliputi air, karbohidrat, protein, lemak, vitamin, mineral, dan senyawa volatil turut menentukan nilai gizi serta sifat sensori seperti rasa, warna, dan aroma, yang dapat berubah akibat proses biokimia. Kandungan air dan aktivitas air (aw) menjadi faktor utama dalam menjaga kesegaran sekaligus memengaruhi laju kerusakan, karena air berperan dalam aktivitas enzim dan pertumbuhan mikroorganisme, sehingga pengendaliannya sangat penting untuk memperpanjang umur simpan. Aktivitas enzim memicu berbagai reaksi penting seperti pematangan, pencoklatan, dan pelunakan jaringan,

sedangkan aktivitas metabolisme seperti respirasi, transpirasi, dan produksi etilen mengatur laju penggunaan cadangan energi dan proses penuaan komoditas. Laju metabolisme yang tinggi akan mempercepat penurunan mutu, sehingga perlu dikendalikan melalui teknik pascapanen yang tepat. Selain itu, sifat fisiologis komoditas dipengaruhi oleh faktor internal seperti varietas, tingkat kematangan, dan komposisi kimia, serta faktor eksternal seperti suhu, kelembaban, komposisi gas, dan perlakuan pascapanen. Interaksi berbagai faktor tersebut menentukan kecepatan perubahan fisiologis dan daya simpan produk. Dengan demikian, pemahaman yang komprehensif mengenai karakteristik fisiologis hasil pertanian menjadi dasar dalam penerapan teknologi pascapanen yang efektif, sehingga kualitas dapat dipertahankan, kehilangan hasil dapat ditekan, dan nilai ekonomi komoditas dapat ditingkatkan.

TES FORMATIF

Jawablah setiap pertanyaan berikut dengan uraian yang jelas, sistematis, dan menggunakan konsep dari Bab 2 Karakteristik Fisiologis Hasil Pertanian

Petunjuk: Setiap soal essay memiliki bobot nilai 20 poin. Total nilai bagian ini adalah 100 poin.

1. Jelaskan secara rinci perbedaan struktur dan fungsi jaringan parenkim, kolenkim, dan sklerenkim pada hasil pertanian. Bagaimana ketiga jenis jaringan ini berkontribusi terhadap ketahanan fisik komoditas selama penanganan pascapanen?

Petunjuk jawaban: Uraikan ciri khas masing-masing jaringan (struktur dinding sel, sifat), fungsi utamanya, dan kaitkan dengan ketahanan terhadap

tekanan/benturan, tekstur, serta kerentanan terhadap kerusakan.

2. Uraikan konsep aktivitas air (*water activity/aw*) dan jelaskan perbedaannya dengan kadar air total. Mengapa nilai aw lebih akurat sebagai parameter stabilitas bahan pangan dibandingkan kadar air total? Berikan contoh penerapan pengendalian aw dalam teknologi pascapanen

Petunjuk jawaban: Definisikan aw, jelaskan konsep air bebas vs air terikat, hubungkan dengan pertumbuhan mikroorganisme dan aktivitas enzim, serta berikan minimal 2 contoh teknik pengendalian aw

3. Jelaskan mekanisme kerja enzim Polifenol Oksidase (PPO) dalam proses pencoklatan (*browning*) pada hasil pertanian. Faktor-faktor apa saja yang memengaruhi aktivitas enzim ini, dan bagaimana cara pengendaliannya dalam penanganan pascapanen?

Petunjuk jawaban: Jelaskan substrat dan produk reaksi PPO, kondisi yang memicunya (luka, oksigen), hubungkan dengan faktor suhu/pH/oksigen, dan usulkan minimal 3 metode pengendalian pencoklatan.

4. Bandingkan pola metabolisme komoditas klimakterik dan non-klimakterik ditinjau dari produksi etilen dan laju respirasinya. Mengapa perbedaan ini penting dalam menentukan strategi penyimpanan pascapanen? Berikan masing-masing dua contoh komoditas.

Petunjuk jawaban: Definisikan klimakterik dan non-klimakterik, gambarkan pola respirasi dan produksi etilen keduanya, jelaskan implikasi terhadap strategi penyimpanan, dan berikan contoh konkret

5. Analisislah bagaimana faktor internal (varietas, tingkat kematangan saat panen) dan faktor eksternal (suhu, kelembaban relatif, komposisi gas) berinteraksi dalam memengaruhi laju perubahan fisiologis hasil pertanian. Mengapa pendekatan terpadu dalam pengendalian faktor-faktor ini sangat penting dalam manajemen pascapanen?
Petunjuk jawaban: Jelaskan pengaruh masing-masing faktor internal dan eksternal, tunjukkan interaksinya (misalnya: varietas + suhu terhadap laju respirasi), dan simpulkan pentingnya pendekatan terpadu

Latihan Project-Based Learning (PjBL)

Tugas PjBL berikut dirancang untuk mengembangkan kemampuan berpikir kritis, kolaborasi, dan penerapan konsep fisiologi hasil pertanian dalam situasi nyata. Kerjakan secara berkelompok sesuai petunjuk masing-masing proyek.

PJBL 1: Investigasi Mutu Pascapanen “Detektif Fisiologi Komoditas”

Tujuan Proyek	Mahasiswa mampu mengidentifikasi dan menganalisis perubahan fisiologis nyata pada komoditas hasil pertanian selama penyimpanan, serta mengaitkannya dengan teori karakteristik fisiologis Bab 2.
Durasi	2 Minggu (Minggu 1: Pengamatan & Pengumpulan Data Minggu 2: Analisis & Presentasi)
Kelompok	3–4 mahasiswa per kelompok

Deskripsi Proyek:

Setiap kelompok memilih satu komoditas hasil pertanian segar (buah atau sayuran) dan melakukan pengamatan perubahan fisiologisnya selama periode penyimpanan pada kondisi yang berbeda. Kelompok berperan sebagai "detektif fisiologi" yang bertugas menginvestigasi, mendokumentasikan, dan menjelaskan setiap perubahan yang terjadi berdasarkan konsep ilmiah Bab 2.

Langkah-langkah Pelaksanaan:

1. Pilih satu komoditas hasil pertanian (contoh: pisang, tomat, kangkung, wortel, atau lainnya sesuai persetujuan dosen).
2. Siapkan 3 perlakuan penyimpanan: (a) Suhu ruang tanpa pengemasan, (b) Suhu rendah/kulkas tanpa pengemasan, (c) Suhu ruang dengan pengemasan plastik.
3. Amati dan catat perubahan setiap hari selama 7–10 hari meliputi: perubahan warna, tekstur (kekerasan), aroma, berat, dan penampilan visual.
4. Dokumentasikan setiap perubahan dengan foto berurutan dan tabel data pengamatan.
5. Analisis hasil pengamatan menggunakan konsep: struktur jaringan, komposisi kimia, kandungan air & aw, aktivitas enzim, metabolisme respirasi & etilen, dan faktor fisiologis.
6. Susun laporan tertulis dan presentasikan hasil proyek kepada kelas.

Komponen Laporan:

- Pendahuluan: latar belakang pemilihan komoditas dan tujuan pengamatan
- Metodologi: prosedur pengamatan dan dokumentasi

- Hasil Pengamatan: tabel data harian, grafik perubahan berat, dan foto dokumentasi
- Pembahasan: analisis ilmiah setiap perubahan dikaitkan dengan teori Bab 2
- Kesimpulan: simpulan dan rekomendasi penanganan pascapanen
- Daftar Pustaka: minimal 5 referensi ilmiah

DAFTAR PUSTAKA

- Awasthi, P., Singh, S. C., & Kumar, R. (2024). *Postharvest Technology Of Horticultural Crops*. Elite Publishing House.
- Dewanti, R., Maliza, R., Billah, M. M., Widyaningrum, S. A., Dewi, D. P., Nurrohima, D., Nofia, Y., Putri, I., Istiqomah, N., Nurjana, S., Tanaiyo, K., Astriana, K., & Putri, S. R. (2024). *Ilmu Bahan Pangan*.
- Diane M. Barret, Laszlo Somogyi, H. R. (2004). *Processing Fruits*. CRC PRESS Boca.
- Ferdousi, J., Hossain, M. I., Saha, S. R., Rob, M., Pramanik, T. A. S., Islam, M. R., & Nath, D. D. (2024). *Postharvest Physiology Of Fruits And Vegetables And Their Management Technology: A Review*. 34(2), 291–303.
- Gopinadhan Paliyath, Dennis P. Murr, Avtar K. Handa, S. L. (2008). *Postharvest Biology and Technology of Fruits, Vegetables and Flowers*. Wiley-Blackwell Publishing Blackwell.
- Ika Gusriani, Santi Dwi Astuti , Rahmawati, Usman Pato, Eka Ruriani, Herianus J.D. Lalel, Ulfah Anis, I Ketut Budaraga, Gemini E M Malelak , Nancy Kiay, Andri Nofreeana , Abdullah Mutis, S. K. P. (2024). *Ilmu Bahan Pangan*. CV HEI PUBLISHING INDONESIA. www.HeiPublishing.id
- Kader, A. A. (2013). *Postharvest Technology of Horticultural Crops - An Overview from Farm to Fork*. 8(1), 1–8.
- Kader, A. A., Cook, R. L., Bruhn, C. M., Reid, M. S., & Thompson, J. F. (2002). *Postharvest Technology of Horticulture Crops* (Issue 530).

Li, S., Zheng, Y., Li, M., Zeng, L., Sang, Y., Liu, Q., Zhang, H., Lin, H., & Fan, Z. (2024). *Quantitative analyses of major enzyme activities in postharvest fruit*. May, 213–221. <https://doi.org/10.1002/fpf2.12021>

BAB 3

METABOLISME PASCAPANEN

DESKRIPSI PEMBELAJARAN

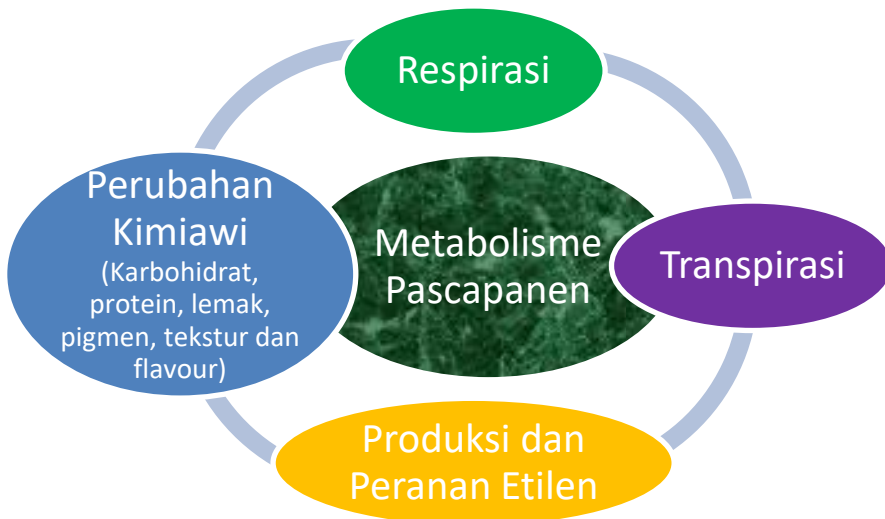
Pada bab 3 Metabolisme Pascapanen memberikan dasar pemahaman mengenai kelanjutan proses fisiologis tanaman (respirasi, transpirasi, etilen) yang tetap hidup setelah dipanen, mendorong pelayuan, kematangan, dan pembusukan. Selanjutnya dijelaskan mengenai respirasi, transpirasi, produksi dan peranan etilen, serta perubahan kimiawi (karbohidrat, protein, lemak, pigmen, tekstur dan flavour) pada bahan hasil pertanian. Bab ini juga membahas karakteristik hasil pertanian yang umumnya mudah rusak, bersifat musiman, dan tetap melakukan aktivitas metabolisme seperti respirasi, transpirasi, pematangan, dan senescence yang dapat menurunkan kualitas. Oleh karena itu, pemahaman tentang metabolisme pascapanen sangat penting untuk memperlambat laju respirasi dan transpirasi, guna mempertahankan kualitas, mencegah susut bobot, serta memperpanjang daya simpan bahan pertanian. Pemahaman ini memungkinkan penanganan yang tepat untuk menekan kerusakan fisik, kimiawi, dan serangan mikroorganisme, sehingga meningkatkan nilai ekonomi, menjaga keamanan pangan. sekaligus meminimalkan kerugian, terutama di daerah tropika yang kondisi lingkungannya mempercepat kerusakan komoditas.

KOMPETENSI PEMBELAJARAN

Setelah mengikuti bab 3 tentang metabolisme pascapanen ini diharapkan mahasiswa dan mahasiswi memiliki pengetahuan dan kemampuan:

1. Menjelaskan pengertian respirasi, transpirasi, produksi dan peranan etilen serta perubahan kimiawi (karbohidrat, protein, lemak, pigmen, tekstur dan flavour) pada bahan hasil pertanian.
2. Mengidentifikasi karakteristik dari respirasi, transpirasi, produksi dan peranan etilen serta perubahan kimiawi, dan
3. Menganalisis pentingnya studi fisiologi dan teknologi pasca panen dari sisi metabolisme pascapanen.

PETA KONSEP PEMBELAJARAN



3.1 Konsep Metabolisme Pascapanen

Komoditi hasil pertanian merupakan struktur organ yang masih hidup walaupun telah terpisah dari tanaman induknya, karena pada saat pasca panen : masih melakukan reaksi-reaksi metabolisme dan masih mempertahankan sistim fisiologis sebagaimana saat masih melekat pada tanaman induknya sebagai proses metabolisme pascapanen.

Metabolisme pascapanen menurut (Anggriani & Harini, 2025) adalah kelanjutan proses fisiologis tanaman (respirasi, transpirasi, etilen) yang tetap hidup setelah dipanen, mendorong pelayuan, kematangan, dan pembusukan. Pengelolaan yang tepat seperti : pendinginan, sortasi, pengemasan, penyimpanan dan transportasi sangat krusial untuk menghambat laju metabolisme ini, menjaga kesegaran, serta mengurangi kehilangan hasil (*food loss*).

Berbagai faktor penyebab kehilangan pasca panen pada tumbuhan menurut (Ramaswamy, 2014) dapat dilihat pada Tabel 3.1 :

Tabel 3. 1. Faktor penyebab kehilangan pasca panen pada tumbuhan

Penyebab	Keterangan
Fisiologis	Respirasi (Semakin tinggi tingkat respirasi produk, semakin pendek umur simpannya) Transpirasi (kelayuan karena dehidrasi) Produksi Etilen (percepatan kematangan)
Fisik	Kondisi lingkungan dan penyimpanan yang tidak tepat, misal chilling injury
Mekanis	Kerusakan yang disebabkan pengangkutan, misal memar,

Penyebab	Keterangan
	hancur, tertusuk
Kimia dan Biokimia	Reaksi yang tidak diinginkan antara senyawa kimia yang ada dalam pangan misal perubahan pigmen, perubahan zat nutrisi, perkecambahan
Biologis dan Mikrobiologis	Kerusakan oleh serangga, hama, hewan dan mikroorganisme (jamur dan bakteri).

Bahan hasil pertanian masih mengalami proses metabolisme setelah panen yang terdiri dari :

- anabolisme (pembentukan senyawa yang lebih besar dari molekul – molekul yang lebih kecil, molekul ini terdiri dari pati, selulose, protein, lemak dan asam lemak. Proses ini membutuhkan energi).
- Katabolisme merupakan senyawa dengan molekul yang besar membentuk senyawa – senyawa dengan molekul yang lebih kecil dan menghasilkan energi.

Metabolisme dalam sistem biologi berlangsung melalui beberapa proses utama, yaitu :

- Fotosintesis yang terjadi pada tanaman selama pertumbuhan
- Respirasi yang berlangsung baik pada tanaman hidup maupun setelah proses panen.
- Proses metabolisme dalam tanaman untuk membentuk karbohidrat dengan menggunakan CO_2 dan air serta zat-zat organik dari tanah
- Reaksinya :

Sinar matahari



Klorofil

- Oksigen yang dikeluarkan dari tumbuhan berasal dari air dan bukan CO_2 .
- Kloroplas menguraikan air menjadi hidrogen dan oksigen.

3.2 Respirasi

Respirasi adalah suatu proses yang melibatkan terjadinya penyerapan oksigen (O_2) dan pengeluaran karbondioksida (CO_2) serta energi yang digunakan untuk reaksi metabolisme dan reaksi yang terjadi didalam jaringan. Respirasi pada hakikatnya adalah reaksi redoks, dimana substrat dioksidasi menjadi CO_2 sedangkan O_2 yang diserap sebagai oksidator mengalami reduksi menjadi H_2O . Substrat respirasi adalah setiap senyawa organik yang dioksidasikan dalam respirasi, atau senyawa-senyawa yang terdapat dalam sel tumbuhan yang secara relatif banyak jumlahnya dan biasanya direspirasikan menjadi CO_2 dan air.



Gambar 3. 1. Ilustrasi respirasi pada buah

Sumber: <https://www.slideshare.net/slideshow/3-respirasi/37140241>

Proses respirasi ini sangat memengaruhi perubahan biokimia dan kualitas buah-buahan; misalnya pada buah-buahan klimakterik kecepatan respirasi menjadi minimum pada proses pendewasaan (*maturity*) dan cenderung konstan setelah panen, contoh lainnya karena oksidasi sukrosa yang sangat cepat yang terjadi setelah kacang kapri dipanen, derajat kemanisan buah tersebut turun. Salah satu indeks yang digunakan untuk menentukan berapa lama buah-buahan dapat disimpan setelah dipanen adalah laju respirasi. Perbedaan laju respirasi ini yang menyebabkan adanya klasifikasi klimakterik dan non klimakterik, yang dibahas pada Bab 4. Selain itu menurut (Hasbullah, 2008) produksi CO₂ menentukan laju respirasi, dimana metode pengukuran yang digunakan adalah metode tanpa udara masuk dan keluar yang lebih dikenal sebagai metode sistem tertutup/closed system. Cara penggunaan metode ini adalah : tumbuhan dimasukkan ke dalam wadah toples, yang ditutup dengan dua pipa plastik fleksibel untuk disambungkan ke alat pengukur produksi CO₂ . Continuous Gas Analyzer digunakan untuk mengukur konsentrasi CO₂ dengan mengumpulkan data setiap beberapa jam hingga puncak produksi CO₂. Laju respirasi dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$RCO_2 = \frac{V \cdot dx}{W \cdot dt}$$

Dimana : RCO_2 = laju produksi CO₂ (ml/kg jam)

V = volume bebas chamber (ml)

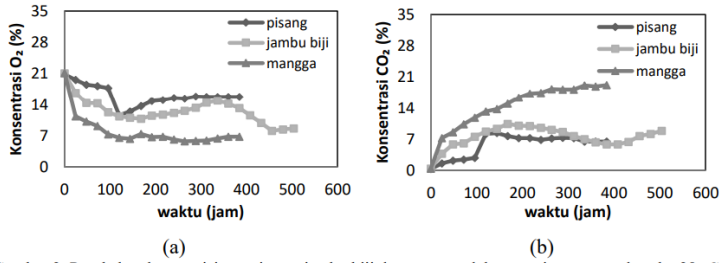
W = berat pisang (kg)

dx = perbedaan konsentrasi gas (desimal)

dt = Interval waktu pengambilan data (jam)

(Rahman & Faisal, 2023)

Contoh lain dapat dilihat pada Gambar 2. Menerangkan tentang Laju Respirasi O₂ dan CO₂ jambu biji pada beragam suhu (Rahayu et al., 2021)



Gambar 3. 2. Perubahan komposisi gas pisang, jambu biji dan mangga dalam respirometer pada suhu 28°C; (a) O_2 ; (b) CO_2

Menurut (Utami et al., 2025), faktor internal dan eksternal akan memengaruhi laju respirasi secara keseluruhan. Faktor internal termasuk tingkat perkembangan organ, susunan kimia jaringan, ukuran produk, adanya pelapisan alami, dan jenis jaringan, sedangkan faktor eksternal termasuk suhu, penggunaan etilen, kurangnya oksigen dan karbondioksida, senyawa pengatur pertumbuhan, dan luka pada buah. Contohnya seperti Gambar 2 diatas, laju respirasi buah jambu biji meningkat lebih cepat ketika disimpan pada suhu ruang daripada suhu dingin, hal ini dikarenakan oleh penurunan oksigen dan peningkatan CO_2 yang semakin lambat ketika jambu biji disimpan di suhu rendah.

Berikut Tabel 3.2 menurut (Sudheer & Indira, 2007) yang mengklasifikasikan komoditas berdasarkan laju respirasi.

Tabel 3. 2. Klasifikasi komoditas berdasar laju respirasi

Kelas	Kelas Laju respirasi pada suhu 5°C (mgCO ₂ kg-1 jam-1)	Contoh
Sangat rendah	<5	Kurma, buah dan sayur kering, kacang-kacangan
Rendah	5-10	Apel, bit, celery, jeruk, anggur, bawang putih, bawang merah, kiwi, pepaya, nanas, kentang (matang), semangka, ubi jalar
Moderat	10-20	Aprikot, pisang, kubis, wortel, ceri, lettuce (kepala), mangga, peach, pear, plum, kentang (belum matang)
Tinggi	20-40	Alpukat, wortel, kembang kol, rasberi
Sangat Tinggi	40-60	Artichoke, tauge, brokoli, okra, green onion
Sangat Amat Tinggi	>60	Asparagus, jamur, parsley, bayam, kacang polong, jagung manis

Sumber : (Sudheer & Indira, 2007)

3.3 Transpirasi

Transpirasi atau bisa juga disebut sebagai penguapan, adalah pelepasan uap air atau gas dari daun atau permukaan tanaman serta dari jaringan bahan pertanian ke lingkungan sekitar karena kandungan air bahan pertanian lebih tinggi daripada lingkungan sekitar. Tujuannya untuk menjaga suhu tetap stabil selama proses pendinginan. Kecepatan transpirasi pada bahan pertanian ditentukan oleh beberapa faktor seperti yang tertera pada Tabel 3.3.

Tabel 3. 3. Faktor yang mempengaruhi kecepatan transpirasi

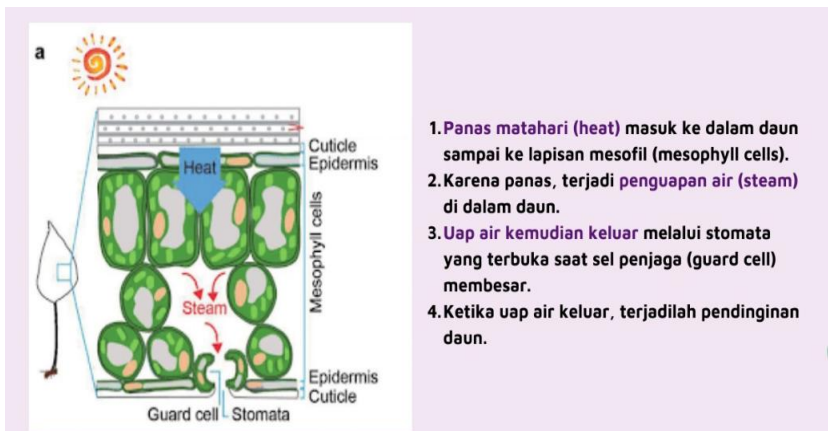
No.	Faktor	Keterangan
1.	Luas permukaan (a)	Semakin luas permukaan bahan pertanian, maka proses penguapan akan semakin cepat.
2.	Ketebalan kulit (a)	Semakin tebal kulit, maka semakin lambat proses transpirasi pada bahan pertanian.
3.	Lapisan lilin (b)	Bahan pertanian yang memiliki lapisan lilin lebih lambat terjadi proses transpirasi dibandingkan bahan pertanian yang tidak memiliki lapisan lilin.

Sumber : (Sudheer & Indira, 2007)

Transpirasi juga memiliki dampak pada kualitas bahan pertanian, yaitu : Bahan pertanian mengalami susut berat, bahan pertanian mengalami penurunan tekstur karena jumlah air dalam bahan menurun, sehingga kualitas produk jadi menjadi kurang menarik. Transpirasi menyebabkan penurunan kandungan vitamin C dalam bahan

pertanian serta produk bahan pertanian menjadi lebih layu dan kurang menarik.

Transpirasi juga berfungsi untuk membantu pengangkutan air dari akar menuju daun. Kalau pohonnya tinggi sekali, gaya tekan akar tidak akan cukup untuk membawa air sampai ke daun. Makanya, ada gaya adhesi-kohesi pada xilem dan transpirasi di daun yang ikut membantu. Selain itu juga berfungsi sebagai pengatur suhu tumbuhan, seperti ilustrasi dibawah ini :



Gambar 3. 3. Transpirasi sebagai pengatur suhu tumbuhan

Sumber : <https://www.zenius.net/blog/transpirasi-pada-tumbuhan/>

Berbagai macam cara untuk mencegah kerusakan produk bahan pangan karena laju transpirasi diantaranya adalah dengan meningkatkan kelembaban relatif, menurunkan suhu udara dalam penyimpanan, menurunkan kecepatan udara, dan menggunakan pengemasan yang melindungi bahan pangan dari suhu tinggi. Sementara menurut (Silaen, 2021) terdapat empat cara berbeda yang dapat digunakan untuk mengukur laju transpirasi di laboratorium, yaitu : metode kertas korbil klorida, metode

fotometer, metode pengumpulan uap air yang ditranspirasi dan metode penimbangan langsung.

Faktor-faktor utama yang bertanggung jawab terhadap transpirasi pada tumbuhan terbagi menjadi faktor internal (karakteristik tumbuhan) dan eksternal (lingkungan). Faktor internal meliputi jumlah stomata, luas daun, dan tebal daun, sedangkan faktor eksternal meliputi intensitas cahaya, suhu, kelembapan udara, angin, dan ketersediaan air tanah.

Faktor Internal (Fisiologis & Morfologis):

- Stomata: Jumlah, ukuran, dan aktivitas pembukaan stomata sangat menentukan laju keluarnya uap air.
- Luas Permukaan Daun: Semakin lebar daun, semakin banyak uap air yang dilepaskan.
- Lapisan Kutikula: Tebal tipisnya lapisan lilin pada daun mempengaruhi transpirasi kutikula.

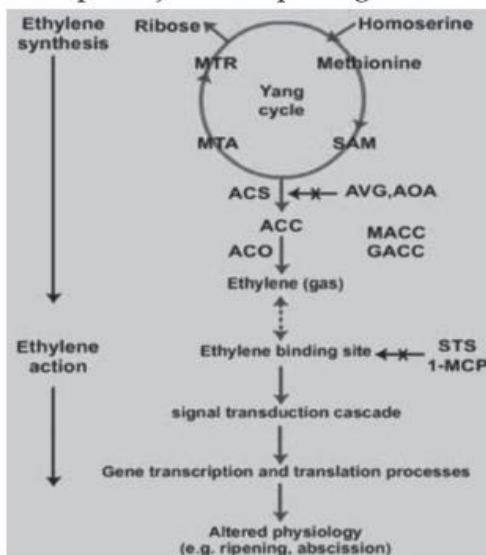
Faktor Eksternal (Lingkungan):

- Intensitas Cahaya: Cahaya merangsang stomata membuka, sehingga meningkatkan transpirasi.
- Suhu: Suhu yang lebih tinggi meningkatkan penguapan air, mempercepat transpirasi.
- Kelembapan Udara: Udara kering (kelembapan rendah) mempercepat laju transpirasi.
- Angin: Angin kencang atau sedang menghilangkan uap air di permukaan daun, meningkatkan transpirasi.
- Ketersediaan Air Tanah: Jika air tanah cukup, transpirasi berlangsung normal: sebaliknya, kekurangan air akan menurunkan transpirasi.

3.4 Produksi dan Peranan Etilen

Etilen merupakan senyawa hidrokarbon tidak jenuh yang pada suhu ruang berbentuk gas dan dihasilkan oleh jaringan tanaman hidup pada waktu-waktu tertentu serta

dapat menyebabkan terjadinya perubahan-perubahan: proses pertumbuhan dan pematangan bahan hasil pertanian. Etilen sebagai senyawa organik dan bersifat mobile dalam jaringan tanaman, serta memiliki fungsi hormonal untuk mempercepat pertumbuhan, perkembangan, dan kelayuan. Produksi etilen dapat mempercepat kelayuan dan pembusukan. Hormon ini bertanggung jawab atas proses pematangan buah selama fase klimaterik. Sementara pembahasan klimaterik dan non klimaterik dibahas pada bab 4. Etilen berasal dari asam amino dan metonin. Metionin diubah menjadi asam 1- aminocyclopropane-1- karboksilat (ACC), ACC dikonversi menjadi etilen oleh ACC oxidase atau ACO. Siklus pembentukan etilen dapat dijelaskan pada gambar tentang jalur biosintesis ethylene berikut.

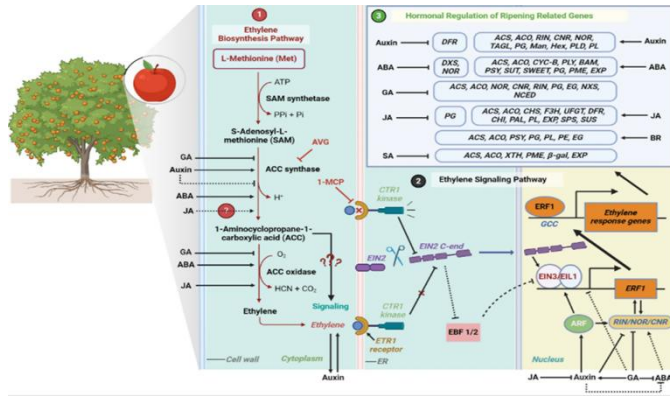


Gambar 3. 4.Lintasan biosintesis etilen (Sudheer & Indira, 2007)

SAM = S-adenosilmethionine;

ACC = 1-amino cyclopropane 1-carboxylic acid;

EFE = ethylene forming enzyme



Gambar 3. 5. Jalur Biosintesis Etilen

Metode kromatografi gas dapat digunakan untuk mengetahui konsentrasi etilen. Etilen meningkatkan permeabilitas membran sel, memperbesar permeabilitas sel, dan meningkatkan proses pelunakan, yang mempercepat metabolisme respirasi. Sehingga etilen akan mempercepat tahap kelayuan produk bahan pertanian. Oleh karena itu, penyimpanan bahan pertanian dengan suhu rendah, oksigen rendah, dan karbondioksida yang tinggi dapat menghambat produksi etilen yang cepat. Penjelasan tentang penyimpanan dibahas pada bab 8.

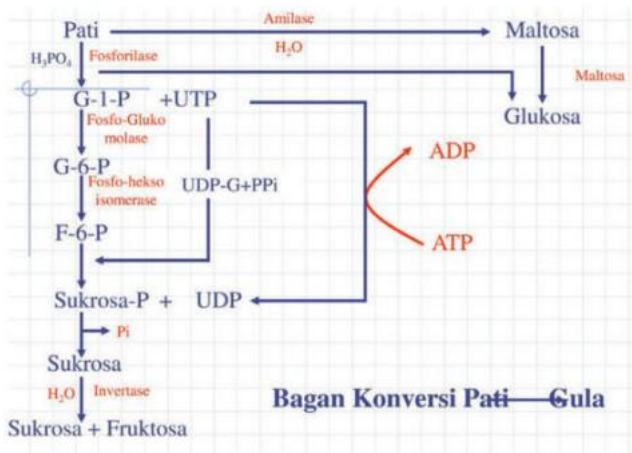
3.5 Produksi Etilen

Sebagai hormon, etilen terdapat dalam jumlah sedikit ($< 0,1$ ppm) yang berpengaruh thd proses pertumb, perkembangan dan *senescence*. Pada umumnya produksi etilen meningkat apabila komoditas: mengalami pematangan, mengalami kerusakan fisik atau terkena penyakit, temperatur meningkat sampai di atas 30°C , dan mengalami stres air. Sedangkan laju produksi etilen menurun apabila: penyimpanan pada suhu rendah dan pengurangan O_2 atau penambahan CO_2 di sekeliling komoditas ($\text{O}_2 < 8\%$ dan $\text{CO}_2 > 1\%$).

Etilen sudah memicu pematangan pada 10–20 ppm, tetapi dalam praktik komersial digunakan 200–500 ppm agar matang lebih cepat dan seragam. Sedangkan pada konsentrasi >500 ppm tidak efektif dan berisiko, karena etilen bersifat mudah terbakar pada kadar tinggi (3–30%). Kondisi pemeraman dengan etilen dapat dilakukan pada suhu: 21–24°C (suhu min. 15.5°C) dan Rh: 85 - 90 %. Bahaya dari gas toksik etilen pada manusia adalah tidak sadar/pingsan dan sulit bernafas. Sedangkan dalam bentuk cair bisa menyebabkan iritasi kulit/mata dan kulit terbakar

3.6 Perubahan Komposisi Kimiawi

Perubahan komposisi kimiawi bahan pertanian pascapanen akan mengalami perubahan tergantung dari jenis bahan pertaniannya. Beberapa contoh perubahan adalah perubahan karbohidrat, pigmen, tekstur dan flavor, yang digambarkan pada gambar 3.6.



Gambar 3. 6. Lintasan konversi sukrosa menjadi pati yang dikatalis oleh enzim pati-glukosiltransferase
(Sumber : <https://slideplayer.info/slide/11899628/>)

(ADP = Adenosin difosfat ATP = Adenosin trifosfat UDP = Uridin difosfat UDPG = Uridin difosphoglucose UTP = Uridn trifosfat Pi = Pa= Inorganic phosphate = fosfat anorganik)

1. Perubahan Karbohidrat

Perubahan karbohidrat pada bahan hasil pertanian terbagi menjadi dua, yaitu:

a) Penguraian Pati

Penguraian pati terjadi saat perubahan pati menjadi gula yang menimbulkan rasa manis, terutama pada buah klimaterik yang tinggi pati seperti pisang. Buah non-klimaterik juga mengalami perubahan ini walaupun tidak seperti buah klimakterik.

b) Pembentukan Pektat

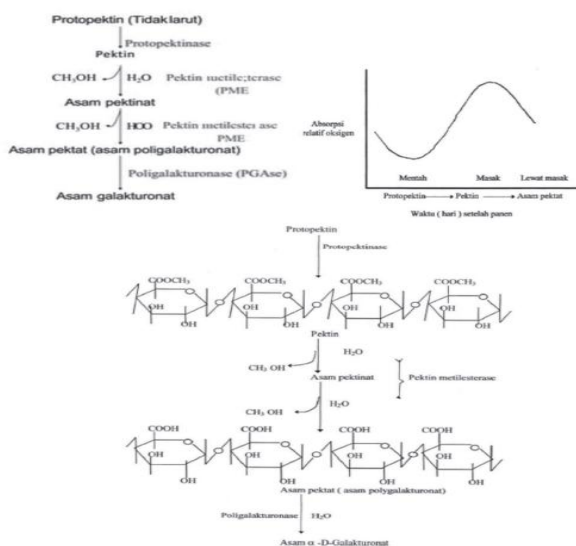
Pada saat proses pematangan buah, dinding sel menjadi lebih lemah dan gaya kohesi yang mengikat sel berkurang sebagai akibat dari penguraian ini. Akibatnya, tekstur buah menjadi lunak, dan ketika buah menjadi terlalu matang, jaringan pecah, yang berarti tekstur menjadi lembek atau bonyok, hal ini dikarenakan Sebagai prekursor pektin yang tidak larut dalam air, protopektin ditemukan pada jaringan tanaman dan buah-buahan yang masih muda dan dihidrolisis oleh enzim protopektinase selama proses pematangan buah.

2. Perubahan Protein

Perubahan protein selama pascapanen pada bahan hasil pertanian tidak terlalu berpengaruh, (kecuali kacang-kacangan) biasanya memiliki kadar protein yang sangat rendah. Sebagai contoh, buah apel hanya mengandung 0,14% protein (Gazali & Munawwaroh, 2017), sementara pada ubi jalar mengandung sekitar 2,47% (Faizah & Haryanti, 2020)

3. Perubahan Lemak

Lemak mempunyai peran penting dalam mempertahankan tekstur, bau, warna, dan lain-lainnya pada bahan hasil pertanian, tetapi perubahan lemak selama pascapanen tidak terlalu berpengaruh karena kandungan lemaknya rendah kecuali pada buah alpukat dan kacang-kacangan. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian (Faizah & Haryanti, 2020) yang menunjukkan tidak terdapat pengaruh nyata kandungan lemak pada tempat penyimpanan di dalam kardus dan di lantai terhadap kadar lemak kasar umbi jalar Var. Manohara. mekanisme perubahan pektin selama pematangan yang berpengaruh dalam pematangan buah pada Gambar 3.7.



Gambar 3. 7. Mekanisme perubahan pektin selama pematangan yang berpengaruh dalam pematangan buah (Eskin & Shahidi, 2012)

4. Perubahan Pigmen (Warna)

Perubahan pigmen pada bahan hasil pertanian, seperti klorofil (hijau), karotenoid (kuning/oranye), dan

antosianin (merah/ungu), umumnya dipicu oleh kerusakan pascapanen, panas, cahaya, atau perubahan pH. Proses ini sering menyebabkan degradasi warna, seperti klorofil berubah menjadi kecoklatan dan antosianin pudar akibat suhu tinggi, serta oksidasi yang mengurangi kualitas visual menurut (Amrih et al., 2023)

Berikut adalah detail perubahan pigmen pada hasil pertanian:

- Klorofil (Hijau): Mudah rusak karena oksidasi dan aktivitas enzim klorofilase selama penyimpanan atau pemanasan, berubah menjadi feofitin yang berwarna kecoklatan. Penyimpanan suhu rendah diperlukan untuk mempertahankan warna hijau, misal pada penelitian (Maulana, 2023) tentang : Perubahan Pigmen Klorofil dan Karotenoid serta Warna Bubuk Teh Hijau dari Berbagai Klon pada Kondisi Penyimpanan Berbeda dimana hasilnya menunjukkan bahwa warna pigmen klorofil dan karotenoid bubuk teh hijau dipengaruhi oleh jenis klon. Selama penyimpanan, terjadi penurunan pigmen warna klorofil dan karotenoid yang kemungkinan disebabkan oleh aktivitas enzim klorofilase dan pengaruh kelembapan dan suhu. Penyimpanan suhu rendah berperan signifikan dalam menjaga stabilitas pigmen klorofil dan warna hijau.
- Antosianin (Merah/Biru/Ungu): Sangat sensitif terhadap panas dan pH. Pemanasan dapat merusak struktur pigmen ini, menyebabkan warna memudar atau berubah sesuai dengan penelitian (Amrih et al., 2023)
- Karotenoid (Kuning/Oranye/Merah): Cenderung lebih stabil terhadap panas dibandingkan klorofil dan antosianin, namun dapat mengalami oksidasi yang mengurangi intensitas warnanya seperti penelitian

(Amrih et al., 2023) Karotenoid memiliki sifat tahan panas sehingga degradasi warna yang terjadi pada sampel wortel hanya sedikit.

- Faktor Penyebab: Perubahan dipengaruhi oleh suhu penyimpanan, tingkat kelembapan, pencahayaan, dan pH lingkungan produk. Perubahan ini tidak hanya memengaruhi penampilan fisik tetapi juga nilai gizi karena beberapa pigmen berfungsi sebagai antioksidan.

5. Perubahan Tekstur dan Flavour

Perubahan tekstur dan *flavour* (aroma/rasa) pada hasil pertanian terjadi akibat aktivitas enzimatik, respirasi, mikrobial, dan penanganan fisik (panas/penyimpanan). Tekstur cenderung lunak karena degradasi dinding sel, sedangkan *flavour* berubah akibat pemecahan komponen aromatik atau munculnya senyawa menyimpang, yang memengaruhi nilai jual dan kesukaan konsumen.

Berikut adalah detail perubahan tekstur dan *flavour* pada bahan hasil pertanian sesuai hasil penelitian (Indiarto et al., 2012), yaitu :

- Perubahan Tekstur (Tekstur Umum) : ada tiga macam yaitu :
 1. Pelunakan (*Softening*): Umum terjadi pada buah/sayur selama pematangan akibat degradasi pektin dan selulosa oleh enzim, seperti pelunakan pada tomat atau buah-buahan.
 2. Pengerasan (*Hardening/Toughening*): Dapat terjadi pada produk yang mengalami dehidrasi atau penyimpanan dingin yang tidak tepat (*chilling injury*).
 3. Kerenyahan/Kerapuhan: Pada produk kering seperti keripik, kerenyahan akan berkurang seiring penyerapan air dari lingkungan, menyebabkan tekstur menjadi melempem

RANGKUMAN

Metabolisme pascapanen hasil pertanian yang telah dipanen merupakan jaringan hidup yang tetap melakukan proses metabolisme. Proses ini meliputi respirasi, transpirasi, dan produksi etilen yang menyebabkan perubahan seperti pelayuan, pematangan, hingga pembusukan. Respirasi adalah proses penggunaan oksigen yang menghasilkan energi, sedangkan transpirasi merupakan proses kehilangan air yang menyebabkan penurunan berat dan kesegaran produk. Etilen berperan sebagai hormon yang mempercepat pematangan dan penuaan bahan pertanian.

Selain itu, terdapat berbagai faktor yang menyebabkan kerusakan pascapanen, yaitu faktor fisiologis, fisik, mekanis, kimia, dan biologis. Faktor-faktor ini dapat mempercepat penurunan kualitas produk jika tidak ditangani dengan baik. Oleh karena itu, diperlukan penanganan seperti pendinginan, pengemasan, penyimpanan, dan transportasi yang tepat untuk memperlambat laju metabolisme dan mengurangi kerugian hasil pertanian.

Perubahan kimia juga terjadi selama pascapanen, seperti perubahan karbohidrat dari pati menjadi gula yang meningkatkan rasa manis, perubahan pigmen yang memengaruhi warna, serta pelunakan tekstur akibat degradasi dinding sel. Selain itu, terjadi perubahan aroma/flavour yang dapat meningkatkan atau justru menurunkan kualitas produk. Pengendalian kondisi lingkungan seperti suhu dan kelembapan sangat penting untuk menjaga mutu dan memperpanjang umur simpan produk.

TES FORMATIF

Jawablah setiap pertanyaan berikut dengan uraian yang jelas, sistematis, dan menggunakan konsep dari Bab 3 Metabolisme Pascapanen

Petunjuk: Setiap soal essay memiliki bobot nilai 20 poin. Total nilai bagian ini adalah 100 poin.

1. Respirasi pascapanen merupakan proses vital yang menentukan umur simpan bahan hasil pertanian. Jelaskan secara rinci: (a) reaksi biokimia dasar respirasi mulai dari substrat hingga produk akhirnya; (b) perbedaan antara respirasi aerob dan respirasi anaerob beserta dampak masing-masing terhadap kualitas komoditas; serta (c) bagaimana laju respirasi yang diukur melalui produksi CO_2 dapat dijadikan indeks untuk memperkirakan umur simpan suatu komoditas. Gunakan minimal dua contoh komoditas dari klasifikasi laju respirasi yang berbeda.

Petunjuk Jawaban: Tuliskan reaksi redoks respirasi ($\text{substrat} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{energi}$), bedakan respirasi aerob vs anaerob (produk, kondisi O_2 , dampak off-flavor), jelaskan rumus $R_{\text{CO}_2} = V \cdot \Delta x / (W \cdot \Delta t)$ dan kaitannya dengan umur simpan, lalu berikan contoh dari ≥ 2 kelas laju respirasi berbeda (mis. bayam [>60] vs apel [5–10]).

2. Faktor internal dan eksternal terbukti memengaruhi laju respirasi hasil pertanian. Uraikan secara sistematis: (a) minimal empat faktor internal (tingkat perkembangan organ, susunan kimia jaringan, ukuran produk, adanya pelapisan alami) dan bagaimana masing-masing memengaruhi laju respirasi; (b) minimal empat faktor eksternal (suhu, etilen, kadar O_2 dan CO_2 , luka fisik) beserta

mekanisme pengaruhnya; dan (c) berdasarkan pemahaman tersebut, strategi pascapanen apa yang paling efektif untuk memperlambat laju respirasi dan mengapa.

Petunjuk Jawaban: Bedakan faktor internal (sifat bawaan komoditas) vs eksternal (kondisi lingkungan), jelaskan mekanisme masing-masing faktor, dan hubungkan langsung dengan strategi praktis seperti pendinginan, CA storage, pengemasan, dan penghindaran luka mekanis.

3. Transpirasi pada bahan hasil pertanian menyebabkan berbagai dampak negatif yang merugikan secara ekonomi dan mutu. Jelaskan: (a) mekanisme transpirasi pada jaringan bahan pertanian setelah panen, termasuk faktor-faktor yang memengaruhi kecepatannya (luas permukaan, ketebalan kulit, lapisan lilin, stomata, suhu, kelembaban, angin); (b) dampak transpirasi terhadap setidaknya empat aspek mutu komoditas (susut bobot, tekstur, kandungan vitamin C, kesegaran visual); serta (c) cara-cara yang dapat diterapkan untuk memperlambat laju transpirasi selama penyimpanan.

Petunjuk Jawaban: Bedakan faktor internal (morfologi daun/permukaan) vs eksternal (lingkungan), uraikan mekanisme fisika kehilangan uap air, kaitkan dengan penurunan tekanan turgor dan pelayuan, lalu usulkan ≥ 4 teknik pengendalian (RH tinggi, suhu rendah, kecepatan udara rendah, wax coating, pengemasan).

4. Etilen merupakan hormon gas yang memiliki peran sentral dalam metabolisme pascapanen. Jelaskan: (a) jalur biosintesis etilen secara lengkap mulai dari asam amino metionin hingga terbentuknya gas etilen

(sertakan nama senyawa antara SAM dan ACC serta enzim yang terlibat); (b) kondisi-kondisi yang dapat meningkatkan dan menurunkan laju produksi etilen; serta (c) mengapa pengendalian etilen dalam lingkungan penyimpanan menjadi strategi penting dalam mempertahankan mutu hasil pertanian, termasuk risiko dan manfaat penggunaannya dalam pemeraman komersial.

Petunjuk Jawaban: Gambarkan jalur: Metionin → SAM → ACC → Etilen (enzim: SAM sintase, ACC sintase/ACS, ACC oksidase/ACO); sebutkan kondisi pemicu (luka, suhu $>30^{\circ}\text{C}$, stres air, penyakit) dan penghambat (suhu rendah, $\text{O}_2 < 8\%$, $\text{CO}_2 > 1\%$); bahas konsentrasi pemeraman (200–500 ppm) beserta risiko >500 ppm.

5. Perubahan komposisi kimiawi pada bahan hasil pertanian pascapanen mencakup berbagai komponen. Jelaskan perubahan yang terjadi pada: (a) karbohidrat — uraikan proses penguraian pati menjadi gula (rasa manis) dan pembentukan pektat (pelunakan); (b) pigmen — jelaskan degradasi klorofil, perubahan antosianin, dan stabilitas karotenoid beserta faktor pemicunya; serta (c) tekstur dan flavour — uraikan tiga macam perubahan tekstur (softening, hardening, kehilangan kerenyahan) dan tiga perubahan flavour (pemanisan, penurunan aroma khas, off-flavor). Akhiri dengan tabel ringkasan komponen yang meningkat dan menurun pascapanen.

Petunjuk Jawaban: Gunakan tabel perubahan kimiawi pascapanen (CO_2 , C_2H_4 , pigmen, gula naik; pati, klorofil, vitamin C, kadar air turun) sebagai kerangka. Kaitkan perubahan karbohidrat dengan aktivitas

enzim amilase/pektinase, pigmen dengan aktivitas klorofilase dan pH, serta flavour dengan aktivitas mikroorganisme dan oksidasi lipid.

Latihan Project-Based Learning (PjBL)

PJBL 1: Peta Metabolisme Pascapanen — Misi Lacak Laju Kerusakan Komoditas

Tujuan Proyek	Mahasiswa mampu mengukur, membandingkan, dan menganalisis laju respirasi serta transpirasi dua komoditas berbeda, lalu merumuskan rekomendasi penanganan pascapanen berbasis data nyata.
Durasi	3 Minggu: Minggu 1 = Persiapan & pengukuran awal Minggu 2 = Pengamatan harian & pencatatan data Minggu 3 = Analisis, laporan & presentasi
Kelompok	3–4 mahasiswa per kelompok
Komoditas	Pilih 2 komoditas berbeda laju respirasi (contoh: bayam [sangat tinggi] vs apel [rendah]; atau jambu biji vs pisang), persetujuan dosen diperlukan

Latar Belakang Masalah:

Seorang manajer *cold storage* di daerah tropis mendapati bahwa beberapa komoditas rusak lebih cepat dari perkiraan, sementara yang lain bertahan lebih lama. Ia menduga perbedaan laju respirasi dan transpirasi menjadi penyebab

utamanya. Tim Anda ditugaskan untuk menginvestigasi fenomena ini secara ilmiah, mengukur parameter metabolisme, dan memberikan rekomendasi teknis kepada manajer.

Tahapan Pelaksanaan:

1. Perencanaan (Hari 1–2): Pilih 2 komoditas, tentukan perlakuan penyimpanan (suhu ruang vs suhu dingin), rancang tabel pengamatan dan lembar pengumpulan data.
2. Pengukuran Laju Respirasi (Hari 3–7): Gunakan metode sistem tertutup (closed system) sederhana; ukur produksi CO_2 setiap 24 jam menggunakan indikator warna atau alat tersedia. Hitung $R_{\text{O}_2} = (V \times \Delta x) / (W \times \Delta t)$.
3. Pengamatan Transpirasi (Hari 3–7): Timbang sampel setiap hari, hitung susut bobot (%), amati perubahan tekstur dan warna secara visual serta dokumentasi foto.
4. Monitoring Perubahan Kimiawi (Hari 1–7): Amati dan catat perubahan warna (pigmen), aroma, dan tekstur sesuai indikator pada Tabel 4 Bab 3 (parameter yang meningkat vs menurun).
5. Analisis Data (Hari 8–10): Buat grafik laju respirasi vs waktu untuk kedua komoditas, bandingkan dengan tabel klasifikasi komoditas (Tabel 2 Bab 3), dan analisis faktor penyebab perbedaan.
6. Penyusunan Laporan & Presentasi (Hari 11–14): Susun laporan ilmiah dan siapkan presentasi dalam format poster + slide.

Komponen Laporan Wajib:

- Pendahuluan: latar belakang, tujuan, dan hipotesis awal tentang perbedaan laju metabolisme kedua komoditas

- Metodologi: prosedur pengukuran respirasi (rumus RO_2), metode penimbangan susut bobot, dan dokumentasi foto harian
- Hasil: tabel data harian, grafik laju respirasi dan susut bobot vs waktu, foto perubahan visual
- Pembahasan: analisis perbedaan laju respirasi kedua komoditas mengacu pada Bab 3 (faktor internal-eksternal, tabel klasifikasi), analisis perubahan kimiawi (karbohidrat, pigmen, tekstur, flavour)
- Rekomendasi Teknis: suhu penyimpanan optimal, strategi pengemasan, dan estimasi umur simpan berdasarkan data
- Kesimpulan dan daftar pustaka (minimal 5 referensi ilmiah)

DAFTAR PUSTAKA

- Amrih, D., Syarifah, A. N., Marlinda, G., Budiarti, P., Safitri, A., Nugraha, I. S. A., Izzati, N. K., Lejap, T. Y. T., Maulana, I., & Rahmanto, L. (2023). Pengaruh Pemanasan Terhadap Perubahan Warna Pada Pangan. *Journal of Innovative Food Technology and Agricultural Product*, 1–4.
- Anggriani, R., & Harini, I. N. (2025). *Fisiologi dan Teknologi Pascapanen*. UMMPress.
- Eskin, N. A. M., & Shahidi, F. (2012). *Biochemistry of foods*. Academic Press.
- Faizah, N. I., & Haryanti, S. (2020). Pengaruh lama dan tempat penyimpanan yang berbeda terhadap kandungan gizi umbi jalar (*Ipomoea batatas*) var. Manohara. *Jurnal Akademika Biologi*, 9(2), 8–14.
- Gazali, A., & Munawwaroh, A. (2017). Pemanfaatan buah apel (*Malus sylvestris* Mill.) lewat matang sebagai substrat nata de apple. *Jurnal Biota*, 3(2), 60–65.
- Hasbullah, R. (2008). Teknik Pengukuran Laju Respirasi Produk Hortikultura pada Kondisi Atmosfir Terkendali Bagian 2: open system method. *Jurnal Keteknikan Pertanian*, 22(1), 21710.
- Indiarto, R., Nurhadi, B., & Subroto, E. (2012). Kajian karakteristik tekstur (texture profil analysis) dan organoleptik daging ayam asap berbasis teknologi asap cair tempurung kelapa. *Jurnal Teknologi Hasil Pertanian*, 5(2).

- Maulana, H. (2023). Perubahan Pigmen Klorofil dan Karotenoid serta Warna Bubuk Teh Hijau dari Berbagai Klon pada Kondisi Penyimpanan Berbeda. *Jurnal Sains Teh Dan Kina*.
- Rahayu, D., Bintoro, N., & Saputro, A. D. (2021). Pemodelan laju respirasi buah klimakterik selama penyimpanan pada suhu yang bervariasi. *Agrointek: Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 15(1), 80–91.
- Rahman, A. F., & Faisal, M. (2023). Pendugaan laju respirasi pisang barangan menggunakan model arrhenius Prediction of respiration rate of barangan banana using arrhenius model. *Jurnal Agrotek UMMAT*, 10(1), 20–29.
- Ramaswamy, H. S. (2014). *Post-harvest technologies of fruits & vegetables*. DEStech Publications, Inc.
- Silaen, S. (2021). Pengaruh transpirasi tumbuhan dan komponen didalamnya. *Agroprimatech*, 5(2), 14–20.
- Sudheer, K. P., & Indira, V. (2007). *Post harvest technology of horticultural crops* (Vol. 7). New India Publishing.
- Utami, N. T., Candra, S. D., Jalil, A., Sabahannur, S., Aristyarini, R., Koapaha, T., & Arbiastutie, Y. (2025). *Teknologi Buah Dan Sayur*. Cv Get Press Indonesia

BAB 4

PEMATANGAN BUAH

DESKRIPSI PEMBELAJARAN

Bab ini menyajikan kajian mendalam tentang proses pematangan buah (*fruit ripening*) sebagai fenomena biologi yang paling kompleks dan paling penting dalam fisiologi pascapanen. Mahasiswa akan diajak memahami bahwa pematangan bukan sekadar peristiwa perubahan warna atau tekstur, melainkan sebuah program genetik yang terkoordinasi secara ketat, melibatkan ribuan gen, ratusan jalur metabolisme, dan jaringan sinyal hormonal yang sangat rumit (Tipu & Sherif, 2024). Pemahaman mendalam atas mekanisme molekuler pematangan menjadi fondasi ilmiah untuk merancang strategi teknologi pascapanen yang efektif dan berbasis bukti.

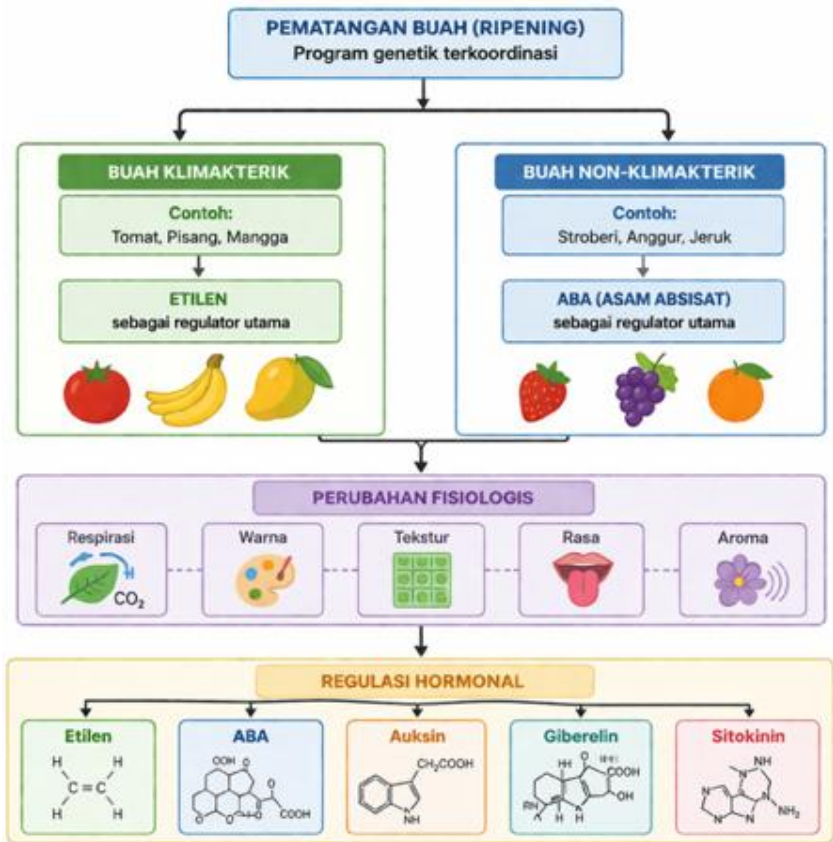
Bab ini juga menyoroti dikotomi klasik buah klimakterik versus non-klimakterik: sebuah klasifikasi yang, kendati secara fisiologis masih relevan, kini dipandang lebih sebagai spektrum kontinum daripada sekat yang kaku (Arista & Ardiningtyas, 2024). Regulasi hormonal khususnya etilen pada buah klimakterik dan asam absisat (ABA) pada buah non-klimakterik dibahas secara mekanistik hingga ke level jalur transduksi sinyal dan faktor transkripsi

KOMPETENSI PEMBELAJARAN

Setelah mengikuti bab 4 tentang pematangan buah ini diharapkan mahasiswa dan mahasiswi memiliki pengetahuan dan kemampuan:

1. Menjelaskan konsep pematangan buah (*ripening*) dan membedakannya dari penuaan (*senescence*) berdasarkan perspektif fisiologis dan molekuler.
2. Mengidentifikasi dan menjelaskan perubahan fisiologis utama selama pematangan: respirasi, warna, tekstur, rasa, dan aroma.
3. Menganalisis perbedaan mendasar antara buah klimakterik dan non-klimakterik berdasarkan pola respirasi dan peran etilen.
4. Menjelaskan jalur biosintesis etilen ($\text{SAM} \rightarrow \text{ACC} \rightarrow \text{Etilen}$) dan mekanisme transduksi sinyalnya pada buah klimakterik.
5. Menganalisis peran asam absisat (ABA) sebagai regulator utama pematangan buah non-klimakterik.
6. Mengevaluasi interaksi antar hormon (etilen, ABA, auksin, giberelin, sitokinin) dalam regulasi pematangan buah.
7. Mengaplikasikan pemahaman mekanisme pematangan untuk merancang strategi pengendalian mutu pascapanen.

PETA KONSEP PEMBELAJARAN



4.1 Konsep Pematangan Buah

4.1.1 Definisi dan Landasan Konseptual

Pematangan buah (*fruit ripening*) merupakan tahap akhir perkembangan buah yang ditandai oleh serangkaian perubahan koordinatif yang mencakup perubahan warna, pelunakan tekstur, peningkatan kandungan gula, penurunan keasaman, dan pembentukan aroma volatil yang khas (Liu et al., 2024) . Pematangan merupakan proses yang secara fundamental berbeda dari penuaan (*senescence*): pematangan adalah program pembangunan terprogram yang meningkatkan daya tarik buah bagi herbivora sebagai agen penyebar biji, sedangkan *senescence* merupakan proses degeneratif menuju kematian jaringan. Dalam konteks pascapanen, memahami perbedaan ini krusial karena keduanya dapat terjadi secara bersamaan namun memerlukan strategi pengendalian yang berbeda.

Secara genetik, pematangan buah dikendalikan oleh jaringan regulasi transkripsi yang kompleks. Faktor transkripsi kunci seperti *ripening-inhibitor* (*rin*), *colorless non-ripening* (*cnr*), dan *nac domain* (*nor*) pada tomat telah terbukti berperan sentral dalam mengorkestrasikan ekspresi gen-gen pematangan (Yahia et al., 2017). Mutasi pada gen *RIN*, misalnya, menghasilkan buah yang tidak pernah matang secara sempurna meskipun diberi perlakuan etilen eksogen, membuktikan bahwa pematangan bukan hanya bergantung pada sinyal hormonal tetapi juga pada kesiapan program genetik sel-sel buah.

4.4.2 Tahapan Perkembangan Buah Menuju Pematangan

Perkembangan buah dari pembungaan hingga pematangan dapat dibagi menjadi fase-fase yang berurutan. Pemahaman atas tahapan ini penting untuk menentukan

waktu panen yang tepat dan merancang strategi penanganan pascapanen yang sesuai. (Yahia et al., 2017)

FASE PERKEMBANGAN BUAH KLIMAKTERIK (Contoh: Tomat)

Fase 1 – Pembentukan (Cell Division): Pembelahan sel intensif pasca-fertilisasi. Ukuran buah bertambah cepat melalui mitosis. Aktivitas metabolisme sangat tinggi. Buah masih keras, hijau, dan mengandung banyak asam organik.

Fase 2 – Pembesaran (Cell Expansion): Sel-sel membesar melalui penyerapan air dan penumpukan fotosintat. Pati diakumulasi. Buah mencapai ukuran akhir namun belum matang secara fisiologis.

Fase 3 – Pematangan (Maturation): Benih mencapai kematangan fisiologis. Sintesis pati mencapai puncak. Perubahan struktural dinding sel mulai berlangsung. Belum ada perubahan warna signifikan.

Fase 4 – Pematangan (Ripening): Produksi etilen melonjak (climacteric rise). Respirasi meningkat tajam. Semua perubahan kualitas (warna, tekstur, rasa, aroma) berlangsung secara simultan dan terkoordinasi.

Fase 5 – Penuaan/Peluruhan (Senescence): Integritas sel menurun. Dinding sel terdegradasi total. Kerentanan terhadap patogen meningkat drastis. Awal dari proses pembusukan.

4.1.3 Pematangan sebagai Program Genetik

Perspektif modern memandang pematangan sebagai sebuah program genetik yang diaktifkan secara terpadu. Bukti kuat untuk pandangan ini berasal dari studi pada mutan pematangan tomat. Mutan *rin* (ripening inhibitor) yang membawa mutasi pada gen faktor transkripsi *mads-box*

(*slmads-rin*) menunjukkan buah yang tidak pernah menjalani pematangan sempurna: tidak ada climacteric ethylene, tidak ada pelunakan normal, tidak ada perubahan warna merah meskipun disimpan dalam waktu lama (Tipu & Sherif, 2024). Hal ini membuktikan bahwa rangsangan hormonal (etilen) saja tidak cukup ada mekanisme 'kesiapan program (program readiness) yang dikendalikan oleh faktor transkripsi regulasi tinggi.

4.2 Perubahan Fisiologis Selama Pematangan

4.2.1 Perubahan Respirasi: Pola Klimaterik

Respirasi adalah proses oksidasi senyawa organik untuk menghasilkan energi (ATP), dengan CO_2 dan H_2O sebagai produk sampingan. Laju respirasi diukur sebagai produksi CO_2 ($\text{mL CO}_2/\text{kg}\cdot\text{jam}$) merupakan indikator yang paling banyak digunakan untuk memantau laju metabolisme dan masa simpan komoditas pascapanen (Yahia et al., 2017). Pada buah klimakterik, laju respirasi mengalami penurunan bertahap selama fase perkembangan, kemudian terjadi lonjakan dramatis (climacteric rise) yang bertepatan dengan puncak produksi etilen dan awal pematangan. Setelah mencapai puncak (*climacteric peak*), laju respirasi kembali menurun dan buah memasuki fase senescence.

Hubungan antara suhu dan laju respirasi dinyatakan dalam koefisien suhu Q_{10} , yang menyatakan kelipatan peningkatan laju respirasi setiap kenaikan suhu 10°C . Untuk sebagian besar komoditas hortikultura, nilai Q_{10} berkisar antara 2–3, artinya penyimpanan pada suhu 0°C dibandingkan 30°C dapat memperlambat metabolisme hingga 8–27 kali lipat (Susanti & Yumeina, 2024). Implikasi praktisnya jelas: pre-cooling segera setelah panen

merupakan intervensi pascapanen terpenting untuk memperpanjang masa simpan.

Tabel 4. 1. Laju Respirasi Representatif Beberapa Komoditas Hortikultura pada Suhu 5°C. (Sumber: diadaptasi dari (Yahia et al., 2017)

Komoditas	Laju Respirasi pada 5°C (mL CO ₂ /kg·jam)	Kategori Respirasi
Asparagus	40–60	Sangat Tinggi (>60 akan melonjak)
Brokoli	40–60	Sangat Tinggi
Stroberi	16–35	Tinggi
Tomat (matang)	10–20	Sedang
Apel	3–10	Rendah
Bawang	2–4	Sangat Rendah

4.2.2 Perubahan Warna: Dari Klorofil ke Pigmen Pematangan

Perubahan warna merupakan indikator pematangan yang paling mudah diamati secara visual. Secara biokimia, perubahan warna melibatkan tiga proses yang saling terkait: (1) degradasi klorofil, (2) sintesis pigmen baru (karotenoid dan/atau antosianin), dan (3) remodeling organel kloroplas menjadi kromoplas. (Tipu & Sherif, 2024)

Degradasi klorofil terjadi melalui jalur enzimatik yang melibatkan klorofilase, Mg-dekkelatase, dan pheophytin pheophorbide hydrolase (PPH). Produk akhir degradasi, yaitu nonfluorescent chlorophyll catabolites (NCCs), bersifat tidak berwarna dan terakumulasi di vakuola (Tipu & Sherif, 2024). Proses ini diregulasi oleh etilen pada buah klimakterik—aplikasi etilen eksogen mempercepat degradasi klorofil, sementara inhibitor etilen (1-MCP) menunda proses tersebut.

Sintesis karotenoid, khususnya likopen (merah, pada tomat) dan beta-karoten (oranye, pada wortel dan mangga), berlangsung di kromoplas dan diregulasi di tingkat transkripsi. Gen-gen kunci seperti *PSY* (phytoene synthase) diinduksi selama pematangan tomat. Antosianin, pigmen yang memberikan warna merah-ungu pada stroberi, anggur, dan ceri, diregulasi berbeda: jalur biosintesisnya diaktivasi terutama oleh ABA melalui faktor transkripsi MYB-bHLH-WD40. (Yang et al., 2022).

4.2.3 Perubahan Tekstur: Pelunakan Dinding Sel

Pelunakan (softening) merupakan perubahan tekstural yang paling signifikan selama pematangan dan menjadi faktor utama pembatas masa simpan buah. Secara biokimia, pelunakan adalah hasil dari degradasi dan modifikasi polimer dinding sel primer terutama pektin, hemiselulosa, dan selulosa oleh serangkaian enzim hidrolitik (Wang et al., 2018)

Pektin, khususnya homogalakturonan (HG), merupakan komponen dinding sel yang paling banyak diteliti dalam konteks pelunakan buah. Selama pematangan, pectin methylesterase (PME) mendemethylesterifikasi HG sehingga mudah didegradasi oleh polygalacturonase (PG) dan pectate lyase (PL). Penelitian mutakhir pada tomat

menunjukkan bahwa pectate lyase (PL) bukan PG seperti yang lama dipercaya merupakan enzim utama yang mengendalikan pelunakan buah tomat (Wang et al., 2018). Buktinya: silencing gen *SIPL* menghasilkan buah yang jauh lebih firm tanpa mengubah komposisi kimia lainnya.

MEKANISME MOLEKULER PELUNAKAN DINDING SEL BUAH

1. Tahap Inisiasi: Pectin methylesterase (PME) mengkatalisis demethylesterifikasi HG. Proses ini memiliki dua mode: *block-wise* (memperkaku dinding sel melalui ikatan silang Ca^{2+}) atau *random* (memfasilitasi degradasi oleh PG). Mode yang aktif bergantung pada isoenzim PME yang dominan pada setiap fase pematangan.

2. Tahap Depolimerisasi: Polygalacturonase (PG) menghidrolisis ikatan α -1,4 antara residu galakturonat yang tidak termetilasi. Pectate lyase (PL) memotong secara beta-eliminasi. Keduanya bekerja sinergistis, meskipun kontribusi relatif keduanya bervariasi antarspesies (Wang et al., 2018).

3. Modifikasi Hemiselulosa: Endo-1,4- β -glukanase (cellulase, Cx), xyloglucan endotransglucosylase/hydrolase (XTH), dan ekspansin memodifikasi mikrofibril selulosa dan matriks xiloglucan yang menghubungkan fibril selulosa. Ekspansin tidak mendegradasi, melainkan melonggarkan ikatan hidrogen antara polimer dinding sel, berkontribusi pada 'loosening' (pelonggaran) awal dinding sel.

4.2.4 Perubahan Komposisi Gula dan Asam: Rasa dan Manis

Transformasi rasa selama pematangan terutama melibatkan dua proses: (1) hidrolisis pati menjadi gula sederhana (glukosa, fruktosa, sukrosa), dan (2) degradasi asam organik (malat, sitrat, tartrat) yang menyebabkan penurunan keasaman. Kombinasi peningkatan gula dan penurunan asam menghasilkan peningkatan rasio TSS/TA yang menjadi indikator kematangan utama (Yahia et al., 2017).

Pada pisang, proses konversi pati ke gula sangat dramatis: kandungan pati menurun dari ~20% pada buah mentah menjadi <1% pada buah matang penuh, sementara kandungan gula total meningkat dari ~1% menjadi ~16–20% (Maduwanthi & Marapana, 2019). Enzim-enzim kunci yang terlibat meliputi amilase (α - dan β -), fosforilase, dan sukrosa sintase. Etilen menginduksi ekspresi gen-gen enzim ini, menjelaskan mengapa pisang yang terpapar etilen matang dengan lebih seragam dan sempurna.

4.2.5 Pembentukan Aroma: Senyawa Volatil

Aroma buah yang khas terbentuk dari campuran ratusan senyawa volatil, terutama ester, aldehida, keton, terpen, dan alkohol rantai pendek. Senyawa-senyawa ini disintesis melalui berbagai jalur metabolisme: jalur lipxygenase (LOX) dari asam lemak, jalur isoprenoid untuk terpen dan apokarotenoid, dan jalur amino acid catabolism untuk ester dan senyawa aromatik (Tipu & Sherif, 2024)

4.3 Buah Klimaterik dan Non-Klimaterik

4.3.1 Dasar Klasifikasi

Klasifikasi buah menjadi klimakterik dan non-klimakterik didasarkan pada dua kriteria fisiologis utama: (1) ada atau tidaknya lonjakan laju respirasi (climacteric rise) selama pematangan, dan (2) ada atau tidaknya lonjakan produksi etilen yang bersifat autokatalitik selama pematangan (Liu et al., 2024). Istilah 'klimakterik' berasal dari bahasa Yunani yang berarti 'tangga' mengacu pada kurva respirasi yang naik secara mendadak saat pematangan dimulai.

Penting dipahami bahwa dikotomi klimakterik/non-klimakterik kini semakin dipandang sebagai spektrum kontinum daripada kategori yang mutually exclusive (Arista & Ardiningtyas, 2024). Beberapa buah menunjukkan karakteristik peralihan: melon misalnya, ada kultivar yang klimakterik (cantaloupe) dan non-klimakterik (honeydew). Bahkan buah non-klimakterik seperti stroberi memiliki respons terhadap etilen eksogen meskipun tidak menghasilkan lonjakan etilen endogen.

Tabel 4. 2. Perbandingan Komprehensif Buah Klimakterik dan Non-Klimakterik. (Sumber: diadaptasi dari (Liu et al., 2024); (Arista & Ardiningtyas, 2024))

Karakteristik	Buah Klimakterik	Buah Non-Klimakterik
Pola respirasi	Ada lonjakan respirasi (climacteric rise) yang nyata saat pematangan	Respirasi menurun bertahap, tidak ada lonjakan

Karakteristik	Buah Klimakterik	Buah Non-Klimakterik
Produksi etilen	Lonjakan produksi etilen autokatalitik (System 2); dapat mencapai 1–100 $\mu\text{L/kg}\cdot\text{jam}$	Produksi etilen minimal dan konstan; System 1 mendominasi ($<0,1 \mu\text{L/kg}\cdot\text{jam}$)
Respon etilen eksogen	Sangat sensitif: mempercepat dan menyeragamkan pematangan	Sebagian berrespons (terutama melunakkan) namun tidak memicu climacteric rise
Hormon pengatur utama	Etilen (C_2H_4)	Asam absisat (ABA); gula (sukrosa)
Kemampuan matang pasca-panen	Dapat dipanen saat mentah dan dimatangkan kemudian	Harus dipanen saat tingkat kematangan konsumsi sudah tercapai
Efek 1-MCP	Kuat: sangat menghambat pematangan	Bervariasi: efek terbatas pada pelunakan
Contoh komoditas	Pisang, tomat, mangga, alpukat, apel, pir, peach, kiwi	Stroberi, anggur, jeruk, semangka, nanas, ceri, leci, blueberry

4.3.2 Sistem Biosintesis Etilen: System 1 dan System 2

Pada buah klimakterik, produksi etilen berlangsung dalam dua sistem yang berbeda secara kualitatif, yang dikenal sebagai System 1 dan System 2. Konsep ini pertama kali dikemukakan oleh (Tipu & Sherif, 2024). dan telah menjadi kerangka konseptual yang diterima secara luas.

SYSTEM 1 vs. SYSTEM 2 BIOSINTESIS ETILEN

System 1 (Pra-klimakterik / Basal): Berlangsung pada semua fase perkembangan buah sebelum pematangan. Laju produksi sangat rendah ($0,01-0,1 \mu\text{L/kg}\cdot\text{jam}$). Bersifat *self-inhibitory*: etilen yang dihasilkan menghambat biosintesis etilen lebih lanjut. Dikendalikan oleh isoform ACS dan ACO tertentu (LeACS1A, LeACS6 pada tomat). System 1 juga dominan pada buah non-klimakterik sepanjang siklus hidupnya.

System 2 (Klimakterik / Autokatalitik): Dipicu oleh faktor transkripsi pematangan (RIN, NOR, CNR) ketika buah mencapai kematangan fisiologis. Laju produksi melonjak $100-10.000$ kali lipat (dapat mencapai $>100 \mu\text{L/kg}\cdot\text{jam}$). Bersifat *autokatalitik*: etilen yang dihasilkan merangsang lebih banyak biosintesis etilen melalui umpan balik positif. Dikendalikan oleh isoform ACS dan ACO berbeda (LeACS2, LeACS4, LeACO1 pada tomat) (Tipu & Sherif, 2024).

4.3.3 Mekanisme Pematangan Non-Klimakterik

Pematangan buah non-klimakterik merupakan proses yang lebih kompleks dan kurang dipahami dibandingkan buah klimakterik. Stroberi (*Fragaria × ananassa*) telah menjadi model utama untuk mempelajari

mekanisme ini. Berbeda dengan tomat (model klimakterik), stroberi tidak menunjukkan lonjakan respirasi atau etilen, namun mengalami semua perubahan fisik dan kimia pematangan yang serupa (Wang et al., 2018).

Penemuan bahwa ABA bukan etilen merupakan regulator utama pematangan stroberi telah merevolusi pemahaman kita tentang regulasi pematangan non-klimakterik. ABA endogen meningkat tajam saat transisi dari buah putih ke buah merah. Silencing gen *FaNCED1* (9-cis-epoxycarotenoid dioxygenase, enzim kunci biosintesis ABA) menggunakan RNAi menghasilkan buah yang tetap putih dan keras, dan fenotip ini dapat dipulihkan dengan aplikasi ABA eksogen (Yang et al., 2022).

4.4 Regulasi Hormon Pada Pematangan Buah

4.4.1 Etilen: Hormon Sentral Pematangan Klimakterik

Etilen (C_2H_4) disintesis dari asam amino metionin melalui jalur Yang Cycle yang telah dielucidasi secara lengkap. Jalur ini terdiri dari tiga tahap reaksi utama (Tipu & Sherif, 2024):

1. Tahap 1 – Konversi Metionin ke SAM: Metionin diubah menjadi S-adenosyl-methionine (SAM) oleh enzim SAM synthetase. SAM merupakan donor gugus metil yang juga digunakan dalam berbagai reaksi metilasi seluler.
2. Tahap 2 – Konversi SAM ke ACC: SAM diubah menjadi 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid (ACC) oleh enzim ACC synthase (ACS). Tahap ini merupakan langkah pembatas laju (rate-limiting step) dalam biosintesis etilen. Enzim ACS dikodekan oleh keluarga multigen (9 gen pada tomat) dengan pola ekspresi berbeda.

3. Tahap 3 – Konversi ACC ke Etilen: ACC dioksidasi menjadi etilen (C_2H_4), CO_2 , dan HCN oleh enzim ACC oxidase (ACO). Reaksi ini memerlukan oksigen dan Fe^{2+} sebagai kofaktor. ACO juga dikodekan oleh keluarga multigen.

JALUR BIOSINTESIS ETILEN (Yang Cycle)

Metionin → **SAM Synthetase** → SAM → **ACC Synthase (ACS)** → ACC → **ACC Oxidase (ACO)** → ETILEN (C_2H_4)

Catatan: MTA (5'-methylthioadenosine) yang dihasilkan selama konversi SAM → ACC didaur ulang kembali menjadi metionin melalui MTR pathway, sehingga suplai metionin tetap terjaga meskipun laju produksi etilen sangat tinggi (Tipu & Sherif, 2024)

Etilen dipersepsikan oleh reseptor membran ER (*endoplasmic reticulum*) yang pada tomat terdiri dari 6 protein (Sletr1–Sletr6). Reseptor etilen merupakan histidine kinase yang bekerja dalam paradigma unik: tanpa etilen, reseptor aktif dan memfosforilasi/mengaktivasi CTR1 (*Constitutive Triple Response 1*), sebuah Raf-like kinase yang menekan respons etilen. Dengan etilen terikat, reseptor menjadi tidak aktif, CTR1 tidak lagi aktif, dan jalur hilir diaktifkan (Liu et al., 2024)

Inaktivasi CTR1 memungkinkan protein EIN2 (*Ethylene Insensitive 2*) untuk tidak terdegradasi dan

memindahkan sinyalnya ke nukleus. Di nukleus, faktor transkripsi EIN3/EIL1 yang semula terdegradasi oleh proteasom (melalui EBF1/EBF2 F-box proteins) kini distabilkan. EIN3/EIL1 kemudian mengaktifasi ekspresi Ethylene Response Factors (ERFs), yang pada akhirnya menginduksi ekspresi ratusan gen pematangan termasuk gen-gen yang mengkodekan enzim pelunakan, sintesis pigmen, dan pembentukan aroma (Tipu & Sherif, 2024)

4.4.2 Asam absisat (ABA): Regulator Pematangan Non-Klimaterik

Asam absisat (ABA) adalah sesquiterpenoid C_{15} yang disintesis dari prekursor karotenoid (*xanthoxin*) melalui jalur tidak langsung (C_{40} carotenoid indirect pathway). Enzim kunci dalam biosintesis ABA adalah 9-cis-epoxycarotenoid dioxygenase (NCED) yang mengkatalisis langkah pembatas laju (Yang et al., 2022). Pada buah non-klimakterik seperti stroberi, anggur, dan blueberry, kandungan ABA meningkat tajam saat awal pematangan dan mengorkestrasikan hampir semua aspek perubahan kualitas.

Persepsi ABA pada buah non-klimakterik melibatkan setidaknya dua reseptor yang telah dikarakterisasi pada stroberi: (1) PYR/PYL/RCAR (Pyrabactin resistance/PYR-like/Regulatory Component of ABA Receptors) yang merupakan reseptor larutan sitoplasma, dan (2) ABAR/CHLH (Putative ABA receptor/Mg-chelatase H subunit) yang merupakan reseptor terkait plastid (Wang et al., 2018). Kedua jalur ini berkonvergensi untuk mengaktifasi faktor transkripsi AREB/ABF yang kemudian menginduksi ekspresi gen-gen pematangan.

Tabel 4. 3. Komponen Utama Jalur Transduksi Sinyal ABA pada Pematangan Buah Non-Klimakterik. (Sumber: diadaptasi dari (Wang et al., 2018; Yang et al., 2022)

Komponen Sinyal	Fungsi dalam Jalur ABA	Status saat Ada ABA
PYR/PYL (Reseptor)	Mengikat ABA secara langsung; menghambat PP2C	Aktif – mengikat ABA dan PP2C
PP2C (Phosphatase 2C)	Menginhibisi SnRK2 (negatif regulator)	Terinhibisi oleh kompleks PYR-ABA
SnRK2 (Protein Kinase)	Memfosforilasi AREB/ABF; mengaktivasi respons ABA	Aktif – memfosforilasi AREB/ABF
AREB/ABF (Faktor Transkripsi)	Mengikat elemen ABRE di promotor gen target	Aktif – menginduksi ekspresi gen pematangan

4.4.3 Interaksi Hormon dalam Regulasi Pematangan

Pematangan buah tidak dikendalikan oleh satu hormon tunggal, melainkan oleh jaringan sinyal hormonal yang kompleks. Etilen dan ABA merupakan pemain sentral pada buah klimakterik dan non-klimakterik, namun hormon-hormon lain memainkan peran modulatoris yang penting (Tipu & Sherif, 2024) .

Auksin (IAA): Pengatur Dua Arah

Auksin memiliki peran yang paradoks dalam pematangan: pada fase awal perkembangan buah, auksin mendorong pertumbuhan sel dan menghambat pematangan; namun pada buah yang mendekati kematangan, penurunan kadar auksin justru menjadi sinyal pemicu pematangan. Pada stroberi, sinyal dari biji (*achene*) yang memproduksi auksin sangat penting pengangkatan biji menyebabkan reseptor (*receptacle*) tidak matang secara normal (Yang et al., 2022).

Giberelin (GA): Penghambat Pematangan

Giberelin secara umum bertindak sebagai antagonis pematangan. GA₃ pada pisang menunda degradasi pati, modifikasi dinding sel, dan lonjakan respirasi klimakterik. Secara molekuler, GA menghambat ekspresi gen-gen biosintesis etilen (ACS dan ACO) serta gen-gen biosintesis ABA (NCED), sehingga secara simultan menekan dua jalur utama pematangan (Tipu & Sherif, 2024). Pemahaman ini menjadi dasar penggunaan giberelin eksogen untuk menunda pematangan pada beberapa komoditas.

Sitokinin (CK): Penunda Penuaan

Sitokinin berperan penting dalam menunda *senescence* proses lanjutan setelah pematangan. Sitokinin mengaktifasi ekspresi gen-gen yang terlibat dalam pemeliharaan kloroplas dan menghambat degradasi klorofil, memberikan efek '*stay-green*'. Interaksi sitokinin dengan etilen umumnya bersifat antagonis: sitokinin menghambat produksi etilen dengan mengurangi ekspresi gen ACS tertentu (Yang et al., 2022).

RINGKASAN INTERAKSI HORMONAL DALAM PEMATANGAN BUAH

Etilen ↑ → Menginduksi/mempercepat pematangan klimakterik; memicu System 2 autokatalitik menginduksi gen pelunakan, pigmentasi, pembentukan aroma.

ABA ↑ → Menginduksi pematangan non-klimakterik meningkatkan antosianin (warna) mendorong pelunakan dapat bersinergi dengan etilen pada buah klimakterik.

Auksin ↑ (awal) / ↓ (menjelang matang) → Mendorong pertumbuhan dan menghambat pematangan pada fase awal; penurunan auksin menjadi sinyal awal pematangan.

Giberelin ↑ → Menghambat pematangan menunda degradasi pati menekan biosintesis etilen dan ABA berguna untuk extend shelf life.

Sitokinin ↑ → Menunda senescence menghambat degradasi klorofil; antagonis terhadap etilen berguna untuk mempertahankan kesegaran (Tipu & Sherif, 2024).

RANGKUMAN

Pematangan buah merupakan program genetik yang sangat terkoordinasi, melibatkan perubahan respirasi, warna, tekstur, rasa, dan aroma. Berikut poin-poin kunci yang harus dikuasai: Konsep Dasar: Pematangan (ripening) ≠ penuaan (senescence). Pematangan adalah program genetik aktif yang dikendalikan faktor transkripsi (RIN, NOR,

CNR) dan dimodulasi oleh hormon. Mutu tidak dapat ditingkatkan pascapanen—hanya dapat dipertahankan. Perubahan Fisiologis: Lima perubahan utama saling terkoordinasi: (i) laju respirasi, (ii) degradasi klorofil dan sintesis pigmen baru, (iii) pelunakan dinding sel oleh enzim PG, PL, PME, ekspansin, (iv) konversi pati→gula dan degradasi asam organik, (v) sintesis senyawa volatil aroma. Klimakterik vs Non-Klimakterik: Klimakterik: ada climacteric rise respirasi + lonjakan etilen autokatalitik (System 2). Non-klimakterik: tidak ada lonjakan tersebut, diregulasi ABA. Batasannya tidak kaku—ada spektrum peralihan. Etilen (Klimakterik): Disintesis via SAM→ACC→Etilen (enzim ACS dan ACO). Dipersepsikan reseptor ETR. Jalur sinyal: ETR→CTR1(inaktif)→EIN2→EIN3/EIL1→ERF→gen pematangan. System 2 bersifat autokatalitik.

ABA (Non-Klimakterik): Disintesis dari karotenoid via NCED. Dipersepsikan PYR/PYL dan ABAR. Jalur: PYR-ABA→PP2C(inhibisi)→SnRK2(aktif)→AREB/ABF→genpematangan. ABA menginduksi antosianin, pelunakan, dan perubahan kualitas lainnya. Interaksi Hormonal: Etilen dan ABA saling bersinergi. Auksin dan giberelin umumnya menghambat pematangan. Sitokinin menunda senescence. Manipulasi keseimbangan hormonal menjadi dasar strategi teknologi pascapanen (1-MCP, AVG, GA eksogen).

TES FORMATIF

Kerjakan setiap soal dengan argumentasi ilmiah yang kuat, mengacu pada konsep dan mekanisme yang telah dipelajari dalam bab ini. Setiap jawaban dinilai atas ketepatan konsep (40%), kedalaman analisis (40%), dan kemampuan mengintegrasikan pengetahuan antarkonsep (20%).

1. Jelaskan perbedaan fundamental antara pematangan (ripening) dan penuaan (senescence) dari perspektif fisiologi dan biokimia. Mengapa perbedaan ini penting dalam merancang strategi penanganan pascapanen? Berikan contoh spesifik dari komoditas buah yang Anda kenal.
2. Uraikan secara lengkap jalur biosintesis etilen (Yang Cycle) pada buah klimakterik. Identifikasi dua langkah pembatas laju dalam jalur ini dan jelaskan bagaimana teknologi pascapanen modern (misalnya penggunaan 1-MCP atau AVG) mengeksplotasi pengetahuan tentang jalur ini untuk memperpanjang masa simpan buah.
3. Sebuah penelitian melaporkan bahwa stroberi yang disilencing gen FaNCED1 (melalui RNA interference) gagal matang secara normal. Namun, ketika buah tersebut diberi perlakuan ABA eksogen, proses pematangan dapat dipulihkan. Apa kesimpulan yang dapat ditarik dari eksperimen ini tentang regulasi pematangan non-klimakterik? Buatlah diagram jalur sinyal yang menjelaskan bagaimana ABA eksogen memulihkan pematangan pada buah tersebut.
4. Bandingkan dan kontraskan jalur transduksi sinyal etilen ($ETR \rightarrow CTR1 \rightarrow EIN2 \rightarrow EIN3 \rightarrow ERF$) dengan jalur transduksi sinyal ABA ($PYR \rightarrow PP2C \rightarrow SnRK2 \rightarrow AREB/ABF$) pada pematangan buah. Mengapa inhibitor reseptor etilen (1-MCP) sangat efektif pada buah klimakterik tetapi relatif kurang efektif pada buah non-klimakterik?
5. Giberelin diketahui menghambat pematangan buah. Jelaskan mekanisme molekuler yang mendasari efek ini, termasuk dampaknya terhadap biosintesis etilen (jalur ACS dan ACO) dan biosintesis ABA (jalur NCED). Diskusikan aplikasi praktis pengetahuan ini

dalam industri pascapanen untuk satu komoditas buah pilihan Anda.

6. Seorang petani mangga memanen buahnya saat masih hijau (pra-klimakterik) untuk keperluan ekspor ke pasar yang berjarak 3 hari perjalanan. Di packing house tujuan, buah akan dimatangkan menggunakan etilen. Jelaskan secara biokimia mengapa strategi ini berhasil untuk mangga (klimakterik) tetapi tidak akan berhasil jika diterapkan pada nanas atau stroberi (non-klimakterik). Apa risiko yang harus diperhatikan dalam strategi pematangan buatan ini?

Latihan Project-Based Learning (PjBL)

Setiap kasus berikut merepresentasikan permasalahan nyata di industri pascapanen. Kerjakan secara kelompok (3–4 orang) menggunakan kerangka: Identifikasi Masalah → Analisis Penyebab (berbasis mekanisme fisiologis) → Solusi Berbasis Bukti Ilmiah → Evaluasi dan Implementasi.

Kasus 1: Masalah Pematangan Tidak Seragam Pada Pisang Ekspor

Sebuah Perusahaan eksportir pisang Cavendish dari Sulawesi melaporkan masalah: dari setiap pengiriman 20 ton pisang, sekitar 15-20% matang terlalu cepat (sudah kuning dan terlalu lunak saat tiba di Jepang), sementara 10% lainnya tidak matang dengan normal bahkan setelah diperlakukan dengan etilen di negara tujuan. Analisis awal menunjukkan: (a) pemanenan dilakukan dalam satu hari namun dari kebun dengan elevasi berbeda (200-800 mdpl); (b) tidak ada *pre-cooling* pasca panen; (c) transportasi darat 12 jam dalam truk tidak berpendingin dengan suhu 32-35°C; (d) beberapa tandan menunjukkan tanda-tanda memar di bagian 'crown' akibat penumpukan.

TUGAS:

- (a) Analisis secara biokimia mengapa perbedaan elevasi kebun dapat mengakibatkan perbedaan tingkat kematangan fisiologis pisang yang dipanen pada hari yang sama. Kaitkan dengan indeks kematangan yang seharusnya digunakan.
- (b) Jelaskan mekanisme fisiologis mengapa memar pada 'crown' (pangkal tandan) dapat mempercepat pematangan keseluruhan tandan pisang. Kaitkan dengan dinamika system 1 ke System 2 biosintesis etilen.
- (c) Rancang protokol penanganan pascapanen komprehensif untuk mengatasi masalah ini dari kebun hingga *packing house* berbasis pemahaman Anda tentang fisiologi pematangan klimaterik pisang.
- (d) Rekomendasikan kondisi *ripening room* yang optimal (suhu, kelembaban, konsentrasi etilen, durasi) untuk memastikan pematangan yang seragam di negara tujuan.

DAFTAR PUSTAKA

- Arista, N. I. D., & Ardiningtyas, S. A. (2024). Comparative analysis of ethylene-induced ripening in climacteric and non-climacteric fruits: implications for post-harvest management. *Social Agriculture, Food System, and Environmental Sustainability*, 1(2), 90–100.
- Liu, M., Wang, C., Ji, H., Sun, M., Liu, T., Wang, J., Cao, H., & Zhu, Q. (2024). Ethylene biosynthesis and signal transduction during ripening and softening in non-climacteric fruits: an overview. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1368692.
- Maduwanthi, S. D. T., & Marapana, R. A. U. J. (2019). Induced ripening agents and their effect on fruit quality of banana. *International Journal of Food Science*, 2019(1), 2520179.
- Susanti, S., & Yumeina, D. (2024). Analysis of Physico-Chemical Changes and Mechanical Damage of Tomato (*Lycopersicon Esculentum* L.) During the Transportation. *BIO Web of Conferences*, 96, 02005.
- Tipu, M. M. H., & Sherif, S. M. (2024). Ethylene and its crosstalk with hormonal pathways in fruit ripening: mechanisms, modulation, and commercial exploitation. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1475496.
- Wang, D., Yeats, T. H., Uluisik, S., Rose, J. K. C., & Seymour, G. B. (2018). Fruit softening: revisiting the role of pectin. *Trends in Plant Science*, 23(4), 302–310.

- Yahia, E. M., Maldonado Celis, M. E., & Svendsen, M. (2017). The contribution of fruit and vegetable consumption to human health. *Fruit and Vegetable Phytochemicals: Chemistry and Human Health, 2nd Edition*, 1–52.
- Yang, J., Chen, Y., Xiao, Z., Shen, H., Li, Y., & Wang, Y. (2022). Multilevel regulation of anthocyanin-promoting R2R3-MYB transcription factors in plants. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1008829.

BAB 5

SENESCENCE DAN PENUAAN

DESKRIPSI PEMBELAJARAN

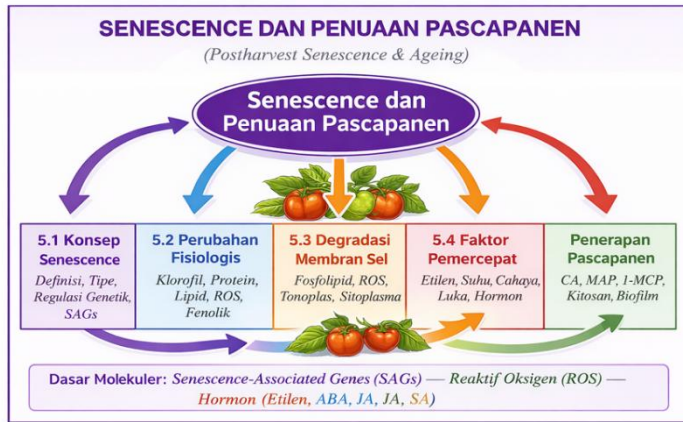
Bab ini mengkaji secara mendalam fenomena *senescence* (penuaan) pada komoditas hortikultura dan pascapanen dari perspektif fisiologi, biokimia, dan molekuler. *Senescence* merupakan tahap akhir perkembangan yang terprogram secara genetik, mencakup serangkaian perubahan sistemik yang mengakibatkan hilangnya fungsi sel dan jaringan secara progresif. Mahasiswa akan memahami konsep dasar *senescence*, mekanisme biokimia yang mendasari perubahan fisiologis selama penuaan, proses degradasi membran sel sebagai pusat koordinasi *senescence*, serta berbagai faktor internal dan eksternal yang mempercepat proses penuaan pada komoditas pascapanen. Pemahaman komprehensif terhadap mekanisme *senescence* menjadi landasan ilmiah yang esensial untuk merancang intervensi teknologi pascapanen yang tepat sasaran guna mempertahankan kualitas dan memperpanjang umur simpan komoditas pertanian tropika.

KOMPETENSI PEMBELAJARAN

Setelah mengikuti bab 5 *senescence* dan penuaan ini diharapkan mahasiswa dan mahasiswi memiliki pengetahuan dan kemampuan:

1. Mendefinisikan dan membedakan konsep senescence dari perspektif fisiologi dan biologi molekuler secara akurat
2. Menganalisis kesesuaian jenis kemasan dan teknologi Mengidentifikasi dan menjelaskan mekanisme biokimia perubahan fisiologis selama penuaan pascapanen
3. Menganalisis proses degradasi membran sel sebagai kejadian sentral dalam senescence dan kaitannya dengan kerusakan pascapanen
4. Mengevaluasi peran berbagai faktor internal dan lingkungan yang mempercepat senescence komoditas pascapanen
5. Merancang strategi pengendalian senescence berbasis pemahaman mekanisme molekuler dan fisiologis yang mendalam
6. Mengintegrasikan konsep senescence dalam konteks penanganan pascapanen komoditas buah, sayuran, rempah, tanaman obat, dan sereal tropika

PETA KONSEP PEMBELAJARAN



5.1 Konsep Senescence

5.1.1 Definisi dan Perspektif Teoritis Senescence

Senescence pada tumbuhan didefinisikan sebagai fase perkembangan terminal yang terprogram secara genetik, ditandai dengan aktivasi sistemik program kematian sel yang teratur (*programmed cell death/PCD*) dan disertai remobilisasi nutrisi secara masif dari organ yang menua ke organ muda atau biji. Berbeda dari kematian sel nekrotik yang bersifat pasif dan tidak teratur, senescence merupakan proses aktif, terorganisasi, dan dapat diregulasi yang melibatkan ekspresi ribuan gen spesifik (Woo et al., 2019)

Dalam konteks pascapanen, istilah senescence merujuk pada penurunan kualitas progresif yang dialami komoditas segar setelah terputus dari tanaman induk. Proses ini mencakup: degradasi klorofil (menguning/*yellowing*), pelunakan tekstur, kehilangan aroma, penurunan nilai gizi, dan akhirnya pembusukan. Pemahaman bahwa *senescence* adalah program genetik bukan sekadar deteriorasi pasif membuka peluang intervensi yang lebih presisi dan efektif

melalui pendekatan molekuler maupun teknologi pascapanen konvensional (Watanabe et al., 2013)

Secara historis, konsep *senescence* berevolusi dari paradigma deteriorasi pasif menuju pemahaman sebagai program kematian terprogram yang teregulasi ketat. Perkembangan biologi molekuler modern memungkinkan identifikasi lebih dari 800 *Senescence-Associated Genes* (SAGs) pada *Arabidopsis thaliana*, yang sebagian besar homolognya juga ditemukan pada tanaman hortikultura penting. Gen-gen SAG tersebut mengkode faktor transkripsi, enzim hidrolitik, protein terkait autophagy, dan molekul sinyal yang bersama-sama mengkoordinasikan program *senescence* (Woo et al., 2019)

5.1.2 Tipe-tipe *Senescence* pada Komoditas Pascapanen

Senescence pada tanaman dapat diklasifikasikan berdasarkan organ yang mengalaminya dan stimulus pemicunya. *Senescence* daun (*leaf senescence*) merupakan yang paling banyak dipelajari dan relevan untuk komoditas sayuran berdaun; ditandai oleh degradasi kloroplas secara berurutan dan sistematis, dimulai dari thylakoid dan stroma menuju membran kloroplas. *Senescence* buah (*fruit senescence*) berbeda karakter karena berkorelasi erat dengan proses pematangan (ripening) terutama pada buah klimakterik (Guo, 2013; Woo et al., 2019)

Berdasarkan waktu dan ruang terjadinya, *senescence* dibedakan menjadi: (1) *Senescence* monokarpi terjadi di seluruh tanaman setelah reproduksi, pada tanaman semusim; (2) *Senescence* daun sekuensial terjadi pada daun tua terlebih dahulu secara berurutan dari bawah ke atas tanaman tahunan; (3) *Senescence* sinkron terjadi serentak pada seluruh organ yang sama, seperti pada daun musim gugur; dan (4) *Senescence* yang diinduksi stress dipicu oleh faktor biotik maupun abiotik (Liu et al., 2024; Woo et al., 2019)

5.1.3 Regulasi Genetik dan Molekuler Senescence

Regulasi senescence pada tingkat molekuler melibatkan jaringan regulasi yang sangat kompleks, termasuk faktor transkripsi tipe WRKY (terutama WRKY53, WRKY54, WRKY70), faktor transkripsi NAC (NAC016, ANAC055, ORS1), dan faktor bZIP. Faktor-faktor transkripsi ini bekerja dalam hierarki regulasi yang saling berinteraksi dengan jalur sinyal hormon terutama etilen, asam absisat (ABA), asam jasmonat (JA), dan asam salisilat (SA) (Lim et al., 2007; Woo et al., 2019)

Pada tingkat epigenetik, modifikasi histon dan metilasi DNA memainkan peran penting dalam regulasi ekspresi SAGs. Protein kompleks Polycomb Repressive Complex 2 (PRC2) yang memodifikasi histon H3K27me3 berperan dalam menekan ekspresi prematur gen-gen senescence. Penurunan aktivitas PRC2 seiring perkembangan berkontribusi pada dimulainya program senescence. Pemahaman tentang regulasi epigenetik ini membuka peluang baru dalam rekayasa varietas dengan ketahanan senescence yang lebih baik (Liu et al., 2024; Woo et al., 2019)

Tabel 5. 1. Perbandingan karakteristik senescence pada berbagai tipe komoditas pascapanen (Sumber: (Guo, 2013; Lim et al., 2007; Woo et al., 2019)

Parameter	Senescence Daun	Senescence Buah (Klimakterik)	Senescence Buah (Non-Klim.)
Pemicu utama	Intensitas cahaya rendah, N defisiensi, usia	Etilen endogen, pematangan	Penuaan progresif

Parameter	Senescence Daun	Senescence Buah (Klimakterik)	Senescence Buah (Non-Klim.)
Gen kunci	SAG12, SAG113, WRKY53	ACS, ACO, LeEIL	Tidak ada lonjakan etilen
Gejala utama	Yellowing, hilang klorofil	Pelunakan, perubahan warna, aroma	Pelunakan bertahap, kehilangan asam
Hormon dominan	ABA, JA, SA	Etilen, ABA	ABA, sitokinin menurun
Reversibilitas	Tidak reversibel setelah dimulai	Tidak reversibel	Tidak reversibel
Komoditas contoh	Bayam, selada, brokoli	Pisang, mangga, pepaya, tomat	Jeruk, anggur, stroberi

5.2 Perubahan Fisiologis Selama Penuaan

5.2.1 Degradasi Klorofil dan Perubahan Pigmentasi

Degradasi klorofil merupakan penanda paling khas dan visual dari senescence pascapanen, yang secara langsung berdampak pada nilai estetika komoditas. Proses degradasi klorofil melibatkan jalur enzimatik yang terkarakterisasi dengan baik: klorofil → klorofilid (oleh klorofilase) →

feoforbit a (oleh Mg-dekkelatase) → senyawa klorofil tidak berwarna (NCC) melalui jalur pheophorbide a oxygenase (PAO). Enzim kunci PAO dan Red Chlorophyll Catabolite Reductase (RCCR) mengkatalisis langkah-langkah kritis dalam katabolisme klorofil (Hörtensteiner & Kräutler, 2011; Woo et al., 2019)

Bersamaan dengan degradasi klorofil, terjadi pengungkapan atau biosintesis pigmen lain yang memberikan warna khas pada komoditas matang: karotenoid (oranye-kuning) dan antosianin (merah-ungu). Pada pisang, degradasi klorofil dari hijau ke kuning mencerminkan proses senescence/pematangan yang merupakan daya tarik utama bagi konsumen. Pada tomat, sintesis likopen (karotenoid merah) selama senescence meningkatkan nilai antioksidan buah. Perubahan pigmen ini diregulasi oleh etilen dan faktor transkripsi tipe NAC dan MADS-box (Paul et al., 2012a; Watanabe et al., 2013)

5.2.2 Katabolisme Protein dan Remobilisasi Nitrogen

Salah satu fungsi paling kritis dari *senescence* daun adalah remobilisasi nitrogen dari daun tua ke organ muda, biji, atau buah yang sedang berkembang. Nitrogen organik terutama tersimpan dalam protein kloroplas (60-70% total N daun ada di kloroplas, dengan RuBisCO sebagai protein terbanyak). Selama senescence, protease yang diinduksi SAG terutama sistein protease (seperti SAG12), serin protease, dan protease vakuolar mendegradasi protein kloroplas secara sistematis (Liu et al., 2024; Woo et al., 2019)

Proses autophagy memainkan peran sentral dalam remobilisasi protein selama senescence. Struktur autophagosom yang membungkus organel kloroplas yang rusak (chloroplast autophagy/chlorophagy) dan bagian-bagian kloroplas (RCB—*Rubisco-containing bodies*) memungkinkan degradasi terseleksi dan efisien komponen seluler. Mutasi pada gen autophagy (ATG) pada Arabidopsis

menghasilkan fenotipe hipersensitif terhadap nitrogen defisiensi dan senescence prematur, mengkonfirmasi peran sentral autophagy (Lim et al., 2007; Woo et al., 2019)

Pada komoditas pascapanen seperti brokoli dan kacang polong, penurunan kandungan protein terlarut dan aktivitas enzim berkorelasi langsung dengan kemajuan senescence dan kehilangan kualitas. Kehilangan kandungan protein 20-40% dalam 3-5 hari pada suhu ruang merupakan fenomena umum pada sayuran berdaun hijau pascapanen. Penghambatan senescence melalui perlakuan 6-benzylaminopurine (BAP) sitokinin sintetis terbukti memperlambat degradasi protein secara signifikan (Guo, 2013; Watanabe et al., 2013)

5.2.3 Metabolisme Lipid dan Perubahan Asam Lemak

Metabolisme lipid selama senescence berdampak langsung pada integritas membran sel dan kualitas sensoris komoditas. Enzim lipase (phospholipase D/PLD, phospholipase A2/PLA2) yang teraktivasi selama senescence menghidrolisis fosfolipid membran menghasilkan asam lemak bebas dan diasilgliserol. Asam lemak tak jenuh yang dilepaskan menjadi substrat bagi enzim lipooksigenase (LOX) yang mengkatalisis oksidasi lipid menghasilkan hidroperoksida dan berbagai senyawa aldehid volatil (heksanal, heksanol) (Künstler et al., 2015; Liu et al., 2024).

Produk oksidasi lipid memiliki dampak ganda: di satu sisi menghasilkan senyawa volatil yang berkontribusi pada aroma khas buah matang (seperti heksil asetat pada apel dan pisang), namun di sisi lain menghasilkan senyawa off-flavour (bau tengik/rancid) pada komoditas yang terlalu tua. Akumulasi asam lemak bebas juga berkontribusi pada gangguan struktur membran melalui efek detergen pada lapisan lipid bilayer (Künstler et al., 2015; Watanabe et al., 2013).

5.2.4 Perubahan Senyawa Fenolik dan Kapasitas Antioksidan

Metabolisme senyawa fenolik selama senescence merupakan proses yang kompleks dan konteks-spesifik. Pada beberapa komoditas, senescence awal dikaitkan dengan peningkatan konsentrasi senyawa fenolik total sebagai respons stres oksidatif, sementara senescence lanjut umumnya menunjukkan penurunan. Enzim polifenol oksidase (PPO) dan peroksidase (POD) yang teraktivasi selama senescence mengoksidasi senyawa fenolik membentuk kuinon berwarna coklat (enzymatic browning) fenomena yang sangat merugikan pada komoditas sayuran dan buah yang dipotong (Guo, 2013; Watanabe et al., 2013)

Pada buah-buahan berpigmen seperti anggur hitam, stroberi, dan blueberry, biosintesis antosianin yang diinduksi senescence/pematangan meningkatkan kapasitas antioksidan secara dramatis. Jalur biosintesis flavonoid yang teraktivasi oleh faktor transkripsi MYB (seperti VvMYB5a pada anggur) menghasilkan akumulasi antosianin yang memberikan warna menarik sekaligus nilai fungsional tinggi. Pemahaman jalur ini penting untuk optimasi kondisi pascapanen yang dapat mempertahankan atau bahkan meningkatkan kandungan senyawa bioaktif (Paul et al., 2012a; Watanabe et al., 2013).

Tabel 5. 2. Perubahan parameter fisiologis selama tahapan senescence dan dampaknya pada kualitas pascapanen (Sumber: Guo, 2013; Künstler et al., 2015; Woo et al., 2019)

Parameter Fisiologis	Awal Senescence	Senescence Tengah	Senescence Lanjut	Dampak Pascapanen
Kandungan klorofil	Menurun 10-20%	Menurun 40-60%	< 10% awal	Yellowing, kehilangan nilai jual

Parameter Fisiologis	Awal Senescence	Senescence Tengah	Senescence Lanjut	Dampak Pascapanen
Protein terlarut	Stabil / sedikit turun	Turun 20-30%	Turun 50-70%	Penurunan nilai gizi
Aktivitas lipase	Meningkat bertahap	Meningkat pesat	Sangat tinggi	Tengik, off-flavour
Aktivitas PPO/POD	Meningkat	Puncak aktivitas	Mulai turun	Browning enzimatik
Kapasitas antioksidan	Meningkat (stres)	Puncak atau turun	Turun drastis	Kehilangan manfaat fungsional
Produksi etilen	Basal / naik pada klimakterik	Puncak (klimakterik)	Tetap tinggi	Percepatan pematangan
Kandungan air	Normal	Mulai turun	Turun signifikan	Layu, kisut, berat berkurang

5.3 Degradasi Membran Sel

5.3.1 Struktur Membran Sel dan Kerentanannya terhadap Senescence

Membran sel (biomembran) merupakan struktur lipid bilayer yang terdiri dari fosfolipid (fosfatidilkolin/PC, fosfatidiletanolamin/PE, fosfatidilserol/PS, fosfatidilinositol/PI), sterol (kolesterol pada hewan; sitosterol, stigmasterol pada tumbuhan), dan protein membran integral maupun perifer. Perbandingan komposisi asam lemak tak jenuh terhadap jenuh (rasio PUFA/SFA)

menentukan fluiditas dan permeabilitas membran, yang merupakan parameter kunci kesehatan sel (Künstler et al., 2015; Ndlela et al., 2017a)

Dalam kondisi normal, kompartementalisasi seluler yang ketat memisahkan substrat dan enzim yang bersifat reaktif. Vakuola menyimpan enzim hidrolitik (protease asam, ribonuklease, lipase) pada pH asam yang optimal untuk katalisis. Kloroplas mengandung komponen fotosintetik dan protein struktural. Sitoplasma menjaga keseimbangan redoks melalui sistem antioksidan enzimatik (SOD, CAT, APX, GR) dan non-enzimatis (askorbat, glutathione, tokoferol, karotenoid). Disrupsi kompartementalisasi ini merupakan awal dari kaskade senescence (Künstler et al., 2015; Ndlela et al., 2017a)

5.3.2 Peran Spesies Oksigen Reaktif (ROS) dalam Degradasi Membran

Spesies oksigen reaktif (Reactive Oxygen Species/ROS) meliputi superoksida (O_2^-), hidrogen peroksida (H_2O_2), radikal hidroksil (OH), dan oksigen singlet ($^1O_2$) memainkan peran ganda yang paradoks dalam senescence. Pada konsentrasi rendah, ROS berfungsi sebagai molekul sinyal yang mengaktifkan program senescence melalui regulasi ekspresi gen dan modifikasi post-translasi protein. Pada konsentrasi tinggi, ROS bertindak sebagai agen destruktif yang merusak lipid membran, protein, dan DNA secara tidak terseleksi (Liu et al., 2024; Ndlela et al., 2017b)

Stres oksidatif yang dimediasi ROS menginduksi proses peroksidasi lipid (lipid peroxidation) reaksi berantai radikal bebas yang mendegradasi asam lemak tak jenuh pada fosfolipid membran. Produk lipid peroksidasi seperti malondialdehid (MDA) dan 4-hidroksinonenal (4-HNE) merupakan biomarker stres oksidatif yang banyak digunakan dalam riset pascapanen. Akumulasi MDA berkorelasi positif dengan tingkat kerusakan membran dan

negatif dengan kualitas serta umur simpan komoditas (Künstler et al., 2015; Ndlela et al., 2017b)

Sistem pertahanan antioksidan terutama siklus ascorbate-glutathione (ASC-GSH cycle) yang melibatkan enzim APX (ascorbate peroxidase), MDHAR (monodehydroascorbate reductase), DHAR (dehydroascorbate reductase), dan GR (glutathione reductase) berfungsi sebagai garis pertahanan pertama terhadap stres oksidatif. Penurunan aktivitas enzim-enzim ini merupakan tanda awal dimulainya senescence yang tidak terkendali. Perlakuan exogenous askorbat atau antioksidan lain terbukti dapat memperlambat senescence dengan cara mempertahankan kapasitas pertahanan antioksidan jaringan (Liu et al., 2024; Ndlela et al., 2017b)

5.3.3 Disrupsi Tonoplas dan Membran Kloroplas

Tonoplas (membran vakuola) merupakan salah satu membran yang paling rentan dan paling awal mengalami disrupsi selama senescence. Penipisan tonoplas memungkinkan enzim hidrolitik vakuolar (terutama protease dan lipase) bocor ke sitoplasma dan menginisiasi kaskade degradatif yang melibatkan substrat seluler. Kebocoran tonoplas juga mengakibatkan pengasaman sitoplasma akibat masuknya konten vakuola yang bersifat asam, yang mengoptimalkan kondisi pH bagi aktivitas enzim hidrolitik (Ndlela et al., 2017b; Woo et al., 2019)

Disrupsi membran kloroplas berlangsung dalam urutan yang terkarakterisasi dengan baik: pertama thylakoid mengalami pembengkakan dan perubahan struktur grana, diikuti oleh degradasi protein membran thylakoid (terutama D1 dan LHCI), kemudian stroma mengalami degradasi proteinnya, dan akhirnya membran luar-dalam kloroplas kehilangan integritasnya. Proses ini berkorelasi dengan penurunan kapasitas fotosintesis dan merupakan awal dari

yellowing pada sayuran berdaun (Hörtensteiner & Kräutler, 2011; Woo et al., 2019)

5.3.4 Peran Autophagy dalam Dismantle Seluler

Autophagy proses 'self-eating' seluler yang melibatkan pembungkusan organel dan komponen sitoplasma yang akan didegradasi dalam membran ganda (autophagosome) merupakan mekanisme kunci dalam dismantle terorganisasi selama senescence. Berbeda dari nekrosis yang chaotic, autophagy memungkinkan degradasi terseleksi dan terkontrol yang mendukung remobilisasi nutrisi secara efisien. Protein ATG (autophagy-related) seperti ATG8, ATG5, ATG12, dan ATG18 diinduksi ekspresinya secara kuat selama senescence (Lim et al., 2007; Woo et al., 2019)

Dalam konteks pascapanen, aktivasi autophagy berkontribusi pada penurunan tekstur, kehilangan senyawa bioaktif, dan perubahan struktur jaringan yang berdampak pada kualitas sensoris. Namun, karena autophagy juga berperan dalam respons stres, manipulasinya dalam rekayasa ketahanan simpan harus mempertimbangkan keseimbangan antara mekanisme perlindungan dan percepatan senescence (Woo et al., 2019)

5.4 Faktor yang Mempercepat Senescence

5.4.1 Etilen sebagai Hormon Senescence Utama

Etilen (C_2H_4) adalah hormon gas tumbuhan paling berpengaruh dalam regulasi senescence pascapanen. Biosintesis etilen melalui jalur Yang (methionine pathway): metionin $\rightarrow$ S-adenosilmetionin (SAM) $\rightarrow$ 1-aminosiklopropana-1-asam karboksilat (ACC) $\rightarrow$ etilen. Enzim kunci ACC sintase (ACS) dan ACC oksidase (ACO) merupakan target regulasi utama dalam pengendalian produksi etilen. Produksi etilen meningkat dramatis selama klimakterik buah dan selama senescence daun, membentuk

umpan-balik positif yang semakin mempercepat senescence (Lin et al., 2015a; Watanabe et al., 2013)

Reseptor etilen pada tanaman (ETR1, EIN4, ERS1, ERS2, ETR2) adalah protein histidine kinase yang berlokasi di membran ER. Pengikatan etilen mengaktifkan kaskade sinyal melalui $CTR1 \rightarrow EIN2 \rightarrow EIN3/EIL1 \rightarrow ERF$ (Ethylene Response Factor) yang menginduksi ekspresi gen target senescence. Pemahaman mekanisme sinyal ini menjelaskan mengapa 1-methylcyclopropene (1-MCP) penghambat kompetitif reseptor etilen—sangat efektif dalam memperlambat senescence pada berbagai komoditas (Lin et al., 2015a; Watanabe et al., 2013)

5.4.2 Peran Asam Absitat (ABA) dalam Senescence

Asam absisat (ABA) merupakan hormon stres tanaman yang perannya dalam senescence semakin diakui sejajar dengan etilen. ABA menginduksi ekspresi gen NCED (9-cis-epoxycarotenoid dioxygenase) yang merupakan enzim pembatas laju dalam biosintesis ABA, menciptakan umpan-balik positif yang memperkuat sinyal senescence. Pada kondisi stres kekeringan, panas, atau salinitas, peningkatan ABA endogen secara langsung mengakselerasi senescence mekanisme yang secara ekologis bertujuan mempercepat pematangan biji sebelum kondisi lingkungan semakin memburuk (Guo, 2013; Lim et al., 2007)

Interaksi ABA-etilen dalam senescence bersifat sinergistik dan sangat penting dalam konteks pascapanen. Pada buah klimakterik seperti mangga dan pepaya, produksi ABA endogen meningkat menjelang klimakterik dan mendahului lonjakan etilen, menunjukkan peran ABA dalam menginiasi proses pematangan-senescence. Perlakuan inhibitor biosintesis ABA (fluridone) terbukti menghambat senescence pada beberapa komoditas, mengkonfirmasi peran aktif ABA (Lim et al., 2007)

5.4.3 Suhu sebagai Faktor Lingkungan Pemercepat Senescence

Suhu merupakan faktor lingkungan paling signifikan yang mengatur laju senescence pascapanen. Prinsip dasar Q10 menyatakan bahwa setiap kenaikan suhu 10°C akan melipatgandakan laju reaksi biologis 2-3 kali lipat. Dalam konteks senescence, efek suhu bersifat multilevel: (1) meningkatkan laju respirasi dan konsumsi substrat; (2) mengakselerasi ekspresi SAGs dan aktivitas enzim hidrolitik; (3) meningkatkan produksi etilen dan ROS; dan (4) mengurangi efisiensi sistem pertahanan antioksidan (Ndlela et al., 2017b; Watanabe et al., 2013)

Penyimpanan suhu rendah (refrigerasi) merupakan teknologi paling efektif untuk memperlambat senescence karena menghambat aktivitas enzimatis secara menyeluruh. Namun, komoditas tropika rentan terhadap chilling injury pada suhu di bawah ambang kritis (umumnya 10-13°C untuk buah tropika), yang paradoksnya justru memicu respon stres yang mempercepat senescence. Oleh karena itu, suhu optimal penyimpanan harus dikalibrasi secara spesifik untuk setiap komoditas, mempertimbangkan keseimbangan antara penghambatan senescence dan risiko chilling injury (Lim et al., 2007; Watanabe et al., 2013)

5.4.4 Cahaya dan Fotoperiode

Cahaya memiliki peran yang berlawanan bergantung pada tipe komoditas dan intensitasnya. Pada sayuran berdaun hijau, cahaya merupakan faktor yang menghambat senescence kekurangan cahaya (seperti dalam kondisi penyimpanan gelap) mempercepat yellowing dengan mengurangi aktivitas fotosintesis dan menurunkan rasio sitokinin/ABA endogen. Photoreceptor phytochrome dan cryptochrome yang mendeteksi perubahan kualitas dan kuantitas cahaya mengintegrasikan sinyal cahaya ke dalam

jaringan regulasi senescence melalui jalur COP1/HY5 (Guo, 2013; Woo et al., 2019)

Paparan cahaya UV-C pada dosis tertentu (1-10 kJ/m²) paradoksnya dapat menghambat senescence pada beberapa komoditas melalui induksi respons hormesis di mana stres ringan mengaktifkan mekanisme pertahanan yang secara tidak langsung memperlambat *senescence*. UV-C terbukti meningkatkan ekspresi gen antioksidan dan menghambat produksi etilen pada stroberi, tomat, dan brokoli. Namun, dosis yang berlebihan justru menjadi pemicu stres oksidatif yang mempercepat senescence (Watanabe et al., 2013)

5.4.5 Luka Mekanis dan Stress Senescence

Luka mekanis menginduksi respons senescence lokal maupun sistemik melalui beberapa jalur molekuler. Pertama, luka mengaktifkan produksi wound ethylene secara cepat lonjakan etilen yang berbeda dari senescence normal namun memiliki efek serupa dalam menginduksi ekspresi SAGs. Kedua, hidrolisis fosfolipid membran yang rusak menghasilkan asam lemak yang menjadi prekursor asam jasmonat (JA), yang bersama etilen memperkuat respons senescence. Ketiga, luka merupakan titik masuk ROS dari lingkungan yang memperkuat stres oksidatif (Liu et al., 2024; Ndlela et al., 2017b)

5.4.6 Nitrogen, Air, dan Status Nutrisi

Defisiensi nitrogen adalah salah satu inducer senescence terkuat secara fisiologis. Keterbatasan N mendorong aktivasi program remobilisasi nitrogen melalui induksi SAGs dan enzim proteolitik. Dalam praktik pascapanen, kondisi ini mencerminkan situasi produk yang sudah lama terputus dari suplai nutrisi. Sebaliknya, aplikasi nitrogen eksogen dalam bentuk urea atau ammonium sulfat pada larutan perendam atau semprot terbukti dapat memperlambat

senescence pada beberapa komoditas (Guo, 2013; Woo et al., 2019)

Defisit air (water deficit) atau stres kekeringan adalah faktor lingkungan lain yang mengakselerasi senescence melalui peningkatan ABA endogen. Kehilangan turgor sel mengaktifkan osmosensor yang memicu kaskade sinyal ABA yang berujung pada induksi senescence. Dalam konteks pascapanen, pemeliharaan turgiditas jaringan melalui pengelolaan kelembaban relatif yang optimal dan penggunaan bahan penghambat transpirasi (wax coating, MAP) sangat efektif dalam menghambat senescence (Guo, 2013; Watanabe et al., 2013)

Tabel 5. 3. Faktor-faktor pemercepat senescence, mekanisme, dan strategi pengendaliannya (Sumber: Liu et al., 2024; Ndlela et al., 2017b; Watanabe et al., 2013; Woo et al., 2019)

Faktor Pemercepat	Mekanisme Utama	Komoditas Rentan	Strategi Pengendalian
Etilen endogen	Aktivasi ACS/ACO, induksi SAGs, umpan balik positif	Klimakterik: pisang, mangga, tomat	1-MCP, CA (rendah O2), AVG
Suhu tinggi	Akselerasi Q10, aktivasi enzim, ekspresi SAGs	Semua komoditas, terutama berdaun	Pendinginan cepat, cold chain

Faktor Pemercepat	Mekanisme Utama	Komoditas Rentan	Strategi Pengendalian
Cahaya rendah	Penurunan fotosintesis, gangguan rasio sitokinin/ABA	Bayam, selada, brokoli, kangkung	Pencahayaan intermiten saat simpan
Luka mekanis	Wound ethylene, aktivasi JA, kebocoran ROS	Tomat, stroberi, sayur berdaun	Penanganan hati-hati, sanitasi
Defisit air (RH rendah)	Peningkatan ABA, stres osmotik, kehilangan turgor	Sayuran berdaun, buah berair	RH 90-95%, coating lilin/kitosan
Defisiensi nitrogen	Aktivasi proteolisis, induksi remobilisasi N	Semua komoditas berdaun hijau	Perlakuan urea/polyamine eksogen
Radiasi UV berlebih	Stres oksidatif, kerusakan DNA/protein	Buah dengan kulit tipis	Pembungkusan, peneduh selama panen

RANGKUMAN

Bab ini telah mengkaji secara komprehensif fenomena senescence pada komoditas pascapanen dalam empat dimensi utama:

Konsep Senescence: Senescence adalah program kematian sel terprogram secara genetik yang melibatkan lebih dari 800 Senescence-Associated Genes (SAGs). Ia berbeda dari nekrosis pasif karena bersifat terorganisasi, reversibel pada tahap awal, dan berfungsi dalam remobilisasi nutrisi. Regulasi melibatkan jaringan faktor transkripsi WRKY, NAC, bZIP, dan dipengaruhi oleh hormon etilen, ABA, JA, dan SA. **Perubahan fisiologis:** senescence menginduksi degradasi klorofil melalui jalur PAO/RCCR, katabolisme protein melalui sistein protease dan autophagy, oksidasi lipid oleh lipase dan LOX yang menghasilkan senyawa volatil, serta perubahan senyawa fenolik yang berpengaruh pada penampilan dan nilai fungsional komoditas. **Degradasi Membran Sel:** ROS berperan dual sebagai sinyal senescence (konsentrasi rendah) dan agen destruktif (konsentrasi tinggi) melalui peroksidasi lipid. Disrupsi tonoplas melepaskan enzim hidrolitik vakuolar ke sitoplasma. Autophagy memediasi dismantle terorganisasi komponen seluler. Biomarker MDA dan 4-HNE mencerminkan tingkat kerusakan oksidatif membran.

Faktor Pemercepat: Etilen melalui kaskade ETR1-CTR1-EIN2-EIN3/EIL1-ERF merupakan induktor senescence terkuat pada buah klimakterik. ABA bersifat sinergistik dengan etilen. Suhu tinggi mengakselerasi senescence melalui efek Q10 multilevel. Cahaya rendah, luka mekanis, defisit air, dan defisiensi nitrogen merupakan faktor lingkungan pemercepat senescence yang penting. **Implikasi Pascapanen:** Setiap komoditas tropika memiliki profil senescence yang unik memerlukan pendekatan pengendalian spesifik—dari 1-MCP untuk buah klimakterik, pendinginan cepat untuk sayuran berdaun, hingga

pengelolaan dormansi untuk rimpang rempah. Integrasi pemahaman molekuler dengan teknologi pascapanen konvensional membuka peluang inovasi yang lebih presisi.

TES FORMATIF ESSAI

Jawablah pertanyaan berikut dengan analisis mendalam berbasis konsep teoritis (minimal 200 kata/soal):

1. Analisis Mekanisme Molekuler Senescence: Jelaskan hierarki regulasi senescence dari tingkat gen (SAGs, faktor transkripsi WRKY dan NAC) hingga tingkat biokimia (ekspresi enzim hidrolitik). Bagaimana pemahaman tingkat molekuler ini dapat diaplikasikan dalam rekayasa teknologi pascapanen yang lebih presisi? Berikan contoh konkret pada minimal dua komoditas tropika
2. Peran ROS dalam Senescence (Paradoks Dualitas): Uraikan peran paradoks ROS sebagai sinyal senescence sekaligus agen destruktif. Jelaskan mekanisme sistem pertahanan antioksidan (siklus ASC-GSH) dalam konteks senescence pascapanen. Mengapa perlakuan antioksidan eksogen tidak selalu efektif dalam menghambat senescence? Diskusikan implikasinya untuk desain strategi pengendalian.
3. Komparasi Senescence Klimakterik vs Non-Klimakterik: Bandingkan secara mendalam proses senescence pada komoditas klimakterik (pilih salah satu: pisang, mangga, atau pepaya) dengan komoditas non-klimakterik (pilih: jeruk, nanas, atau stroberi). Fokuskan analisis pada peran etilen, perubahan pigmen, dan degradasi dinding sel. Apa implikasi perbedaan ini bagi strategi penanganan pascapanen?
4. Integrasi Faktor Lingkungan dalam Regulasi Senescence: Diskusikan interaksi sinergistik antara suhu, kelembaban, dan cahaya dalam regulasi senescence

pada komoditas sayuran berdaun tropis (fokus pada bayam atau brokoli). Rancang kondisi penyimpanan optimal yang meminimalkan laju senescence berdasarkan mekanisme fisiologis yang telah dipelajari. Sertakan justifikasi ilmiah untuk setiap parameter yang diusulkan.

5. Senescence Rempah dan Tanaman Obat: Analisis mengapa komoditas rimpang rempah (jahe, kunyit) memiliki umur simpan yang lebih panjang dibandingkan sayuran berdaun. Jelaskan konsep dormansi versus senescence dalam konteks ini. Faktor apa saja yang dapat mematahkan dormansi dan memicu senescence prematur? Bagaimana teknologi pascapanen dapat mengeksplorasi pemahaman tentang dormansi rimpang untuk memaksimalkan umur simpan?

Latihan Project-Based Learning (PjBL)

SKENARIO KASUS:

PT Agro Tropika Mandiri, sebuah perusahaan ekspor komoditas hortikultura di Sulawesi Selatan, menghadapi permasalahan serius: pengiriman kontainer berisi mangga harum manis (500 ton/bulan) ke pasar Jepang mengalami tingkat penolakan (rejection rate) mencapai 35% akibat senescence prematur—yellowing, pelunakan berlebih, dan aroma fermentasi—yang sudah tampak saat tiba di pelabuhan Osaka setelah 14 hari perjalanan. Analisis awal menunjukkan: (1) panen dilakukan pada tingkat kematangan yang bervariasi; (2) waktu dari panen ke pendinginan (field heat removal) rata-rata 6-8 jam; (3) suhu container fluktuatif antara 12-16°C; (4) tidak ada perlakuan pascapanen khusus yang dilakukan. Perusahaan menargetkan rejection rate turun menjadi <5% dalam 6 bulan.

Tugas Kelompok (4-5 mahasiswa):

- **Diagnosis Ilmiah (Minggu 1):** Identifikasi mekanisme senescence yang terjadi berdasarkan gejala yang diamati. Kaitkan setiap gejala (yellowing, pelunakan, aroma fermentasi) dengan proses biokimia dan fisiologis spesifik yang telah dipelajari. Tentukan faktor-faktor pemercepat senescence yang beroperasi dalam kasus ini dan hierarki kepentingannya.
- **Investigasi Rantai Pasok (Minggu 2):** Rancang protokol investigasi lapangan untuk memetakan titik-titik kritis senescence dalam rantai pasok: dari kebun panen → pengumpulan → sortasi → packing house → pre-cooling → kontainer → pelabuhan → tujuan. Identifikasi variabel kritis yang perlu dimonitor dan metode pengukurannya.
- **Solusi Teknologi Terintegrasi (Minggu 3):** Rancang paket teknologi pascapanen berbasis pemahaman mekanisme senescence yang mencakup: (a) kriteria indeks panen berbasis fisiologi; (b) perlakuan pra-simpan (1-MCP, hot water treatment, atau lainnya); (c) kondisi penyimpanan dan transportasi optimal; (d) kemasan aktif/modifikasi atmosfer. Sertakan justifikasi mekanisme fisiologis untuk setiap intervensi.
- **Analisis Ekonomi (Minggu 4):** Hitung estimasi kerugian finansial akibat rejection rate 35% versus

5% (asumsi harga FOB mangga USD 2,5/kg).
Estimasikan biaya implementasi paket teknologi yang
diusulkan dan hitung Return on Investment (ROI).
Analisis kelayakan ekonomi dan rekomendasikan
prioritas intervensi berdasarkan biaya-manfaat.

- Presentasi Dan Laporan: Siapkan laporan teknis 10-15 halaman dan presentasi 20 menit yang ditujukan kepada direksi PT Agro Tropika Mandiri. Gunakan bukti ilmiah dari literatur terkini untuk mendukung setiap rekomendasi. Sertakan rencana implementasi bertahap dan indikator keberhasilan yang terukur.

DAFTAR PUSTAKA

- Bautista-Baños, S., Sivakumar, D., Bello-Pérez, A., Villanueva-Arce, R., & Hernández-López, M. (2013). A review of the management alternatives for controlling fungi on papaya fruit during the postharvest supply chain. *Crop Protection*, 49, 8–20.
- Guo, Y. (2013). Towards systems biological understanding of leaf senescence. *Plant Molecular Biology*, 82(6), 519–528.
- Hörtensteiner, S., & Kräutler, B. (2011). Chlorophyll breakdown in higher plants. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics*, 1807(8), 977–988.
- Künstler, A., Bacsó, R., Hafez, Y. M., & Király, L. (2015). Reactive oxygen species and plant disease resistance. In *Reactive oxygen species and oxidative damage in plants under stress* (pp. 269–303). Springer.
- Lim, P. O., Kim, H. J., & Gil Nam, H. (2007). Leaf senescence. *Annu. Rev. Plant Biol.*, 58, 115–136.
- Lin, Q., Wang, C., Dong, W., Jiang, Q., Wang, D., Li, S., Chen, M., Liu, C., Sun, C., & Chen, K. (2015). Transcriptome and metabolome analyses of sugar and organic acid metabolism in Ponkan (*Citrus reticulata*) fruit during fruit maturation. *Gene*, 554(1), 64–74.
- Liu, M., Wang, C., Ji, H., Sun, M., Liu, T., Wang, J., Cao, H., & Zhu, Q. (2024). Ethylene biosynthesis and signal transduction during ripening and softening in non-climacteric fruits: an overview. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1368692.

- Magan, N., & Aldred, D. (2007). Post-harvest control strategies: minimizing mycotoxins in the food chain. *International Journal of Food Microbiology*, 119(1-2), 131-139.
- Ndlela, S., Ekesi, S., Ndegwa, P. N., Ong'amo, G. O., & Mohamed, S. A. (2017a). Post-harvest disinfestation of *Bactrocera dorsalis* (Hendel)(Diptera: Tephritidae) in mango using hot-water treatments. *Journal of Applied Entomology*, 141(10), 848-859.
- Ndlela, S., Ekesi, S., Ndegwa, P. N., Ong'amo, G. O., & Mohamed, S. A. (2017b). Post-harvest disinfestation of *Bactrocera dorsalis* (Hendel)(Diptera: Tephritidae) in mango using hot-water treatments. *Journal of Applied Entomology*, 141(10), 848-859.
- Paul, V., Pandey, R., & Srivastava, G. C. (2012). The fading distinctions between classical patterns of ripening in climacteric and non-climacteric fruit and the ubiquity of ethylene—An overview. *Journal of Food Science and Technology*, 49(1), 1-21.
- Watanabe, M., Balazadeh, S., Tohge, T., Erban, A., Giavalisco, P., Kopka, J., Mueller-Roeber, B., Fernie, A. R., & Hoefgen, R. (2013). Comprehensive dissection of spatiotemporal metabolic shifts in primary, secondary, and lipid metabolism during developmental senescence in *Arabidopsis*. *Plant Physiology*, 162(3), 1290-1310.
- Woo, H. R., Kim, H. J., Lim, P. O., & Nam, H. G. (2019). Leaf senescence: systems and dynamics aspects. *Annual Review of Plant Biology*, 70(1), 347-376.

BAB 6

KERUSAKAN PASCAPANEN

DESKRIPSI PEMBELAJARAN

Bab ini membahas secara komprehensif berbagai bentuk kerusakan yang dapat terjadi pada komoditas pertanian setelah pemanenan. Mahasiswa akan mempelajari mekanisme fisiologis yang mendasari kerusakan produk segar, jenis-jenis kerusakan mekanis akibat penanganan yang tidak tepat, dinamika kerusakan mikrobiologis oleh 127athogen, penyakit-penyakit pascapanen yang umum ditemukan pada komoditas tropis, serta faktor-faktor lingkungan yang mempercepat deteriorasi produk. Pemahaman mendalam terhadap keseluruhan aspek ini menjadi fondasi penting dalam merancang sistem penanganan dan pengolahan pascapanen yang efektif dan efisien.

KOMPETENSI PEMBELAJARAN

Setelah mengikuti bab 9 pengemasan produk pertanian ini Setelah menyelesaikan bab ini, mahasiswa diharapkan mampu:

1. Menjelaskan mekanisme kerusakan fisiologis pascapanen dan faktor-faktor yang mempengaruhinya secara ilmiah.
2. Mengidentifikasi dan mengklasifikasikan kerusakan mekanis berdasarkan jenis, penyebab, dan dampaknya terhadap kualitas produk.

- 3. Menganalisis proses kerusakan mikrobiologis termasuk pathogenesis mikroba pada komoditas pascapanen.
- 4. Mendeskripsikan penyakit-penyakit pascapanen utama pada komoditas buah, sayuran, dan rempah tropika.
- 5. Mengevaluasi pengaruh faktor lingkungan (suhu, kelembaban, komposisi atmosfer) terhadap laju kerusakan pascapanen.
- 6. Merancang strategi pengendalian kerusakan pascapanen berdasarkan pemahaman konsep teoritis yang mendalam.

PETA KONSEP PEMBELAJARAN

KERUSAKAN PASCAPANEN
(Postharvest Deterioration)

6.1 Kerusakan Fisiologis	6.2 Kerusakan Mekanis	6.3 Kerusakan Mikrobiologis	6.4 Penyakit Pascapanen	6.5 Faktor Lingkungan
Respirasi, Etilen, Transpirasi, Pematangan	Memar, Luka, Abrasi, Kompresi	Jamur, Bakteri, Khamir	Antraknosa, Busuk Lunak, Mold	Suhu, RH, O2, CO2, Cahaya

6.1 Kerusakan Fisiologis

6.1.1 Konsep Dasar Kerusakan Fisiologis

Kerusakan fisiologis pascapanen merupakan serangkaian proses deteriorasi yang terjadi akibat aktivitas metabolisme internal jaringan tanaman yang berlanjut setelah

pemanenan. Berbeda dengan kerusakan eksternal lainnya, kerusakan fisiologis bersifat inherent dan tak terhindarkan, namun lajunya dapat dimodulasi melalui rekayasa lingkungan simpan (Kader, 2013a; Yahia et al., 2019)

Setelah panen, komoditas segar kehilangan dukungan fisiologis dari tanaman induknya sehingga tidak lagi menerima pasokan air, mineral, dan asimilat. Kondisi ini memaksa jaringan mengandalkan cadangan energi intrinsik melalui proses respirasi aerobik maupun anaerobik. Proses respirasi yang terus berlangsung mengonsumsi substrat organik berupa karbohidrat, lemak, dan protein sehingga terjadi penurunan nilai gizi dan perubahan sensoris secara progresif (Crisosto et al., 2006; Gross et al., 2016)

6.1.2 Respirasi dan Laju Metabolisme

Respirasi merupakan proses sentral dalam kerusakan fisiologis pascapanen. Secara biokimia, respirasi aerobik melibatkan oksidasi sempurna glukosa: $C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O + 686 \text{ kkal/mol}$. Energi yang dilepaskan dalam bentuk panas akan meningkatkan suhu komoditas yang berimplikasi pada percepatan deteriorasi. Laju respirasi diukur sebagai volume CO_2 yang dihasilkan per satuan massa dan waktu ($mL \text{ } CO_2/kg/jam$) dan berbeda antar jenis komoditas (Prusky et al., 2013)

Berdasarkan pola respirasi selama pematangan, komoditas dibedakan menjadi klimakterik dan nonklimakterik. Buah klimakterik seperti pisang, mangga, pepaya, dan tomat menunjukkan lonjakan respirasi yang khas (respiratory climacteric) bersamaan dengan puncak produksi etilen endogen, yang menandai dimulainya proses pematangan (ripening) yang ireversibel. Sebaliknya, komoditas nonklimakterik seperti anggur, jeruk, dan nanas tidak menunjukkan pola lonjakan respirasi tersebut dan umumnya tidak mengalami pematangan pasca panen (Hontzeas et al., 2006; Paul et al., 2012b)

Tabel 6. 1. Laju respirasi, tipe klimakterik, dan perkiraan daya simpan beberapa komoditas pascapanen (Sumber: Kader, 2013; Yahia et al., 2017)

Komoditas	Laju Respirasi (mL CO ₂ /kg/jam)	Tipe	Daya Simpan (hari)
Pisang	15-30	Klimakterik	7-14
Mangga	10-20	Klimakterik	14-21
Pepaya	20-40	Klimakterik	7-14
Tomat	18-30	Klimakterik	14-21
Jeruk	3-5	Nonklimakterik	30-60
Anggur	3-5	Nonklimakterik	14-21
Brokoli	100-180	Nonklimakterik	7-14
Bayam	120-200	Nonklimakterik	3-7

Komoditas	Laju Respirasi (mL CO ₂ /kg/jam)	Tipe	Daya Simpan (hari)
Jahe segar	8-12	Nonklimakterik	30-60
Wortel	15-25	Nonklimakterik	60-90

6.1.3 Peran Etilen dalam Kerusakan Fisiologis

Etilen (C₂H₄) adalah hormon gas tanaman yang memegang peran kunci dalam regulasi pematangan buah klimakterik dan berbagai proses senesen. Biosintesis etilen berlangsung melalui jalur ACC (1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid): metionin → SAM → ACC → etilen. Enzim kunci yang terlibat adalah ACC sintase (ACS) dan ACC oksidase (ACO) yang aktivitasnya dipengaruhi oleh faktor internal dan stimulus eksternal (Blankenship & Dole, 2003; Lin et al., 2015b).

Konsentrasi etilen serendah 0,1 ppm sudah dapat mempercepat pematangan pada beberapa buah. Oleh karena itu, pengelolaan etilen—baik melalui penghambatan sintesis maupun pemblokiran persepsi—menjadi strategi krusial dalam teknologi pascapanen. Penggunaan 1-methylcyclopropene (1-MCP) sebagai inhibitor reseptor etilen terbukti secara signifikan memperpanjang umur simpan berbagai komoditas klimakterik (Blankenship & Dole, 2003; Hontzeas et al., 2006).

6.1.4 Transpirasi dan Kehilangan Air

Kehilangan air melalui transpirasi merupakan penyebab utama kerusakan fisiologis berupa layu (wilting) dan kisut (shriveling) pada komoditas segar. Transpirasi pascapanen dikendalikan oleh gradien tekanan uap air antara jaringan komoditas dan udara sekitar, serta hambatan permukaan (surface resistance) yang ditentukan oleh karakter anatomi kulit. Kehilangan air sebesar 5-10% dari bobot segar sudah cukup menyebabkan kemerosotan kualitas yang signifikan secara visual dan sensoris (Crisosto et al., 2006; Gross et al., 2016).

6.2 Kerusakan Mekanis

6.2.1 Definisi dan Klasifikasi Kerusakan Mekanis

Kerusakan mekanis adalah kerusakan struktural dan fisik yang terjadi pada komoditas akibat aplikasi gaya atau tekanan eksternal selama operasi pemanenan, pengumpulan, pengangkutan, sortasi, grading, pengemasan, dan distribusi. Kerusakan ini merupakan penyebab kehilangan pascapanen yang paling sering diabaikan namun memiliki dampak ekonomi yang sangat signifikan, terutama di negara berkembang dengan infrastruktur rantai pasok yang masih terbatas (Kitinoja & Alhassan, 2012b).

Secara mekanis, kerusakan dapat diklasifikasikan berdasarkan jenis gaya yang bekerja: (1) Impact damage akibat benturan impulsif; (2) Compression damage akibat tekanan statis berkelanjutan; (3) Vibration damage akibat getaran selama transportasi; (4) Abrasion damage akibat gesekan antar permukaan; dan (5) Puncture/cutting damage akibat penetrasi benda tajam. Setiap tipe kerusakan menghasilkan pola luka yang berbeda dan memerlukan pendekatan pencegahan yang spesifik (Kitinoja & Alhassan, 2012b; Opara & Pathare, 2014).

6.2.2 Dampak dan Pengendalian Kerusakan Mekanis

Kerusakan mekanis memiliki dampak majemuk yang melampaui sekadar perubahan penampilan visual. Secara fisiologis, luka mekanis menstimulasi peningkatan laju respirasi wound-induced, produksi etilen luka (wound ethylene), dan aktivasi jalur metabolisme sekunder. Luka terbuka yang ditimbulkan juga menjadi portal masuk yang sangat efisien bagi patogen oportunistik, yang mengubah kerusakan mekanis lokal menjadi kerusakan mikrobiologis sistemik (Kitinoja & Alhassan, 2012b).

Strategi pengendalian kerusakan mekanis mencakup pendekatan rekayasa dan manajerial: optimasi desain wadah dan kemasan dengan bahan penyangga (*cushioning material*), mekanisasi pemanenan dan sortasi dengan sensor tekanan terintegrasi, pelatihan SDM dalam penanganan panen yang baik (Good Agricultural Practices/GAP), dan standarisasi prosedur operasi selama pengepakan. Di tingkat rantai pasok, penerapan teknologi pelacak benturan (*impact recorder*) memungkinkan identifikasi titik-titik kritis kerusakan mekanis secara sistemik (Kitinoja & Alhassan, 2012b; Opara & Pathare, 2014).

6.3 Kerusakan Mikrobiologis

6.3.1 Konsep Dasar Interaksi Inang-Patogen

Kerusakan mikrobiologis pascapanen terjadi akibat kolonisasi dan degradasi jaringan komoditas oleh mikroorganisme patogenik, terutama jamur (fungi), bakteri, dan dalam beberapa kasus khamir (*yeast*). Interaksi inang-patogen pada sistem pascapanen ditentukan oleh tiga faktor utama yang saling berinteraksi dalam segitiga penyakit: (1) kerentanan inang (host susceptibility); (2) virulensi dan ketersediaan inokulum patogen; serta (3) kondisi lingkungan yang kondusif bagi perkembangan penyakit (Alvarez-Ruiz et al., 2007; Prusky et al., 2013)

Produk segar pascapanen memiliki karakteristik unik yang membedakannya dari inang hidup di lapangan: (a) mekanisme pertahanan aktif melemah karena tidak ada sinyal sistemik dari akar; (b) kandungan air dan nutrisi tinggi mendukung pertumbuhan mikroba; (c) luka-luka mekanis membuka jalur infeksi baru; dan (d) kondisi simpan sering tidak optimal. Hal ini menjelaskan mengapa produk yang sehat di lapangan dapat cepat terserang penyakit pascapanen (Prusky et al., 2013)

6.3.2 Patogen Jamur Pacapanen

Jamur merupakan agens penyebab kerusakan mikrobiologis yang paling dominan pada komoditas buah-buahan dan sayuran tropis. Beberapa genus jamur yang paling signifikan secara ekonomis antara lain *Botrytis*, *Penicillium*, *Aspergillus*, *Rhizopus*, *Fusarium*, dan *Colletotrichum*. Mekanisme infeksi jamur melibatkan sekresi enzim hidrolitik ekstraselular (selulase, pektinase, protease, lipase) yang mendegradasi dinding sel dan matriks ekstraselular jaringan inang, menciptakan lingkungan nutrisi yang kaya untuk pertumbuhan jamur lebih lanjut (Alvarez-Ruiz et al., 2007)

Jamur patogen pascapanen dapat dikategorikan berdasarkan strategi infeksi: (1) patogen pra-panen (quiescent infection) yang menginfeksi saat produk masih di lapangan namun laten secara gejala hingga pascapanen—contohnya *Colletotrichum gloeosporioides* penyebab antraknosa; dan (2) patogen pasca-panen yang murni menginfeksi setelah panen melalui luka mekanis—contohnya *Botrytis cinerea* dan *Rhizopus stolonifer*. Pemahaman strategi infeksi ini krusial dalam pemilihan waktu dan metode aplikasi fungisida (Alvarez-Ruiz et al., 2007; Prusky et al., 2013).

6.4 Penyakit Pascapanen

6.4.1 Penyakit Pascapanen pada Buah Tropika

Buah tropika menghadapi tekanan penyakit pascapanen yang tinggi akibat suhu dan kelembaban lingkungan yang kondusif untuk pertumbuhan patogen. Antraknosa yang disebabkan oleh *Colletotrichum gloeosporioides* adalah penyakit terpenting pada mangga, pepaya, dan pisang di kawasan tropis. Infeksi terjadi di lapangan namun gejala (nekrosis hitam melekok) baru muncul saat buah mendekati matang konsumsi karena adanya senyawa antijamur (antifungal compounds) pada buah muda yang terurai saat pematangan (Bautista-Baños et al., 2013; Sivakumar & Korsten, 2006)

Selain antraknosa, busuk mahkota (*crown rot*) pada pisang yang disebabkan oleh kompleks jamur (*Lasiodiplodia theobromae*, *Fusarium pallidroseum*, *Colletotrichum musae*) menyebabkan kerugian ekspor yang sangat besar. Pada pepaya, busuk *Phytophthora* (*Phytophthora palmivora*) dan busuk *Rhizopus* merupakan masalah utama yang sering terjadi bersamaan. Pengendalian terpadu mencakup perlakuan air panas (*hot water treatment*), fungisida pascapanen (*thiabendazole*, *imazalil*), dan pelapisan lilin (*wax coating*) (Bautista-Baños et al., 2013; Sivakumar & Korsten, 2006)

6.4.2 Penyakit Pascapanen pada Sayuran Tropika

Sayuran daun dan polong tropika sangat rentan terhadap busuk lunak bakteri yang disebabkan oleh *Pectobacterium carotovorum* dan *Pseudomonas* spp. Kondisi suhu tinggi, kelembaban berlebih, dan luka mekanis akibat penanganan yang buruk menciptakan kondisi epidemik yang cepat. Pada kubis dan selada, busuk lunak dapat menyebar dengan sangat cepat dalam kondisi penyimpanan tertutup melalui

eksudat dari jaringan yang terinfeksi (Alvarez-Ruiz et al., 2007)

Penyakit bercak alternaria (*Alternaria alternata*) umum pada tomat, cabai, dan terung tropis, menghasilkan lesi nekrotik berwarna coklat kehitaman yang menurunkan nilai jual secara drastis. Busuk Botrytis (*grey mould*) yang disebabkan Botrytis cinerea lebih umum pada sayuran di dataran tinggi beriklim sejuk, namun dapat menjadi masalah serius saat produk disimpan di ruang bersuhu rendah dengan kondensasi (Alvarez-Ruiz et al., 2007; Prusky et al., 2013)

6.4.3 Penyakit Pascapanen pada Rempah, Tanaman Obat, dan Serealia Tropika

Komoditas rempah dan tanaman obat tropika seperti jahe, kunyit, lada, dan temulawak menghadapi masalah kerusakan pascapanen yang khas. Busuk rimpang jahe akibat *Fusarium oxysporum* dan *Pythium* spp. dapat menyebabkan kehilangan yang masif terutama pada kondisi penyimpanan yang lembab. Jamur *Aspergillus flavus* dan *A. parasiticus* pada rempah kering merupakan ancaman serius karena menghasilkan aflatoksin—mikotoksin karsinogenik yang membahayakan keamanan pangan (Bautista-Baños et al., 2013; Magan & Aldred, 2007)

Pada serealia tropika seperti jagung, beras, dan sorgum, kontaminasi mikotoksin pascapanen merupakan isu keamanan pangan global yang serius. *Fusarium verticillioides* pada jagung menghasilkan fumonisin, sedangkan *Aspergillus* spp. pada beras yang disimpan dalam kondisi lembab menghasilkan aflatoksin dan okratoksin A. Pengendalian kadar air biji-bijian di bawah 14% dan pengelolaan suhu serta ventilasi gudang merupakan intervensi kritis dalam pencegahan kontaminasi mikotoksin (Janisiewicz & Korsten, 2002; Magan & Aldred, 2007)

Tabel 6. 2. Penyakit pascapanen utama pada komoditas tropika dan kondisi risiko tingginya (Sumber: Bautista-Baños et al., 2013; Magan & Aldred, 2007; Prusky et al., 2013)

Komoditas	Patogen Utama	Penyakit	Kondisi Risiko Tinggi
Mangga	Colletotrichum gloeosporioides	Antraknosa	Suhu >25°C, RH >85%
Pisang	Lasiodiplodia theobromae	Busuk mahkota	Luka mekanis, RH tinggi
Pepaya	Phytophthora palmivora	Busuk Phytophthora	Hujan lebat pra-panen
Tomat	Alternaria alternata	Busuk alternaria	Luka mekanis, kondensasi
Kubis	Pectobacterium carotovorum	Busuk lunak	Suhu tinggi, luka
Jahe segar	Fusarium oxysporum	Busuk rimpang	Kelembaban >90%

Komoditas	Patogen Utama	Penyakit	Kondisi Risiko Tinggi
Jagung simpan	Aspergillus flavus	Aflatoksikosis	KA >14%, suhu >30°C
Beras simpan	Aspergillus spp.	Busuk biji	KA >13%, RH >70%

6.5 Faktor Lingkungan Penyebab Kerusakan

6.5.1 Suhu sebagai Faktor Pengendali Utama

Suhu adalah faktor lingkungan paling dominan yang mempengaruhi laju semua proses biokimia dan fisiologis pada komoditas segar pascapanen. Hubungan antara suhu dan laju reaksi biologis secara kuantitatif dinyatakan melalui nilai Q10 (temperature quotient), yaitu rasio laju reaksi pada suhu $T+10^{\circ}\text{C}$ terhadap suhu T . Untuk proses biologis umumnya $Q_{10} = 2-3$, artinya setiap kenaikan 10°C suhu akan melipatduakan hingga melipattigakan laju deteriorasi (Gross et al., 2016; Kader, 2013a)

Pendinginan (refrigeration) adalah teknologi pascapanen paling efektif dan paling banyak digunakan untuk memperpanjang umur simpan. Namun, tidak semua komoditas toleran terhadap suhu rendah. Komoditas tropika seperti pisang, mangga, nanas, dan pepaya sangat rentan terhadap chilling injury (CI) sindrom kerusakan fisiologis yang dipicu oleh paparan suhu di bawah ambang batas toleransi (umumnya $10-13^{\circ}\text{C}$) namun di atas titik beku. Gejala CI mencakup pitting, perubahan warna internal, gagal masak, dan peningkatan kepekaan terhadap infeksi patogen (Gross et al., 2016; Morris, 1982)

6.5.2 Kelembaban Relatif dan Manajemen Air

Kelembaban relatif (relative humidity/RH) ruang simpan harus dikelola dengan hati-hati karena nilai yang terlalu rendah maupun terlalu tinggi sama-sama menimbulkan masalah. RH rendah (<85%) mempercepat transpirasi dan kehilangan turgor, menyebabkan layu dan kisut. Sebaliknya, RH terlalu tinggi (>95%) menciptakan kondisi kondensasi pada permukaan komoditas yang merupakan media ideal bagi pertumbuhan spora jamur dan bakteri (Crisosto et al., 2006)

Kondensasi yang terjadi saat produk dingin terkena udara hangat dan lembab fenomena yang dikenal sebagai sweating dapat mempercepat pembusukan secara dramatis. Oleh karena itu, dalam manajemen rantai dingin (cold chain management), penting untuk mempertahankan kontinuitas suhu dan kelembaban untuk mencegah terjadinya siklus kondensasi-pengeringan berulang yang merusak integritas permukaan komoditas

6.5.3 Komposisi Atmosfer : O₂, CO₂, dan Etilen

Komposisi atmosfer di sekitar komoditas memberikan pengaruh nyata terhadap fisiologi dan kualitas pascapanen. Teknologi Modified Atmosphere Packaging (MAP) dan Controlled Atmosphere (CA) memanfaatkan prinsip pengaturan konsentrasi O₂ dan CO₂ untuk mengendalikan laju respirasi dan pematangan. Pengurangan O₂ di bawah 8% dan peningkatan CO₂ di atas 1% secara sinergis menekan laju respirasi, produksi etilen, dan pertumbuhan patogen aerobik (Hontzeas et al., 2006; Paul et al., 2012b)

Akan tetapi, penurunan O₂ yang terlalu ekstrem (<1-2% untuk sebagian besar komoditas) menyebabkan respirasi anaerob yang menghasilkan etanol dan asetaldehida—senyawa yang menyebabkan aroma fermentasi off-flavour yang tidak diinginkan dan kerusakan fisiologis anaerobik. Setiap komoditas memiliki ambang batas toleransi terhadap

konsentrasi O₂ dan CO₂ yang berbeda, sehingga resep CA harus dikalibrasi secara spesifik untuk setiap jenis dan varietas komoditas (Kader, 2013a; Paul et al., 2012b)

Akumulasi etilen dalam ruang simpan tertutup merupakan faktor lingkungan yang sering diremehkan. Bahkan konsentrasi etilen serendah 0,1-1 ppm dapat mempercepat pematangan, penuaan (*senescence*), dan respon stres pada komoditas sensitif. Penggunaan absorben etilen (kalium permanganat, zeolit aktif) atau ventilasi aktif dalam ruang simpan sangat dianjurkan, terutama untuk komoditas sensitif etilen (Lin et al., 2015b)

RANGKUMAN

Kerusakan pascapanen merupakan fenomena multidimensional yang mencakup lima kategori utama yang saling berinteraksi:

Kerusakan fisiologis didorong oleh respirasi yang terus berlangsung, produksi etilen endogen, dan transpirasi yang menyebabkan kehilangan air serta substrat organik secara progresif. Kerusakan mekanis akibat benturan, kompresi, dan gesekan selama panen dan distribusi menyebabkan browning enzimatis, luka terbuka, dan pintu masuk patogen. Kerusakan mikrobiologis oleh jamur, bakteri, dan khamir terjadi melalui sekresi enzim hidrolitik yang mendegradasi dinding sel dan jaringan komoditas. Penyakit pascapanen seperti antraknosa, busuk lunak, dan kontaminasi mikotoksin menyebabkan kehilangan ekonomis dan ancaman keamanan pangan yang serius. Faktor lingkungan terutama suhu, kelembaban relatif, dan komposisi atmosfer mengatur laju semua bentuk kerusakan sehingga pengendaliannya menjadi inti strategi teknologi pascapanen.

TES FORMATIF ESSAI

Jawablah pertanyaan berikut secara terstruktur dan argumentatif (minimal 150 kata per soal):

- 1 Jelaskan perbedaan mendasar antara pola respirasi komoditas klimakterik dan nonklimakterik. Bagaimana perbedaan ini memengaruhi strategi penanganan pascapanen yang harus diterapkan?
- 2 Mengapa kerusakan mekanis sering disebut sebagai 'gerbang' bagi kerusakan mikrobiologis pascapanen? Jelaskan mekanisme biokimia dan fisiologis yang menghubungkan kedua tipe kerusakan ini!
- 3 Uraikan konsep 'quiescent infection' pada antraknosa mangga. Mengapa gejala baru muncul saat buah mendekati matang konsumsi, dan apa implikasinya bagi strategi pengendalian di lapangan maupun pascapanen?
- 4 Diskusikan dilema manajemen kelembaban relatif dalam penyimpanan dingin: mengapa nilai yang terlalu rendah maupun terlalu tinggi sama-sama berbahaya? Berikan rekomendasi untuk tiga komoditas tropika berbeda!
- 5 Evaluasi potensi dan keterbatasan teknologi Controlled Atmosphere (CA) dalam memperpanjang umur simpan komoditas tropis yang rentan chilling injury. Bagaimana teknologi ini dapat dikombinasikan dengan intervensi lain?

Latihan Problem Based Learning (PBL)

SKENARIO KASUS:

Sebuah koperasi petani di Kalimantan Timur memanen 50 ton mangga Harum Manis per musim dan mengirimkannya ke Jakarta via truk darat selama 48 jam. Laporan dari pembeli di Jakarta menyebutkan bahwa lebih dari 40%

mangga yang tiba mengalami kerusakan gabungan: memar kehitaman, antraknosa meluas, dan beberapa buah sudah lunak berlebih. Koperasi mengalami kerugian finansial signifikan dan reputasi yang menurun.

Tugas Kelompok (4-5 mahasiswa):

- Analisis Masalah: Identifikasi minimal tiga tipe kerusakan yang terjadi, uraikan mekanisme masing-masing kerusakan, dan gambarkan interaksi/sinergi antar tipe kerusakan yang mungkin terjadi selama 48 jam perjalanan.
- Investigasi Lapangan (Simulasi): Rancang protokol inspeksi lapangan untuk menelusuri titik-titik kritis kerusakan mulai dari kebun panen hingga tiba di tujuan. Variabel apa yang akan Anda ukur dan mengapa?
- REKOMENDASI TEKNIS: Usulkan paket teknologi pascapanen yang komprehensif dan feasible secara ekonomi untuk koperasi ini, mencakup: teknik panen, penanganan lapangan, pengemasan, perlakuan kimia/non-kimia, dan manajemen transportasi.
- Analisis Biaya-Manfaat: Estimasikan investasi yang diperlukan dan proyeksikan pengurangan kehilangan pascapanen yang dapat dicapai dengan intervensi yang diusulkan
- Presentasi: Siapkan presentasi 15 menit dengan poster atau slide yang menjelaskan analisis, diagnosis, dan rekomendasi secara ilmiah kepada pemangku kepentingan koperasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Alvarez-Ruiz, P., Jimenez, C. G., Leyva-López, N. E., & Méndez-Lozano, J. (2007). First report of Tomato chlorosis virus infecting tomato crops in Sinaloa, Mexico. In *Plant Pathology* (Vol. 56, Number 6, p. 1043). <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2007.01626.x>
- Bautista-Baños, S., Sivakumar, D., Bello-Pérez, A., Villanueva-Arce, R., & Hernández-López, M. (2013). A review of the management alternatives for controlling fungi on papaya fruit during the postharvest supply chain. *Crop Protection*, 49, 8–20.
- Blankenship, S., & Dole, J. (2003). 1-Methylcyclopropene: A review. *Postharvest Biology and Technology*, 28, 1–25. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(02\)00246-6](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(02)00246-6)
- Crisosto, C. H., Crisosto, G., & Neri, F. (2006). Understanding Tree Fruit Quality Based on Consumer Acceptance. *Postharvest Biology and Technology*, 183–190.
- Gross, K. C., Wang, Y., & Saltveit, M. (2016). The Commercial Storage of Fruits, Vegetables, and Florist and Nursery Stocks. *Agricultural Research Service Agriculture Handbook Number*, 66. www.ars-grin.gov.
- Hontzeas, N., Hontzeas, C. E., & Glick, B. R. (2006). Reaction mechanisms of the bacterial enzyme 1-aminocyclopropane-1-carboxylate deaminase. In *Biotechnology Advances* (Vol. 24, Number 4, pp. 420–426). <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2006.01.006>
- Janisiewicz, W. J., & Korsten, L. (2002). Biological control of postharvest diseases of fruits. In *Annual Review of Phytopathology* (Vol. 40, pp. 411–441). <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.40.120401.130158>

- Kader, A. A. (2013). Postharvest Technology of Horticultural Crops-An Overview from Farm to Fork. In *J. Appl. Sci. Technol. (Special Issue (Number 1))*.
- Kitinoja, L., & Alhassan, H. Y. (2012). Identification of Appropriate Postharvest Technologies for Small Scale Horticultural Farmers and Marketers in Sub-Saharan Africa and South Asia-Part 1. Postharvest Losses and Quality Assessments. *Postharvest Technology*, 31-40.
- Lin, Q., Wang, C., Dong, W., Jiang, Q., Wang, D., Li, S., Chen, M., Liu, C., Sun, C., & Chen, K. (2015). Transcriptome and metabolome analyses of sugar and organic acid metabolism in Ponkan (*Citrus reticulata*) fruit during fruit maturation. *Gene*, 554(1), 64-74. <https://doi.org/10.1016/j.gene.2014.10.025>
- Magan, N., & Aldred, D. (2007). Post-harvest control strategies: Minimizing mycotoxins in the food chain. *International Journal of Food Microbiology*, 119(1-2), 131-139. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2007.07.034>
- Morris, L. L. (1982). Chilling Injury Of Horticultural Crops: AN OVERVIEW. *Hort Science*, 17(2), 161-162.
- Opara, U. L., & Pathare, P. B. (2014). Bruise damage measurement and analysis of fresh horticultural produce-A review. *Postharvest Biology and Technology*, 91, 9-24. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.12.009>
- Paul, V., Pandey, R., & Srivastava, G. C. (2012). The fading distinctions between classical patterns of ripening in climacteric and non-climacteric fruit and the ubiquity of ethylene-An overview. In *Journal of Food Science and Technology* (Vol. 49, Number 1, pp. 1-21). <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0293-4>

- Prusky, D., Alkan, N., Mengiste, T., & Fluhr, R. (2013). Quiescent and necrotrophic lifestyle choice during postharvest disease development. *Annual Review of Phytopathology*, 51, 155–176. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-082712-102349>
- Sivakumar, D., & Korsten, L. (2006). Influence of modified atmosphere packaging and postharvest treatments on quality retention of litchi cv. Mauritius. *Postharvest Biology and Technology*, 41(2), 135–142. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2006.03.007>
- Yahia, E. M., García-Solís, P., & Celis, M. E. M. (2019). Contribution of fruits and vegetables to human nutrition and health. In *Postharvest physiology and biochemistry of fruits and vegetables* (pp. 19–45). Elsevier.
- Yahia, E. M., Maldonado Celis, M. E., & Svendsen, M. (2017). The contribution of fruit and vegetable consumption to human health. *Fruit and Vegetable Phytochemicals: Chemistry and Human Health, 2nd Edition*, 1–52.

BAB 7

SISTEM PENANGANAN PASCAPANEN

DESKRIPSI PEMBELAJARAN

Bab ini membahas sistem penanganan pascapanen secara komprehensif mulai dari teknik pemanenan yang tepat hingga berbagai prosedur penanganan awal yang mencakup sortasi, grading, pencucian, curing, dan sanitasi. Pemahaman mendalam terhadap setiap tahap ini sangat penting bagi mahasiswa karena kehilangan hasil (*postharvest losses*) secara global mencapai 30–50% dari total produksi, terutama pada produk hortikultura (Food and Agriculture Organization (FAO), 2019). Pendekatan yang digunakan bersifat teori-konseptual dengan penekanan pada prinsip fisiologis dan biokimia yang mendasari setiap praktik penanganan pascapanen.

KOMPETENSI PEMBELAJARAN

Setelah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan mampu:

1. Menjelaskan prinsip fisiologis yang mendasari waktu dan teknik pemanenan yang optimal.
2. Menganalisis prosedur penanganan awal pascapanen berdasarkan karakteristik komoditas.
3. Membedakan konsep sortasi dan grading beserta sistem standar yang berlaku secara nasional dan internasional.

4. Mengevaluasi teknik pencucian yang efektif berdasarkan jenis kontaminan dan komoditas.
5. Menjelaskan proses curing pada komoditas umbi dan akar serta justifikasi ilmiahnya.
6. Merancang prosedur sanitasi yang tepat dalam rantai penanganan pascapanen.
7. Mengintegrasikan seluruh tahap penanganan pascapanen dalam satu sistem yang kohesif dan efisien.

PETA KONSEP PEMBELAJARAN



7.1 Pendahuluan

Sistem penanganan pascapanen merupakan rangkaian kegiatan yang dilakukan sejak produk pertanian dipanen hingga sampai ke tangan konsumen. Tahapan ini bukan sekadar prosedur teknis semata, melainkan mencerminkan penerapan prinsip-prinsip fisiologi, biokimia, dan teknologi pangan secara terpadu. Menurut (Kitinoja et al., 2011), sistem penanganan pascapanen yang buruk merupakan penyebab utama kehilangan pangan (food loss) yang membebani rantai pasokan pangan global, terutama di negara-negara berkembang.

Produk segar seperti buah, sayuran, dan umbi-umbian adalah organisme hidup yang terus mengalami proses metabolisme setelah panen. Respirasi selular, transpirasi, dan etilen gas tanaman yang memicu pematangan terus berlangsung dan berkontribusi terhadap penurunan mutu (Kader, 2013b). Oleh karena itu, setiap intervensi dalam rantai pascapanen harus mempertimbangkan respons fisiologis komoditas terhadap perlakuan yang diberikan.

Tantangan pascapanen di Indonesia semakin kompleks mengingat kondisi iklim tropis yang ditandai oleh suhu dan kelembaban tinggi, yang mempercepat laju respirasi dan pertumbuhan mikroorganisme patogen. (Penelitian et al., 2020) melaporkan bahwa kehilangan pascapanen hortikultura di Indonesia berkisar antara 25–40%, jauh di atas angka ideal 5–10% yang ditetapkan oleh FAO. Angka ini menunjukkan urgensi penerapan sistem penanganan pascapanen yang ilmiah dan terstandarisasi.

Bab ini menyusun sistem penanganan pascapanen secara hierarkis dari lapangan hingga fasilitas penanganan dengan menekankan dasar teori di balik setiap praktik. Pemahaman yang kuat atas konsep ini akan membekali

mahasiswa untuk merancang sistem pascapanen yang efisien, aman, dan berkelanjutan

7.2 Teknik Pemanenan

7.2.1 Konsep Kematangan dan Indikator Panen

Pemanenan adalah tindakan pertama dalam rantai pascapanen, dan ketepatannya sangat menentukan kualitas akhir produk. Kematangan dalam konteks fisiologi tanaman dapat dibedakan menjadi dua kategori utama: kematangan fisiologis (*physiological maturity*) dan kematangan hortikultura (*horticultural maturity*). Kematangan fisiologis merujuk pada kondisi di mana biji atau organ penyimpan telah mencapai perkembangan penuh dan viabilitasnya maksimal. Sementara itu, kematangan hortikultura adalah kondisi di mana bagian tanaman yang dikonsumsi telah mencapai kualitas yang diinginkan konsumen, yang tidak selalu bersamaan dengan kematangan fisiologis.

Kematangan fisiologis pada buah klimakterik seperti pisang, mangga, avokad, dan tomat ditandai oleh puncak respirasi (*respiratory climacteric*) yang disertai lonjakan produksi etilen endogen. Pada titik ini, buah masih dapat dipanen dalam kondisi mentah (*mature-green*) dan dikirim ke tempat tujuan sebelum pematangan dimulai. Sebaliknya, buah non-klimakterik seperti anggur, jeruk, dan stroberi harus dipanen dalam kondisi matang penuh karena tidak mengalami peningkatan produksi etilen setelah panen (Kidd et al., 1995)

Indikator kematangan (*maturity indices*) adalah parameter terukur yang digunakan sebagai acuan waktu panen. Penggunaan indikator yang tepat dan konsisten merupakan kunci keseragaman mutu produk. Beberapa

kategori indikator kematangan yang umum digunakan antara lain:

- Indikator fisik: ukuran, bentuk, bobot, kepadatan, dan warna kulit atau daging buah. Warna sering menjadi indikator paling mudah diamati, meskipun tidak selalu akurat karena dapat dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti intensitas cahaya matahari.
- Indikator kimia: kandungan padatan terlarut total (total soluble solids, TSS) yang diukur dengan refraktometer, keasaman tertitrasi (titratable acidity, TA), serta rasio TSS/TA yang mencerminkan keseimbangan gula-asam dan cita rasa buah.
- Indikator fisiologis: laju respirasi, produksi etilen, dan kandungan pati yang diukur menggunakan larutan iodin pada apel dan pir sebagai tes sederhana tingkat kemasakan.
- Indikator morfologis: pembentukan lapisan absisi, mudahnya buah lepas dari tangkai, dan kerontokan braktea pada beberapa komoditas.

Tabel 7. 1. Indikator kematangan beberapa komoditas hortikultura utama

Komoditas	Indikator Utama	Metode Pengukuran	Nilai Panen
Mangga	TSS dan warna	Refraktometer, color chart	TSS ≥ 12–14 °Brix
Pisang	Diameter jari tengah	Kaliper	35–38 mm
Tomat	Warna dan kekerasan	Colorimeter, penetrometer	Breaker stage (5% warna)

Komoditas	Indikator Utama	Metode Pengukuran	Nilai Panen
Kentang	Berat kering umbi	Gravimetri	≥ 20% berat kering
Cabai	Warna buah	Visual / color chart	Merah penuh atau sesuai tujuan

Kesalahan dalam penentuan waktu panen baik terlalu dini maupun terlalu lambat berdampak serius pada mutu dan umur simpan produk. Pemanenan terlalu dini menyebabkan produk tidak matang dengan sempurna, memiliki cita rasa yang kurang berkembang, dan rentan terhadap chilling injury jika disimpan pada suhu rendah. Sebaliknya, pemanenan terlalu lambat menghasilkan produk yang cepat rusak, rentan terhadap kerusakan mekanis, dan memiliki umur simpan yang sangat pendek (Kader, 2013b)

7.2.2 Metode Pemanenan

Pemilihan metode pemanenan manual atau mekanis dipengaruhi oleh karakteristik komoditas, skala produksi, dan tujuan pasar. Dalam kerangka pascapanen, metode pemanenan yang dipilih harus meminimalkan kerusakan mekanis (mechanical damage) karena luka fisik merupakan titik masuk utama bagi patogen, serta memicu lonjakan respirasi dan produksi etilen lokal yang mempercepat kerusakan

a) Pemanenan Manual

Pemanenan manual melibatkan tenaga manusia dengan menggunakan tangan atau alat sederhana

seperti pisau panen, gunting, dan galah pengait. Metode ini sangat cocok untuk produk yang mudah rusak (*highly perishable*) dan membutuhkan selektifitas tinggi, seperti tomat ceri, stroberi, dan tanaman hias. Keunggulan pemanenan manual terletak pada kemampuannya melakukan seleksi *in situ* hanya memanen produk yang telah mencapai kematangan optimal sehingga meminimalkan produk *under-ripe* dan *over-ripe* dalam satu batch panen.

Namun, pemanenan manual juga rentan terhadap kerusakan akibat penanganan yang tidak hati-hati (*rough handling*). Penelitian oleh (Kitinoja & Kader, 2015) menunjukkan bahwa sebagian besar kerusakan mekanis pada buah dan sayuran terjadi selama proses pemanenan dan penanganan awal di lapangan, bukan pada tahap transportasi atau penyimpanan. Oleh karena itu, pelatihan pemanen mengenai teknik panen yang benar termasuk posisi tangan, arah tarikan, dan teknik peletakan di wadah sangat penting.

b) Pemanenan Semi-Mekanis dan Mekanis

Pemanenan semi-mekanis menggunakan alat bantu mekanis seperti conveyor belt di lapangan, tangga panen bermotor, atau shaker untuk tanaman pohon. Pemanenan mekanis penuh menggunakan mesin combine harvester yang mengintegrasikan pemotongan, pengumpulan, dan pembersihan awal dalam satu operasi. Metode ini terutama digunakan untuk komoditas yang dipanen sekaligus (*once-over harvest*) dan toleran terhadap kerusakan mekanis, seperti kedelai, jagung, dan beberapa jenis tanaman biji-bijian.

Untuk komoditas hortikultura bernilai tinggi, pemanenan mekanis masih terbatas karena keragaman ukuran dan tingkat kematangan antar buah dalam satu tanaman. Perkembangan teknologi terkini, termasuk penggunaan kecerdasan buatan (AI) dan robotika panen, mulai mampu mengatasi keterbatasan ini, meskipun masih dalam tahap pengembangan untuk penerapan skala komersial di negara berkembang (Bac et al., 2014)

7.2.3 Waktu dan Kondisi Pemanenan

Waktu pelaksanaan panen dalam sehari berpengaruh signifikan terhadap suhu produk saat panen dan ketersediaan air jaringan (*tissue water content*). Pemanenan pada pagi hari, saat suhu udara masih rendah, menghasilkan produk dengan suhu lapang lebih rendah sehingga mengurangi beban kerja sistem pendingin (*pre-cooling load*). Lebih lanjut, pemanenan di pagi hari mengurangi tekanan transpirasi karena kelembaban relatif lingkungan lebih tinggi, sehingga kehilangan air produk dapat diminimalkan.

Kondisi iklim makro juga perlu diperhatikan. Pemanenan setelah hujan lebat meningkatkan kandungan air permukaan produk, yang memfasilitasi perkembangan patogen jamur dan bakteri. Pada kondisi seperti ini, diperlukan penundaan panen atau penerapan prosedur pengeringan permukaan (*surface drying*) sebelum produk masuk ke fasilitas pascapanen (Eckert & Ogawa, 1989)

7.3 Penanganan Awal Pascapanen

Penanganan awal pascapanen (*immediate postharvest handling*) mencakup serangkaian kegiatan yang dilakukan segera setelah panen, sebelum produk masuk ke fasilitas pengolahan atau penyimpanan utama. Tahap ini sangat kritis karena kondisi produk pada jam-jam pertama setelah panen sangat menentukan kualitas dan umur simpan jangka panjang (Kitinoja & Kader, 2015)

7.3.1 Pra-pendinginan (*Pre-cooling*)

Pra-pendinginan adalah proses penghilangan panas lapang (*field heat*) dari produk setelah panen sesegera mungkin. Panas lapang adalah panas yang tersimpan dalam jaringan tanaman akibat paparan sinar matahari dan suhu udara selama pertumbuhan di lapangan. Prinsip utama pra-pendinginan adalah menurunkan suhu produk mendekati suhu penyimpanan optimal sesegera mungkin, karena laju deteriorasi produk berkorelasi langsung dengan suhu berdasarkan persamaan van 't Hoff setiap kenaikan 10°C akan melipatgandakan laju reaksi kimia dan enzimatis sebesar 2–3 kali

Terdapat beberapa metode pra-pendinginan yang umum digunakan dalam sistem penanganan pascapanen komersial:

- *Room cooling*: Produk ditempatkan dalam ruangan berpendingin. Metode paling sederhana namun paling lambat dalam penurunan suhu.
- *Forced-air cooling*: Udara dingin dihembuskan secara paksa melalui tumpukan atau palet produk menggunakan fan tekanan. Lebih cepat dari room cooling dan efektif untuk produk dalam kemasan.
- *Hydrocooling*: Produk dicelupkan atau disemprot dengan air dingin bersuhu 0–2°C. Sangat efektif untuk

produk yang toleran terhadap basah seperti brokoli, asparagus, dan wortel.

- Vacuum cooling: Produk ditempatkan dalam ruang bertekanan rendah sehingga air menguap, yang menyebabkan penurunan suhu cepat. Metode paling cepat, terutama efektif untuk sayuran berdaun seperti selada dan bayam.
- Ice cooling: Serpihan es ditempatkan langsung pada atau di sekitar produk. Umum digunakan untuk seafood dan beberapa sayuran tropis.

7.3.2 Trimming dan Pembersihan Awal

Trimming adalah pembuangan bagian tanaman yang tidak dikehendaki seperti akar yang berlebih, daun yang layu atau rusak, tangkai yang terlalu panjang yang dapat mempercepat kerusakan atau mengurangi nilai estetika produk. Pembersihan awal mencakup penghilangan tanah, sisa tanaman, dan benda asing lainnya secara mekanis sebelum pencucian formal.

Dari perspektif fisiologis, daun yang layu atau rusak merupakan sumber etilen yang dapat memicu pematangan prematur pada produk lain yang berada dalam ruang penyimpanan yang sama (*ethylene cross-contamination*). Penelitian oleh (Tripathi et al., 2015) menunjukkan bahwa daun yang mengalami stres menghasilkan etilen dalam jumlah signifikan yang dapat mempersingkat umur simpan komoditas klimakterik di sekitarnya hingga 30–50%.

7.3.3 Pengelolaan Rantai Pascapanen di Lapangan

Desain sistem pengumpulan di lapangan (*field collection system*) harus mempertimbangkan minimalisasi jumlah penanganan (*handling*) karena setiap pemindahan

produk berpotensi menyebabkan kerusakan. Konsep "single-trip container" direkomendasikan untuk produk mudah rusak, di mana produk dipanen langsung ke dalam wadah akhir yang digunakan untuk transportasi dan distribusi, sehingga tidak perlu dipindahkan ke wadah lain (Kitinoja & Kader, 2015)

Desain wadah panen juga krusial. Penggunaan wadah dengan tepi yang tajam atau terlalu dalam menyebabkan produk di bagian bawah mengalami tekanan berlebih (*compression damage*). Wadah plastik berlubang atau keranjang anyaman dengan lapisan pengisi lunak lebih direkomendasikan dibanding wadah logam atau kayu yang keras. Perlindungan dari paparan sinar matahari langsung setelah panen juga penting untuk mencegah sunscald dan memperlambat laju respirasi.

7.4 Sortasi

7.4.1 Definisi dan Tujuan Sortasi

Sortasi (*sorting*) adalah proses pemisahan produk berdasarkan satu atau lebih kriteria biner layak jual atau tidak layak jual dengan membuang atau mengelompokkan produk yang cacat, sakit, atau rusak. Berbeda dengan grading yang memisahkan produk ke dalam kelas-kelas mutu berdasarkan standar tertentu, sortasi lebih bersifat selektif dan eliminatif: tujuan utamanya adalah membuang produk yang tidak memenuhi standar minimum keamanan pangan atau tidak memiliki nilai komersial.

Secara fisiologis, pentingnya sortasi terletak pada konsep "satu produk busuk merusak satu peti" (*the one rotten apple spoils the barrel effect*). Jaringan yang rusak atau terinfeksi patogen menghasilkan etilen dalam jumlah besar,

mempercepat pematangan komoditas klimakterik di sekitarnya. Lebih serius lagi, produk yang terinfeksi jamur *Botrytis cinerea* atau bakteri patogen dapat menjadi sumber kontaminasi bagi produk sehat di sekitarnya, sehingga kerugian dapat berlipat ganda dalam waktu singkat (Eckert & Ogawa, 1989)

7.4.2 Kriteria dan Parameter Sortasi

Kriteria sortasi bervariasi tergantung pada komoditas dan tujuan pasar, namun secara umum mencakup kategori berikut:

- Kerusakan mekanis: memar (bruising), luka iris, retak, dan pecah akibat perlakuan kasar selama panen dan transportasi.
- Serangan patogen: busuk lunak bakteri, busuk cincin, bercak jamur, dan penyakit lain yang terlihat secara visual.
- Kerusakan fisiologis: chilling injury (CI), sunscald, bitter pit pada apel, blossom-end rot pada tomat, dan gangguan fisiologis lainnya.
- Serangan hama: bekas gigitan serangga, lubang lalat buah, dan kontaminasi kotoran serangga.
- Kelainan morfologis: bentuk sangat menyimpang, deformasi ekstrem, atau pertumbuhan abnormal yang tidak dapat diterima pasar.

Dari perspektif keamanan pangan, sortasi juga berfungsi sebagai titik kontrol kritis (*critical control point*) dalam kerangka sistem HACCP (*Hazard Analysis and Critical Control Points*). Produk yang menunjukkan tanda-tanda kontaminasi aflatoksin (dari jamur *Aspergillus flavus*) atau residu

pestisida berlebih harus diidentifikasi dan dipisahkan pada tahap ini.

7.4.3 Metode Sortasi

Sortasi manual oleh pekerja terlatih masih menjadi metode dominan di sebagian besar fasilitas pascapanen di negara berkembang. Kelebihan metode ini adalah fleksibilitas dan kemampuan mengidentifikasi kerusakan yang kompleks, namun kelemahannya meliputi variabilitas antar operator, kelelahan, dan keterbatasan kecepatan.

Sortasi mekanis menggunakan mesin yang memisahkan produk berdasarkan ukuran (*grader atau sizer*), berat (*weight grader*), atau warna (*color sorter berbasis sensor optik*). Teknologi terkini mengintegrasikan kamera hiperspektral dan algoritma kecerdasan buatan untuk mendeteksi kerusakan internal yang tidak terlihat dari luar, seperti brown core pada apel atau hollow heart pada kentang (Blasco et al., 2007)

7.5 Grading

7.5.1 Konsep dan Dasar Teori Grading

Grading adalah proses pengklasifikasian produk yang telah lulus sortasi ke dalam kelas-kelas mutu (*grade*) berdasarkan standar yang telah ditetapkan. Tujuan grading adalah standardisasi mutu yang memungkinkan transaksi perdagangan tanpa pemeriksaan fisik langsung oleh pembeli, penetapan harga berbasis kualitas (*price differentiation*), dan pemenuhan persyaratan pasar yang berbeda.

Secara ekonomi, grading merupakan fondasi dari sistem pemasaran komoditas pertanian yang efisien. Tanpa grading, setiap pembeli harus memeriksa setiap lot produk secara langsung, yang memakan waktu dan biaya. Dengan sistem grading yang terstandarisasi dan dipercaya, pembeli dan penjual dapat bertransaksi berdasarkan deskripsi kelas mutu semata, yang memfasilitasi perdagangan regional dan internasional (Kader, 2013b)

7.5.2 Sistem Standar Mutu

Indonesia memiliki Standar Nasional Indonesia (SNI) yang mengatur mutu komoditas pertanian. SNI untuk hortikultura umumnya mengklasifikasikan produk ke dalam kelas Ekstra, Kelas I, Kelas II, dan Kelas III berdasarkan parameter ukuran, warna, keseragaman, kebebasan dari cacat, dan kebersihan. Di tingkat internasional, Codex Alimentarius Commission yang dikembangkan oleh FAO/WHO menetapkan standar mutu yang diadopsi secara luas oleh negara-negara pengimpor.

Tabel 7. 2. Kriteria umum klasifikasi mutu produk hortikultura

Parameter	Kelas Ekstra	Kelas I	Kelas II
Cacat kulit (maks.)	Tidak ada	≤5% permukaan	≤10% permukaan
Keseragaman ukuran	Sangat seragam	Seragam	Cukup seragam
Kerusakan mekanis	Tidak ada	Sangat minor	Minor diperbolehkan
Kontaminasi	Tidak ada	Sangat sedikit	Sedikit

tanah				diperbolehkan
Tujuan umum	pasar	Ekspor premium	/ Supermarket	Pasar tradisional

7.5.3 Paramater Grading

Parameter grading yang digunakan dalam praktik komersial mencakup:

- Ukuran dan berat: Diukur menggunakan kaliber, timbangan, atau mesin weight grader. Ukuran sering lebih penting dari berat untuk produk seperti jeruk dan apel karena berhubungan langsung dengan persepsi konsumen.
- Warna: Merupakan indikator visual paling kuat bagi konsumen. Pengukuran warna secara objektif menggunakan colorimeter dengan sistem CIE L*a*b* atau CIE L*C*h memberikan hasil yang lebih konsisten dibanding penilaian visual subjektif.
- Kekerasan (firmness): Diukur dengan penetrometer atau texture analyzer. Merupakan indikator penting untuk kematangan dan ketahanan terhadap penanganan mekanis selama distribusi.
- Komposisi kimia: Kandungan TSS (°Brix), keasaman tertitrasi, dan rasio keduanya mengindikasikan cita rasa dan nilai gizi. Umumnya digunakan sebagai parameter tambahan pada produk premium.

Kebebasan dari hama dan penyakit: Persyaratan fitosanitari yang ketat terutama berlaku untuk produk ekspor, di mana sertifikat bebas OPT (organisme pengganggu tumbuhan) diperlukan

7.5.4 Perkembangan Teknologi Grading

Sistem grading modern mengintegrasikan sensor optik, spektroskopi near-infrared (NIR), dan kecerdasan buatan untuk menilai mutu secara non-destruktif dan kontinu. Teknologi NIR mampu mengukur kandungan gula, padatan terlarut, dan bahkan kerusakan internal tanpa merusak produk (Nicolai et al., 2007). Sistem machine vision berbasis kamera resolusi tinggi dapat menilai warna, ukuran, bentuk, dan cacat permukaan pada kecepatan tinggi mencapai ratusan hingga ribuan unit per menit jauh melampaui kapasitas sortasi manual.

7.6 Pencucian

7.6.1 Tujuan dan Pentingnya Pencucian

Pencucian (*washing*) bertujuan untuk menghilangkan kotoran, debu, residu pestisida, getah, serta mengurangi beban mikroorganisme patogen pada permukaan produk. Namun, pencucian juga merupakan operasi yang berisiko jika tidak dikelola dengan benar: air yang digunakan berpotensi menjadi vektor kontaminasi silang (*cross-contamination*) jika mengandung patogen dari produk yang sakit atau sumber air yang terkontaminasi (Sapers, 2001).

Secara fisiologis, pencucian terutama dengan air hangat dapat membantu menghilangkan residu pestisida permukaan lebih efektif. Pencucian dengan air bersuhu 40–45°C selama 2 menit lebih efektif menghilangkan residu pestisida organofosfor dibanding pencucian dengan air dingin, meskipun harus diimbangi dengan pertimbangan pengaruh panas terhadap kualitas produk.

7.6.2 Metode Pencucian

Berbagai metode pencucian tersedia, masing-masing dengan kelebihan dan keterbatasan:

- Pencucian celup (*immersion washing*): Produk dicelupkan ke dalam bak air. Sederhana dan berbiaya rendah, tetapi air cepat kotor dan risiko kontaminasi silang tinggi jika air tidak diganti secara berkala.
- Pencucian semprot (*spray washing*): Air bertekanan disemprotkan pada produk. Lebih higienis dari metode celup karena air segar selalu digunakan, tetapi konsumsi air lebih tinggi.
- Pencucian gelembung udara (*flotation washing*): Produk dicuci dalam bak yang dilengkapi injeksi udara yang menciptakan turbulensi, membantu melepaskan kotoran dari celah-celah produk.
- Pencucian ultrasonik: Menggunakan gelombang ultrasonik frekuensi tinggi untuk menciptakan kavitasi mikro yang melepaskan kotoran dari permukaan. Efektif untuk produk dengan kontur kompleks seperti kecambah dan jamur.

7.6.3 Manajemen Air dan Klorinasi

Manajemen kualitas air pencuci merupakan aspek kritis dalam keamanan pangan. Penambahan klorin (Cl_2) dalam bentuk natrium hipoklorit (NaOCl) ke dalam air pencuci pada konsentrasi 50–200 mg/L (ppm) merupakan praktik yang paling umum untuk menekan populasi mikroorganisme. Klorin bekerja dengan merusak dinding sel dan membran bakteri melalui oksidasi, yang menghambat fungsi enzimatis seluler.

Efektivitas klorin sangat bergantung pada pH air. Pada pH 6–7, klorin berada dalam bentuk asam hipoklorit (HOCl) yang merupakan bentuk germisidal paling aktif. Pada pH >8, klorin berubah dominan menjadi ion hipoklorit (OCl⁻) yang aktivitas antimikrobanya jauh lebih rendah. Oleh karena itu, pemantauan dan koreksi pH air pencuci secara rutin sangat penting (Sapers, 2001)

Organic load (beban organik) dalam air pencuci yang meningkat seiring waktu operasi mengonsumsi klorin bebas secara cepat. Oleh karena itu, konsentrasi klorin aktif harus dipantau secara berkala menggunakan DPD test kit atau elektroda selektif ion klorin, dan air harus diganti atau klorin ditambahkan secara proaktif.

Sebagai alternatif klorin, teknologi sanitasi air yang lebih baru dan aman mencakup ozonasi (O₃), asam perasetat (PAA), dan elektrolyzed oxidizing water (EOW). Masing-masing memiliki mekanisme kerja antimikroba yang berbeda dan profil keamanan yang perlu dipertimbangkan sesuai regulasi lokal (Beuchat et al., 2004)

7.7 Curing

7.7.1 Definisi dan Dasar Fisiologis Curing

Curing adalah proses perlakuan pascapanen yang dirancang untuk menyembuhkan luka (*wound healing*) pada permukaan komoditas tertentu terutama umbi, akar, dan beberapa jenis buah labu sebelum penyimpanan jangka panjang. Secara fisiologis, curing memicu respons penyembuhan luka melalui dua mekanisme utama: pembentukan jaringan gabus (suberisasi atau periderm baru) pada permukaan luka, dan penguatan jaringan kulit yang sudah ada.

Suberisasi adalah deposisi suberin polimer lipid yang bersifat kedap air dan hidrofobik pada sel-sel epidermis dan beberapa lapisan di bawahnya. Proses ini secara dramatis mengurangi laju transpirasi dari permukaan luka dan menciptakan barier fisik terhadap invasi patogen. Pada komoditas yang terluka saat panen, area bekas luka adalah titik masuk utama bagi patogen seperti *Fusarium spp.* dan *Erwinia spp.* yang menyebabkan busuk penyimpanan

Selain suberisasi, curing juga menstimulasi aktivitas enzim fenilalanin amonia liase (PAL) yang berperan dalam biosintesis senyawa fenolat antimikroba sebagai bagian dari respons pertahanan tanaman (*plant defense response*). Peningkatan kandungan lignin di sekitar area luka juga berkontribusi pada penguatan barier mekanis terhadap penetrasi patogen.

7.7.2 Kondisi Curing per Komoditas

Kondisi curing (suhu, kelembaban relatif, dan durasi) bervariasi secara signifikan antar komoditas karena perbedaan dalam fisiologi, morfologi kulit, dan kepekaan terhadap panas dan kelembaban.

Tabel 7. 3. Kondisi curing optimal untuk berbagai komoditas umbi dan akar (diadaptasi dari (Kader, 2013b)

Komoditas	Suhu (°C)	RH (%)	Durasi	Tujuan Utama
Ubi jalar	29–32	85–90	4–7 hari	Suberisasi dan pembentukan periderm

Komoditas	Suhu (°C)	RH (%)	Durasi	Tujuan Utama
Kentang	10–16	90–95	10–14 hari	Penyembuhan luka dan penguatan periderm
Singkong	30–35	90–95	2–3 hari	Suberisasi cepat sebelum pengolahan
Labu	27–32	80–85	10–14 hari	Penguatan kulit dan penutupan luka
Bawang merah	32–45	60–75	7–14 hari	Pengeringan lapisan luar (neck drying)

7.7.3 Fasilitas dan Implementasi Curing

Curing dapat dilakukan dalam berbagai fasilitas, mulai dari gudang tradisional yang dimodifikasi dengan ventilasi yang dikendalikan, hingga ruang curing berteknologi tinggi dengan kontrol suhu, kelembaban, dan sirkulasi udara yang presisi. Untuk petani skala kecil, curing sederhana dapat dilakukan dengan menutup tumpukan produk dengan terpal atau karung goni untuk menangkap panas dan kelembaban dari respirasi produk itu sendiri.

Kegagalan proses curing karena suhu terlalu rendah, kelembaban terlalu rendah, atau durasi yang tidak cukup menghasilkan produk dengan luka yang belum sembuh

sepenuhnya dan rentan terhadap infeksi patogen selama penyimpanan. Sebaliknya, kondisi curing yang berlebihan (suhu terlalu tinggi atau durasi terlalu panjang) dapat menyebabkan kerusakan termal, kehilangan air berlebih, dan perkembangan rasa tidak diinginkan pada beberapa komoditas.

7.8 Sanitasi

7.8.1 Prinsip Sanitasi dalam Rantai Pascapanen

Sanitasi dalam konteks pascapanen adalah upaya sistematis untuk mengurangi kontaminasi mikrobiologis pada produk, peralatan, dan lingkungan fasilitas hingga ke tingkat yang aman bagi konsumen. Sanitasi bukan sekadar kebersihan fisik ini adalah penerapan prinsip-prinsip mikrobiologi pangan secara praktis dalam lingkungan operasional yang dinamis.

Landasan teori sanitasi pascapanen bertumpu pada konsep bahwa patogen pangan seperti *Salmonella spp.*, *Listeria monocytogenes*, *Escherichia coli* O157:H7, dan *Cryptosporidium parvum* dapat mengkontaminasi produk segar di berbagai titik dalam rantai produksi dari tanah, air irigasi, pupuk kandang, serangga, hewan, hingga pekerja dan peralatan (Beuchat, 2002). Sistem sanitasi yang efektif harus mengidentifikasi semua titik masuk kontaminasi potensial ini dan menerapkan intervensi yang tepat.

7.8.2 Kerangka HACCP dalam Penanganan Pascapanen

Hazard Analysis and Critical Control Points (HACCP) adalah sistem manajemen keamanan pangan berbasis ilmu pengetahuan yang berfokus pada pencegahan kontaminasi daripada deteksi produk yang sudah terkontaminasi. Prinsip

HACCP pertama kali dikembangkan untuk program makanan astronot NASA pada awal 1960-an dan kini menjadi standar industri pangan global (Mortimore & Wallace, 2013)

Implementasi HACCP dalam fasilitas pascapanen melibatkan tujuh prinsip dasar: (1) analisis bahaya (hazard analysis), (2) identifikasi titik kontrol kritis (CCPs), (3) penetapan batas kritis, (4) pemantauan CCPs, (5) tindakan koreksi, (6) verifikasi, dan (7) dokumentasi. Dalam konteks penanganan pascapanen, CCPs yang umum diidentifikasi meliputi proses pencucian (risiko kontaminasi silang melalui air), curing (risiko perkembangan patogen pada kondisi hangat-lembab jika terjadi kontaminasi awal), dan penyimpanan (risiko kondensasi yang memfasilitasi pertumbuhan jamur).

7.8.3 Agen Sanitasi dan Prosedur Desinfeksi

Pemilihan agen sanitasi harus mempertimbangkan spektrum antimikroba, keamanan bagi operator dan konsumen, kompatibilitas dengan material peralatan, biaya, dan persyaratan regulasi. Prosedur sanitasi yang efektif selalu dimulai dengan pembersihan fisik (*cleaning*) untuk menghilangkan kotoran organik, baru kemudian diikuti dengan desinfeksi karena agen sanitasi kimia jauh kurang efektif jika terdapat lapisan organik yang melindungi mikroorganisme.

Tabel 7. 4. Perbandingan agen sanitasi utama dalam penanganan pascapanen (diadaptasi dari (Beuchat et al., 2004)

Agen Sanitasi	Konsentrasi Kerja	Mekanisme Aksi	Kelebihan	Keterbatasan
Natrium hipoklorit (NaOCl)	50–200 ppm	Oksidasi dinding sel	Murah, efektif luas	pH sensitif, bau klorin
Asam perasetat (PAA)	40–150 ppm	Oksidasi protein dan lipid	Efektif pH luas, residu rendah	Korosif, biaya lebih tinggi
Hidrogen peroksida (H ₂ O ₂)	0,5–5%	Radikal bebas oksigen	Tidak meninggalkan residu	Efektif terbatas pada bakteri
Air teroksidasi elektrolisis (EOW)	10–80 ppm HOCl	Oksidasi membran sel	Aman, dibuat di tempat	Peralatan investasi tinggi

7.8.4 Sanitasi Personel dan Peralatan

Manusia adalah salah satu vektor kontaminasi paling signifikan dalam fasilitas pascapanen. Pekerja dapat membawa dan menyebarkan patogen melalui tangan, pakaian, dan alat-alat yang mereka gunakan. Program higiene personal yang ketat mencakup pencucian tangan yang benar, penggunaan APD (alat pelindung diri), pembatasan personel yang sakit, dan pelatihan reguler merupakan komponen tidak tergantikan dari sistem sanitasi yang efektif.

Sanitasi peralatan harus dilakukan sesuai prosedur Standard Operating Procedure (SOP) yang tertulis dan

terverifikasi. Prinsip umum yang dikenal sebagai CIP (*Clean-in-Place*) untuk peralatan tetap, dan prosedur pembersihan manual untuk alat genggam, harus mencakup: pembersihan fisik dengan deterjen, pembilasan dengan air bersih, aplikasi agen sanitasi pada konsentrasi dan waktu kontak yang tepat, pembilasan akhir (jika diperlukan), dan pengeringan sebelum digunakan kembali. Pemantauan efektivitas sanitasi dilakukan melalui swab test menggunakan ATP bioluminescence atau metode kultur mikrobiologis konvensional.

RANGKUMAN

Bab ini telah membahas tujuh komponen utama sistem penanganan pascapanen secara terintegrasi:

Teknik pemanenan yang tepat memperhatikan indikator kematangan, metode panen, dan kondisi lingkungan merupakan fondasi dari seluruh sistem pascapanen karena kualitas produk saat panen menentukan batas atas kualitas yang dapat dipertahankan. Penanganan awal pascapanen, terutama pra-pendinginan segera, merupakan intervensi paling efektif untuk memperpanjang umur simpan karena langsung menyerang faktor utama deteriorasi: suhu tinggi yang mempercepat respirasi dan aktivitas enzimatik. Sortasi berperan sebagai penyaring kualitas awal yang membuang produk tidak layak dan mencegah efek kontaminasi silang dari produk yang rusak atau terinfeksi terhadap produk sehat. Grading mengklasifikasikan produk ke dalam kelas mutu berdasarkan standar yang disepakati, memungkinkan diferensiasi harga dan akses ke berbagai segmen pasar dari pasar lokal hingga ekspor.

Pencucian menghilangkan kotoran dan mengurangi beban patogen, tetapi harus dikelola dengan ketat terutama kualitas air dan penggunaan sanitizer untuk mencegah kontaminasi silang yang justru memperburuk keamanan pangan produk. Curing memicu penyembuhan luka melalui suberisasi dan pembentukan periderm baru, secara dramatis mengurangi risiko kehilangan air dan infeksi patogen selama penyimpanan pada komoditas umbi dan akar. Sanitasi merupakan sistem pencegahan kontaminasi mikrobiologis yang bersifat menyeluruh mencakup produk, air, peralatan, fasilitas, dan personel dengan kerangka kerja HACCP sebagai fondasi manajemen keamanan pangan yang sistematis.

TES FORMATIF

A. Soal Essay

Jawablah pertanyaan berikut dengan jawaban yang komprehensif dan didukung oleh landasan teori yang tepat.

1. Jelaskan perbedaan mendasar antara kematangan fisiologis (*physiological maturity*) dan kematangan hortikultura (*horticultural maturity*). Berikan contoh dua komoditas untuk masing-masing konsep, dan diskusikan implikasinya terhadap penentuan waktu panen dan pengelolaan rantai pascapanen.
2. Uraikan mengapa pra-pendinginan (*pre-cooling*) dianggap sebagai intervensi pascapanen yang paling penting. Dalam jawaban Anda, kaitkan dengan konsep Rule of Q10 (*van 't Hoff*) dan bandingkan minimal tiga metode *pre-cooling* dari segi mekanisme, kecepatan penurunan suhu, dan komoditas yang sesuai.
3. Diskusikan hubungan antara sortasi dan grading dalam konteks sistem penanganan pascapanen

modern. Mengapa kedua proses ini harus dilakukan secara berurutan dan tidak dapat dipertukarkan? Sertakan dalam diskusi Anda peran teknologi machine vision dalam meningkatkan objektivitas kedua proses tersebut.

4. Jelaskan prinsip ilmiah di balik proses curing pada ubi jalar dan kentang. Mengapa kondisi curing untuk kedua komoditas ini berbeda secara signifikan dalam hal suhu dan durasi? Apa konsekuensi fisiologis dari kegagalan proses curing terhadap daya simpan komoditas?
5. Analisis risiko kontaminasi silang (*cross-contamination*) dalam operasi pencucian pascapanen dan bagaimana penggunaan klorin sebagai sanitiser air dapat dioptimalkan dari perspektif kimia. Jelaskan mengapa pengendalian pH air sangat kritis dalam efektivitas klorinasi.

LATIHAN PROBLEM BASED LEARNING (PBL)

Kerjakan studi kasus berikut secara berkelompok (3–4 orang). Analisis situasi, identifikasi masalah, dan kembangkan solusi berbasis teori yang telah dipelajari.

Studi Kasus 1 : Kehilangan Pascapanen Mangga di Kalimantan Timur

Latar Belakang:

Seorang petani mangga di Kutai Kartanegara memanen 5 ton mangga harumanis setiap musim. Pemanenan dilakukan pada siang hari (pukul 10.00–14.00 WITA) menggunakan galah dengan kantong jaring. Setelah dipanen, mangga dikumpulkan di pinggir kebun dalam keranjang bambu dan menunggu truk pengangkut selama 3–4 jam di bawah terik matahari. Sesampainya di gudang pengumpul di Samarinda (± 4 jam perjalanan), petani menemukan $\pm 30\%$ mangga

mengalami kerusakan—memar, busuk ujung, dan beberapa mulai mengeluarkan bau fermentasi.

Pertanyaan PBL:

1. Identifikasi semua titik kritis kehilangan (critical loss points) dalam skenario di atas dan jelaskan mekanisme fisiologis dan biokimia yang terjadi di setiap titik.
2. Rancang sistem penanganan pascapanen yang komprehensif untuk memperbaiki skenario di atas. Sertakan modifikasi pada teknik panen, penanganan awal, dan kondisi transportasi.
3. Hitung estimasi biaya-manfaat dari penerapan sistem pre-cooling sederhana menggunakan hydrocooling jika biaya investasi awal Rp 25 juta dan dapat mengurangi kehilangan dari 30% menjadi 8%. Asumsikan harga mangga Rp 8.000/kg.

DAFTAR PUSTAKA

- Bac, C. W., Van Henten, E. J., Hemming, J., & Edan, Y. (2014). Harvesting Robots for High-value Crops: State-of-the-art Review and Challenges Ahead. *Journal of Field Robotics*, 31(6), 888–911. <https://doi.org/10.1002/rob.21525>
- Beuchat, L. R. (2002). Current focus Ecological factors influencing survival and growth of human pathogens on raw fruits and vegetables. *Microbes and Infection*, 4(4), 413–423. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1286-4579\(02\)01555-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1286-4579(02)01555-1)
- Beuchat, L. R., Adler, B. B., & Lang, M. M. (2004). Efficacy of Chlorine and a Peroxyacetic Acid Sanitizer in Killing *Listeria monocytogenes* on Iceberg and Romaine Lettuce Using Simulated Commercial Processing Conditions. In *Journal of Food Protection* (Vol. 67, Number 6).
- Blasco, J., Aleixos, N., & Moltó, E. (2007). Computer vision detection of peel defects in citrus by means of a region oriented segmentation algorithm. *Journal of Food Engineering*, 81(3), 535–543. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.12.007>
- Eckert, J. W., & Ogawa, J. M. (1989). The Chemical Control Of Postharvest Diseases: Deciduous Fruits, Berries, Vegetables and Root/Tuber Crops. *Annual Review of Phytopathology*, 26(1), 433–469. www.annualreviews.org
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2019). *The state of food and agriculture: Moving forward on food loss*

and waste reduction. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

- Kader, A. A. (2013). Postharvest Technology of Horticultural Crops-An Overview from Farm to Fork. In *J. Appl. Sci. Technol. (Special Issue (Number 1))*.
- Kidd, F., West, C., Blackman, E. ?, & Laties, G. G. (1995). The start of modern postharvest physiology. In *Biobgyand Technology Postharvest Biology and Technology* (Vol. 5).
- Kitinoja, L., & Kader, A. A. (2015). *Small-Scale Postharvest Handling Practices: A Manual for Horticultural Crops (5th Edition)*. www.postharvest.org
- Kitinoja, L., Saran, S., Roy, S. K., & Kader, A. A. (2011). Postharvest technology for developing countries: Challenges and opportunities in research, outreach and advocacy. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91(4), 597–603. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4295>
- Mortimore, S., & Wallace, C. (2013). HACCP: A practical approach. In *HACCP: A Practical Approach*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5028-3>
- Nicolaï, B. M., Beullens, K., Bobelyn, E., Peirs, A., Saeys, W., Theron, K. I., & Lammertyn, J. (2007). Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: A review. In *Postharvest Biology and Technology* (Vol. 46, Number 2, pp. 99–118). <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.06.024>
- Penelitian, P., Pengembangan, D., Badan, H., Dan, P., Pertanian, P., & Pertanian, K. (2020). *Laporan Tahunan Puslitbang Hortikultura Tahun 2020*. <http://hortikultura.litbang.pertanian.go.id>

- Sapers, G. M. (2001). Efficacy of Washing and Sanitizing Methods for Disinfection of Fresh Fruit and Vegetable Products. *Food Technol*, 39(4), 301–311.
- Tripathi, K., Pandey, S., Malik, M., & Kaul, T. (2015). *Environmental and Applied Bioresearch FRUIT RIPENING OF CLIMACTERIC AND NON CLIMACTERIC FRUIT*. www.scienceresearchlibrary.com

BAB 8

PENYIMPANAN HASIL PERTANIAN

DESKRIPSI PEMBELAJARAN

Bab ini membahas secara mendalam prinsip-prinsip ilmiah dan teknologi penyimpanan hasil pertanian pasca panen. Mahasiswa akan mempelajari dasar fisiologi dan biokimia yang melandasi berbagai metode penyimpanan modern, mulai dari *cold storage* konvensional hingga teknologi atmosfer terkendali dan hipobarik. Pemahaman konsep *chilling injury* dan sistem *cold chain* menjadi bekal penting dalam penerapan teknologi pascapanen yang berkelanjutan dan efisien.

KOMPETENSI PEMBELAJARAN

Setelah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan mampu:

1. Menjelaskan prinsip-prinsip dasar penyimpanan hasil pertanian berdasarkan fisiologi pascapanen.
2. Menganalisis mekanisme kerja berbagai teknologi penyimpanan (*cold storage*, CA, MA, hipobarik).
3. Membedakan karakteristik dan aplikasi controlled atmosphere storage (CA) dengan modified atmosphere storage (MA).
4. Mendiagnosis gejala *chilling injury* pada komoditas hortikultura dan menyarankan penanganan yang tepat.

- 5. Merancang sistem cold chain yang efisien untuk mempertahankan mutu dan keamanan produk pertanian.
- 6. Mengintegrasikan berbagai teknologi penyimpanan dalam manajemen pascapanen berbasis ilmu pengetahuan.
- 7. Mengintegrasikan seluruh tahap penanganan pascapanen dalam satu sistem yang kohesif dan efisien.

PETA KONSEP PEMBELAJARAN

PENYIMPANAN HASIL PERTANIAN



Prinsip Penyimpanan		Teknologi Penyimpanan		Masalah & Solusi
• Respirasi & Q10 • Transpirasi & VPD • Peran Etilen		• Cold Storage • CA & MA Storage • Hipobarik		• Chilling Injury • Cold Chain System • IoT & TTI

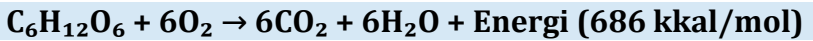
8.1 Prinsip Penyimpanan

8.1.1 Dasar Fisiologi Penyimpanan

Penyimpanan hasil pertanian bertujuan mempertahankan mutu dan memperpanjang umur simpan komoditas dengan memperlambat proses fisiologis dan biokimia yang berlangsung setelah pemanenan. Setelah dipisahkan dari tanaman induknya, komoditas tetap

menjalankan metabolisme yang secara perlahan menguras substrat dan mempercepat kemunduran mutu (Majeed & Waseem, 2022; Yahia, 2009)

Respirasi merupakan proses fisiologi paling dominan selama penyimpanan. Oksidasi substrat organik (karbohidrat, asam organik) menghasilkan energi (ATP), karbon dioksida (CO₂), dan air. Laju respirasi yang tinggi menyebabkan susut bobot, penurunan kandungan gula, penurunan kekerasan, dan pematangan yang dipercepat. Secara umum, reaksi respirasi aerob dinyatakan sebagai berikut:



(Kumar et al., 2024; Yahia, 2009)

Transpirasi atau kehilangan air dari jaringan ke lingkungan adalah proses fisika yang sangat memengaruhi kualitas produk pascapanen. Kehilangan air sebesar 5–10% dari bobot awal sudah cukup menyebabkan kelayuan, perubahan tekstur, dan penurunan nilai jual secara signifikan. Faktor pendorong transpirasi mencakup defisit tekanan uap (VPD) antara jaringan dan lingkungan, luas permukaan komoditas, integritas kutikula, dan adanya luka mekanis (Tigist et al., 2013; Yahia, 2009)

8.1.2 Faktor yang Mempengaruhi Umur Simpan

Dua faktor utama yang dikendalikan dalam penyimpanan adalah suhu dan kelembaban relatif (RH). Penurunan suhu sebesar 10°C secara teoritis menurunkan laju reaksi biologis sebesar 2–3 kali lipat, yang dikenal sebagai koefisien suhu (Q₁₀). Efek pendinginan ini menjadi dasar ilmiah dari seluruh teknologi cold storage. Namun, pendinginan yang terlalu rendah pada komoditas sensitif dapat memicu chilling injury (Majeed & Waseem, 2022; Murata, 1969)

Tabel 8. 1. Faktor-faktor lingkungan dan pengaruhnya terhadap umur simpan komoditas pertanian (Sumber: Majeed & Waseem, 2022; Yahia, 2009)

Parameter	Pengaruh Terhadap Komoditas	Kondisi Optimal Umum
Suhu	Menurunkan laju respirasi & transpirasi (Q10 = 2–3)	Mendekati titik beku tanpa chilling injury
Kelembaban Relatif (RH)	Mengurangi transpirasi; terlalu tinggi memacu patogen	90–95% (sayuran); 85–90% (buah)
Konsentrasi O ₂	O ₂ rendah menekan respirasi aerob	2–5% (CA/MA storage)
Konsentrasi CO ₂	CO ₂ tinggi menghambat etilen dan patogen	1–10% (tergantung komoditas)
Etilen (C ₂ H ₄)	Memacu pematangan dan penuaan	< 0,01 ppm (kondisi ideal)

8.1.3 Peran Etilen dalam Penyimpanan

Etilen (C₂H₄) adalah fitohormon gas yang memainkan peran sentral dalam pengaturan pematangan buah klimakterik. Buah klimakterik seperti mangga, pisang, alpukat, dan tomat mengalami lonjakan laju respirasi (respiratory climacteric) yang disertai dengan peningkatan produksi etilen endogen. Sebaliknya, buah non-klimakterik seperti anggur, stroberi, dan semangka tidak menunjukkan pola ini (Kumar et al., 2024; Majeed & Waseem, 2022)

Pengendalian etilen selama penyimpanan dilakukan melalui beberapa pendekatan: (1) penghambatan sintesis etilen dengan perlakuan 1-methylcyclopropene (1-MCP), (2) scrubbing etilen menggunakan kalium permanganat (KMnO_4) atau ozon, dan (3) pengurangan konsentrasi O_2 untuk menekan enzim ACC oksidase. Teknologi 1-MCP telah terbukti efektif memperpanjang umur simpan berbagai komoditas secara komersial (*Dong et al., 2016; Watkins & Miller, 2005*)

8.2 Cold Storage

8.2.1 Konsep Dasar dan Mekanisme

Cold storage atau penyimpanan dingin merupakan teknologi dasar pascapanen yang memanfaatkan efek pendinginan untuk memperlambat proses fisiologis dan kimiawi produk pertanian. Sistem refrigerasi modern bekerja berdasarkan siklus kompresi uap, di mana refrigeran bersirkulasi melewati kompresor, kondenser, katup ekspansi, dan evaporator. Panas diserap dari ruang penyimpanan oleh evaporator dan dilepaskan ke luar melalui kondenser (*Majeed & Waseem, 2022; Thompson, 2003*)

Perkembangan terkini *cold storage* mengarah pada penggunaan refrigeran ramah lingkungan (HFO, CO_2 alami) untuk menggantikan refrigeran konvensional berfluor tinggi yang berkontribusi pada pemanasan global. Selain itu, integrasi sistem kontrol cerdas berbasis sensor IoT memungkinkan pemantauan dan penyesuaian suhu serta kelembaban secara real-time dan otomatis (*Majeed & Waseem, 2022; Thompson, 2003*)

8.2.2 Suhu Penyimpanan Berdasarkan Komoditas

Setiap komoditas pertanian memiliki kisaran suhu optimal yang berbeda berdasarkan karakter fisiologisnya. Buah dan sayuran asal daerah tropis pada umumnya lebih rentan terhadap kerusakan dingin dibandingkan komoditas dari daerah subtropis, sehingga suhu penyimpanannya tidak boleh terlalu rendah (*Majeed & Waseem, 2022; Yahia, 2009*)

Tabel 8. 2. Suhu dan kelembaban optimal cold storage berbagai komoditas (Sumber: (Majeed & Waseem, 2022; Yahia, 2009)

Komoditas	Suhu Optimal (°C)	RH (%)
Pisang (belum matang)	13–15	90–95
Mangga	10–13	90–95
Alpukat	5–13	85–90
Tomat (matang)	8–10	90–95
Wortel	0–1	98–100
Brokoli	0–1	95–100
Apel	-1 – 4	90–95
Kentang	3,3–10	90–95

8.2.3 Pre-cooling: Pelepasan Panas Lapang

Pre-cooling adalah langkah kritis sebelum memasuki cold storage permanen. Panas lapang (field heat) yang

terbawa komoditas saat panen harus dibuang secepat mungkin untuk menghentikan laju kemunduran mutu. Metode yang lazim digunakan: room cooling, forced-air cooling, hydrocooling, vacuum cooling, dan ice cooling. Forced-air cooling paling umum untuk komoditas berukuran sedang karena kecepatan pendinginan tinggi tanpa media air (Kitinoja & Alhassan, 2012a; Majeed & Waseem, 2022)

8.3 *Controlled Atmosphere Storage (CA Storage)*

8.3.1 Konsep dan Prinsip Dasar

Controlled Atmosphere (CA) Storage adalah teknologi penyimpanan yang secara aktif mengubah dan mempertahankan komposisi atmosfer dalam ruang penyimpanan, yakni menurunkan konsentrasi O_2 di bawah kadar normal (21%) dan meningkatkan CO_2 di atas kadar normal (0,03%). Kondisi ini diciptakan dan dipertahankan secara presisi menggunakan sistem kontrol mekanik-elektronik yang terus menerus memantau dan menyesuaikan komposisi gas (Kumar et al., 2024; Yahia, 2009)

Mekanisme fisiologis CA storage bekerja melalui dua jalur utama. Pertama, penurunan O_2 (hipoksia) menghambat laju respirasi aerob melalui penghambatan sitokrom c oksidase pada rantai transpor elektron mitokondria. Ketika O_2 turun di bawah 2%, komoditas tertentu dapat beralih ke respirasi anaerob yang menghasilkan etanol dan asetaldehida, sehingga memicu off-flavor. Kedua, CO_2 tinggi bekerja kompetitif menghambat situs reseptor etilen, menekan respons pematangan dan menghambat enzim ACC sintase (Kumar et al., 2024; Watkins & Miller, 2005; Yahia, 2009)

8.3.2 Ultra Low Oxygen (ULO) Storage

Perkembangan terkini CA storage adalah teknologi Ultra Low Oxygen (ULO) yang mempertahankan konsentrasi O_2 pada kisaran 0,5–1,5% dan CO_2 pada 1,0–3,0%. ULO terbukti mampu memperpanjang umur simpan apel hingga 12 bulan atau lebih dengan mempertahankan kekerasan, keasaman, dan flavor secara superior dibanding CA konvensional. Keberhasilan ULO bergantung pada akurasi sensor O_2 yang sangat presisi (resolusi 0,1%) dan sistem kontrol gas yang responsive (Jin et al., 2011; Watkins & Miller, 2005)

8.3.3 Dynamic Controlled Atmosphere (DCA)

Kemajuan terbaru dalam teknologi CA adalah Dynamic Controlled Atmosphere (DCA), di mana konsentrasi O_2 disesuaikan secara dinamis berdasarkan respons fisiologis komoditas secara real-time. DCA menggunakan pengukuran fluoresensi klorofil (DCA-CF) atau kandungan etanol (DCA-RQ) sebagai indikator batas stres anaerob untuk mengoptimalkan kondisi O_2 serendah mungkin tanpa memicu fermentasi. Teknologi ini memungkinkan perpanjangan umur simpan yang lebih lama dibandingkan ULO statis (Bessemans et al., 2016; Jin et al., 2011)

8.4 Modified Atmosphere Storage (MA Storage)

8.4.1 Perbedaan Mendasar MA dan CA Storage

Modified Atmosphere (MA) Storage berbeda secara fundamental dari CA storage dalam hal mekanisme pengendalian atmosfer. Pada MA storage, komposisi gas di sekitar produk dimodifikasi dan dibiarkan berubah secara pasif akibat respirasi komoditas itu sendiri melalui pengemasan dengan film polimer semipermeabel. Equilibrium MA tercapai saat laju respirasi komoditas

seimbang dengan laju difusi gas menembus film kemasan (*Mangaraj et al., 2009a; Sandhya, 2010*)

Perbedaan utama CA dan MA: CA storage mengontrol komposisi gas secara aktif dan presisi dalam ruang penyimpanan besar (memerlukan investasi infrastruktur tinggi), sedangkan MA storage adalah sistem pasif berbasis kemasan individual (lebih ekonomis dan fleksibel). CA ideal untuk penyimpanan jangka panjang komoditas bernilai tinggi; MA ideal untuk distribusi dan ritel produk segar (*Mangaraj et al., 2009b; Yahia, 2009*)

8.4.2 Jenis Film Kemasan dan Pemodelan MA

Pemilihan material film kemasan merupakan aspek kritis dalam MA storage. Film polietilen berdensitas rendah (LDPE), polipropilen (PP), dan film mikro-perforasi digunakan sesuai karakteristik laju respirasi produk. Pendekatan matematis dan komputasional kini banyak digunakan untuk memprediksi equilibrium MA dalam kemasan berdasarkan model permeabilitas film dan laju respirasi komoditas, sehingga desain kemasan dapat dioptimalkan sebelum diproduksi (*Mahajan et al., 2014; Mangaraj et al., 2009b*)

8.4.3 Aplikasi MA Storage dalam Rantai Pasok

MA storage banyak diterapkan dalam pengemasan atmosfer termodifikasi (MAP) untuk buah dan sayuran segar potong (fresh-cut), daging segar, ikan, dan produk roti. Teknologi active MAP—yang menggabungkan injeksi gas aktif (N_2 flush, CO_2 injection) ke dalam kemasan—memberikan kondisi awal yang optimal sebelum keseimbangan pasif tercapai, sehingga efektivitas perlindungan lebih baik. Sistem ini kini semakin diintegrasikan dengan agen antimikroba aktif (essential oil, nanopartikel ZnO) dalam matriks film (*Dumitraşcu et al., 2021; Mahajan et al., 2014; Sandhya, 2010*)

8.5 Penyimpanan Hipobarik (Hypobaric Storage)

8.5.1 Prinsip Fisika dan Fisiologi

Penyimpanan hipobarik (*hypobaric storage*) atau *low pressure storage* menggunakan tekanan udara di bawah tekanan atmosfer normal ($< 101,3$ kPa) di dalam ruang penyimpanan kedap yang didinginkan. Penurunan tekanan total secara otomatis menurunkan tekanan parsial O_2 , CO_2 , etilen, dan gas volatil lainnya. Pada tekanan 10–20 kPa, konsentrasi O_2 efektif setara dengan 2–4% pada tekanan normal, menekan laju respirasi aerob dan produksi etilen endogen secara dramatis (*Çalhan et al., 2016; Kumar et al., 2024*)

Ventilasi udara segar dilakukan secara terkontrol dan kontinyu untuk membuang CO_2 dan gas volatil (etilen, asetaldehida, etanol) yang dihasilkan komoditas. Berbeda dari CA storage yang mengandalkan CO_2 tinggi sebagai penekan pematangan, hipobarik menghilangkan gas volatil sehingga tidak terjadi akumulasi. Hal ini merupakan keunggulan fundamental hipobarik dalam mencegah off-flavor yang diinduksi fermentasi (*Çalhan et al., 2016; Kumar et al., 2024*)

8.5.2 Perkembangan dan Tantangan Teknologi Hipobarik

Minat terhadap penyimpanan hipobarik kembali meningkat dalam satu dekade terakhir, terutama untuk komoditas bernilai tinggi seperti bunga potong, seafood premium, dan daging segar. Penelitian terkini mengevaluasi desain wadah hipobarik portabel berteknologi bahan komposit ringan untuk mengatasi keterbatasan bobot wadah baja konvensional. Namun demikian, biaya energi pompa vakum kontinyu dan kompleksitas sistem masih menjadi hambatan utama penerapan komersial skala besar (*Çalhan et al., 2016; Kumar et al., 2024*)

8.6 *Chililing Injury*

8.6.1 Definisi dan Mekanisme Dasar

Chilling injury (CI) adalah gangguan fisiologis yang terjadi pada komoditas sensitif dingin saat terpapar suhu di atas titik beku namun di bawah suhu ambang kritis (biasanya 5–15°C, tergantung spesies). CI bukan disebabkan oleh pembentukan kristal es seperti pada freezing injury, melainkan oleh serangkaian perubahan struktural dan biokimia pada membran sel yang bersifat kumulatif (*Murata, 1969*)

Teori membran menjadi landasan utama pemahaman CI: pada suhu rendah kritis, membran fosfolipid mengalami transisi fase dari cair-kristalin (fluid) menjadi gel-semikristalin (rigid). Perubahan fisik ini mengganggu fungsi protein integral membran, termasuk sistem transpor ion dan rantai transpor elektron mitokondria. Kini diketahui bahwa stres oksidatif (peningkatan reactive oxygen species/ROS) memainkan peran sentral sebagai mediator kerusakan seluler pada kondisi CI (*Murata, 1969*)

8.6.2 Gejala dan Diagnosa Chilling Injury

Gejala CI bermanifestasi setelah periode paparan dingin tertentu dan seringkali baru tampak jelas ketika produk dipindahkan ke suhu lebih hangat. Gejala mencakup: pitting (cekungan cokelat pada permukaan kulit), pencokelatan internal (internal browning), gagal matang (failure to ripen), peningkatan kerentanan terhadap patogen sekunder, perubahan flavor, dan kelayuan tidak normal (*Murata, 1969*).

Tabel 8. 3. Suhu kritis chilling injury dan gejala utama pada berbagai komoditas (Sumber: Murata, 1969; Yahia, 2009)

Komoditas	Suhu Kritis CI (°C)	Gejala Utama
Pisang	12–13	Kulit menghitam, gagal matang
Mangga	10–12	Pitting, bercak cokelat, off-flavor
Pepaya	7–10	Pitting, busuk basah
Tomat (hijau)	10–12	Pitting, busuk Alternaria
Terong	7–10	Pitting, pencokelatan biji
Mentimun	7–10	Pitting, busuk basah
Ubi jalar	12–15	Cekungan internal, rasa pahit

8.6.3 Strategi Mitigasi Chilling Injury

Berbagai strategi telah dikembangkan untuk mengurangi risiko CI tanpa mengorbankan umur simpan. Conditioning (pemaparan suhu sedang sebelum penyimpanan dingin) membantu membran beradaptasi melalui perubahan komposisi asam lemak tak jenuh. Intermittent warming (pemanasan berkala) memungkinkan pemulihan metabolisme dan perbaikan membran. Perlakuan panas singkat (heat treatment) sebelum penyimpanan dingin terbukti menginduksi ekspresi heat shock protein (HSP)

yang melindungi membran dari kerusakan suhu rendah (Murata, 1969; Waghmare & Annapure, 2013)

Perlakuan pasca panen terkini yang efektif meliputi: aplikasi melatonin eksogen yang meningkatkan kapasitas antioksidan jaringan, perlakuan asam salisilat (SA) yang mengaktifasi gen respons stres dingin, aplikasi polyamine (spermine, spermidine) yang menstabilkan membran, serta aplikasi 1-MCP yang mengurangi CI melalui penghambatan respons etilen yang memperparah gejala (Cao *et al.*, 2025; Dong *et al.*, 2016)

8.7 Cold Chain System

8.7.1 Konsep dan Filosofi Cold Chain

Cold chain atau rantai dingin adalah sistem terintegrasi yang memastikan produk pertanian perishable terjaga pada suhu optimal secara tidak terputus (unbroken) mulai dari titik panen hingga konsumen akhir. Konsep fundamental cold chain bukan sekadar tentang pendinginan, melainkan tentang kontinuitas dan konsistensi pengelolaan suhu di setiap titik sepanjang rantai pasok. Satu titik pemutusan rantai dingin (chain break) dapat menghancurkan efektivitas seluruh upaya penyimpanan berteknologi tinggi sebelumnya (James & James, 2010; Ndraha *et al.*, 2018)

Estimasi global menyebutkan bahwa sekitar 14% produk pangan hilang antara panen dan ritel, dan proporsi signifikan dari kehilangan ini disebabkan oleh pengelolaan suhu yang tidak memadai sepanjang rantai pasok. Di negara berkembang, kehilangan pascapanen akibat cold chain yang tidak memadai dapat mencapai 30–50% untuk produk hortikultura segar (Kitinoja & Alhassan, 2012a; Shashi *et al.*, 2018)

8.7.2 Komponen-Komponen *Cold Chain*

Cold chain yang komprehensif mencakup tahapan: (1) pre-cooling dan penyimpanan di sentra produksi, (2) transportasi berpendingin (reefer truck, kontainer reefer), (3) fasilitas distribusi berpendingin (distribution center), (4) transportasi last-mile berpendingin, (5) penyimpanan di tingkat retailer (cold display cabinet), dan (6) penyimpanan konsumen (kulkas rumah tangga). Setiap tahap memerlukan protokol pengelolaan suhu yang terdokumentasi dan terverifikasi (*James & James, 2010; Shashi et al., 2018*)

8.7.3 Teknologi Pemantauan *Cold Chain*: IoT dan TTI

Perkembangan teknologi Internet of Things (IoT) dan sensor nirkabel telah merevolusi pemantauan cold chain. Data logger elektronik merekam profil suhu secara real-time sepanjang perjalanan produk. Teknologi RFID terintegrasi dengan sensor suhu memungkinkan tracking sekaligus monitoring kondisi suhu secara simultan. Sistem berbasis cloud memungkinkan seluruh pemangku kepentingan rantai pasok mengakses data suhu secara real-time, sehingga intervensi dapat dilakukan segera saat terjadi penyimpangan (*Badia-Melis et al., 2018; Ndraha et al., 2018; Shashi et al., 2018*)

Indikator Time-Temperature (TTI) adalah perangkat sederhana berbasis reaksi kimia, enzimatik, atau fisik yang berubah secara ireversibel sebanding dengan akumulasi paparan suhu-waktu. TTI digunakan sebagai alat visual murah untuk mengindikasikan apakah produk telah mengalami penyimpangan suhu selama distribusi. Integrasi TTI dengan teknologi blockchain kini mulai dikembangkan untuk menciptakan sistem ketertelusuran (traceability) rantai pasok pangan yang transparan dan tidak dapat dimanipulasi (*Ndraha et al., 2018; Shashi et al., 2018*)

8.7.4 Tantangan Cold Chain di Indonesia dan Solusi Adaptif

Di Indonesia, cold chain menghadapi tantangan multidimensi: infrastruktur listrik yang tidak merata di sentra produksi pedesaan, investasi awal yang tinggi, fragmentasi rantai pasok dengan banyak perantara tanpa fasilitas pendinginan, keterbatasan pengetahuan petani, dan kondisi jalan yang mempersulit transportasi berpendingin. Kehilangan pascapanen sayuran dan buah di Indonesia diperkirakan mencapai 25–40%, jauh di atas negara maju yang berkisar 5–10% (*Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2019; Kitinoja & Alhassan, 2012a*)

Solusi adaptif yang dikembangkan mencakup: Zero Energy Cool Chamber (ZECC) berbasis bata dan pasir basah untuk pra-pendinginan di tingkat petani, cold storage bertenaga surya (solar-powered cold storage) untuk sentra produksi terpencil, mobile cold storage untuk wilayah terpencil, dan penguatan koperasi untuk berbagi fasilitas cold chain secara kolektif. Kebijakan pemerintah melalui program Sistem Resi Gudang (SRG) berpendingin juga menjadi instrumen penting dalam membangun cold chain berbasis desa (*Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2019; Kitinoja & Alhassan, 2012a; Sun et al., 2017*)

RANGKUMAN

Penyimpanan hasil pertanian merupakan komponen kritis teknologi pascapanen yang bertujuan mempertahankan mutu dan memperpanjang umur simpan komoditas. Berikut adalah poin-poin kunci yang perlu dipahami:

Prinsip penyimpanan didasarkan pada pengendalian laju respirasi, transpirasi, dan produksi etilen melalui manipulasi

suhu, kelembaban, dan komposisi gas atmosfer. Koefisien suhu Q_{10} (penurunan $10^{\circ}\text{C} \rightarrow$ reaksi biologis 2–3x lebih lambat) menjadi dasar ilmiah cold storage. Cold storage memanfaatkan efek pendinginan untuk menekan metabolisme. Pre-cooling adalah langkah awal kritis untuk membuang panas lapang secepat mungkin setelah panen. CA storage mengendalikan komposisi atmosfer secara aktif dan presisi (O_2 rendah + CO_2 tinggi). Teknologi DCA (Dynamic Controlled Atmosphere) merupakan perkembangan terkini yang mengoptimalkan O_2 secara real-time berdasarkan respons fisiologis komoditas.

MA storage memodifikasi atmosfer secara pasif melalui film kemasan semipermeabel. Active MAP dan integrasi agen antimikroba dalam matriks film merupakan arah pengembangan terkini yang lebih efektif. Penyimpanan hipobarik menciptakan kondisi tekanan sub-atmosferik untuk menurunkan O_2 parsial dan mengeluarkan gas volatil secara kontinyu, namun keterbatasan biaya infrastruktur membatasi penerapan komersial skala besar.

Chilling injury adalah gangguan fisiologis pada komoditas sensitif dingin akibat transisi fase membran fosfolipid yang dimediasi oleh stres oksidatif (ROS). Strategi mitigasi modern meliputi perlakuan melatonin, asam salisilat, polyamine, 1-MCP, dan heat treatment. Cold chain system adalah sistem terintegrasi yang menjaga produk pada suhu optimal secara tidak terputus dari panen hingga konsumen. Teknologi IoT, data logger, TTI, dan blockchain kini mendukung pemantauan dan ketertelusuran rantai dingin secara digital.

TES FORMATIF ESSAI

1. Jelaskan konsep Q_{10} (temperature coefficient) dalam konteks penyimpanan pascapanen. Bagaimana prinsip ini menjadi dasar ilmiah pengembangan

teknologi cold storage? Berikan contoh perhitungan sederhana untuk mengilustrasikan pengaruh penurunan suhu terhadap laju respirasi.

2. Uraikan mekanisme fisiologis chilling injury berdasarkan teori membran fosfolipid. Mengapa pisang mengalami chilling injury pada suhu 12°C sementara apel dapat disimpan mendekati 0°C? Jelaskan pula peran reactive oxygen species (ROS) dalam patologi chilling injury berdasarkan pemahaman terkini.
3. Bandingkan secara mendalam prinsip kerja, keunggulan, keterbatasan, dan aplikasi komersial antara CA Storage konvensional, ULO Storage, dan Dynamic Controlled Atmosphere (DCA). Dalam kondisi apa Anda merekomendasikan penggunaan DCA alih-alih ULO?
4. Jelaskan konsep 'unbroken cold chain' dan implikasinya terhadap mutu produk pertanian segar. Identifikasi titik-titik kritis dalam cold chain yang paling rentan mengalami pemutusan rantai dingin di Indonesia, dan sarankan solusi praktis yang sesuai dengan kondisi lokal.
5. Seorang petani tomat di Jawa Barat berencana mengeksport tomat hijau ke Singapura menggunakan kapal kontainer (transit 3 hari). Rekomendasikan sistem penyimpanan yang paling tepat beserta parameter teknis (suhu, RH, komposisi gas), dan jelaskan alasan ilmiah di balik setiap rekomendasi Anda.

Latihan Problem Based Learning (PBL)

KASUS 1 — Manajemen Ekspor Mangga Harum

Manis PT. Agro Nusantara memenangkan kontrak ekspor 50 ton mangga Harum Manis ke Jepang per bulan. Produk harus tiba dalam kondisi matang konsumsi (eating ripe) setelah transit 7 hari via kapal. Gudang di Probolinggo hanya memiliki cold storage konvensional bersuhu 10–12°C. Di Jepang, mangga disimpan di cold chain retail 13°C sebelum dijual.

Tugas kelompok (4–5 mahasiswa):

- Analisis risiko chilling injury, kematangan tidak seragam, dan chain break yang mungkin terjadi dalam rantai pasok tersebut.
- Rancanglah protokol pascapanen lengkap: dari panen, pre-cooling, penyimpanan di gudang, hingga loading ke kontainer kapal (termasuk parameter suhu, RH, dan apakah perlu teknologi CA/MA).
- Hitung estimasi susut bobot (weight loss) jika RH rata-rata sepanjang rantai adalah 85% dibandingkan 95% (asumsikan koefisien transpirasi 0,15%/jam pada 12°C).
- Sarankan teknologi pemantauan cold chain yang feasible dan ekonomis untuk skenario ini (TTI, data logger, IoT).

- Presentasikan rancangan dalam bentuk flowchart cold chain management beserta justifikasi ilmiahnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Badia-Melis, R., Mc Carthy, U., Ruiz-Garcia, L., Garcia-Hierro, J., & Robla Villalba, J. I. (2018). New trends in cold chain monitoring applications - A review. In *Food Control* (Vol. 86, pp. 170–182). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.11.022>
- Bessemans, N., Verboven, P., Verlinden, B. E., & Nicolai, B. M. (2016). A novel type of dynamic controlled atmosphere storage based on the respiratory quotient (RQ-DCA). *Postharvest Biology and Technology*, 115, 91–102. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.12.019>
- Çalhan, Onursal, C. E., Güneyli, A., Eren, I., & Koyuncu, M. A. (2016). Effects of different storage techniques and 1-MCP application on quality of “Granny Smith” apple. *Acta Horticulturae*, 1120, 123–129. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1120.18>
- Cao, S., Zhang, G., Luo, Y., Qiu, J., Ba, L., Xu, S., Zhao, Z., Luo, D., Dong, G., & Ren, Y. (2025). Recent Advances in Postharvest Physiology and Preservation Technology of Peach Fruit: A Systematic Review. *Horticulturae*, 11. <https://doi.org/10.3390/horticulturae>
- Dong, F., Fu, X., Watanabe, N., Su, X., & Yang, Z. (2016). Recent advances in the emission and functions of plant vegetative volatiles. In *Molecules* (Vol. 21, Number 2). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/molecules21020124>
- Dumitraşcu, L., Stănciuc, N., & Aprodu, I. (2021). Encapsulation of anthocyanins from cornelian cherry fruits using heated or non-heated soy proteins. *Foods*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/foods10061342>

- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2019). *The state of food and agriculture. 2019, Moving forward on food loss and waste reduction*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/3/ca6030en/ca6030en.pdf>
- James, S. J., & James, C. (2010). The food cold-chain and climate change. *Food Research International*, 43(7), 1944–1956. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.02.001>
- Jin, P., Shang, H., Chen, J., Zhu, H., Zhao, Y., & Zheng, Y. (2011). Effect of 1-Methylcyclopropene on Chilling Injury and Quality of Peach Fruit during Cold Storage. *Journal of Food Science*, 76(8). <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2011.02349.x>
- Kitinoja, L., & Alhassan, H. Y. (2012). Identification of appropriate postharvest technologies for improving market access and incomes for small horticultural farmers in Sub-Saharan Africa and South Asia. *Acta Horticulturae*. <https://doi.org/https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.934.1>
- Kumar, S., Kumar, R., Bibwe, B. R., Nath, P., Singh, R. K., Mandhania, S., Pal, A., Soni, R., & Kumar, A. (2024). Postharvest handling of ethylene with oxidative and absorptive means. In *Journal of Food Science and Technology* (Vol. 61, Number 5, pp. 813–832). Springer. <https://doi.org/10.1007/s13197-023-05777-1>
- Mahajan, P. V., Caleb, O. J., Singh, Z., Watkins, C. B., & Geyer, M. (2014). Postharvest treatments of fresh produce. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*:

Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 372(2017). <https://doi.org/10.1098/rsta.2013.0309>

Majeed, Y., & Waseem, M. (2022). Postharvest Handling Systems. In *Encyclopedia of Smart Agriculture Technologies* (pp. 1–9). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-89123-7_125-1

Mangaraj, S., Goswami, T. K., & Mahajan, P. V. (2009a). Applications of Plastic Films for Modified Atmosphere Packaging of Fruits and Vegetables: A Review. *Food Engineering Reviews*, 1(2), 133–158. <https://doi.org/10.1007/s12393-009-9007-3>

Mangaraj, S., Goswami, T. K., & Mahajan, P. V. (2009b). Applications of Plastic Films for Modified Atmosphere Packaging of Fruits and Vegetables: A Review. *Food Engineering Reviews*, 1(2), 133–158. <https://doi.org/10.1007/s12393-009-9007-3>

Murata, T. (1969). Physiological and Biochemical Studies of Chilling Injury in Bananas. In *PHYSIOLOGIA PLANTARUM* (Vol. 22).

Ndraha, N., Hsiao, H. I., Vlajic, J., Yang, M. F., & Lin, H. T. V. (2018). Time-temperature abuse in the food cold chain: Review of issues, challenges, and recommendations. In *Food Control* (Vol. 89, pp. 12–21). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.01.027>

Sandhya. (2010). Modified atmosphere packaging of fresh produce: Current status and future needs. In *LWT* (Vol. 43, Number 3, pp. 381–392). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2009.05.018>

- Shashi, Cerchione, R., Singh, R., Centobelli, P., & Shabani, A. (2018). Food cold chain management: From a structured literature review to a conceptual framework and research agenda. In *International Journal of Logistics Management* (Vol. 29, Number 3, pp. 792–821). Emerald Group Holdings Ltd. <https://doi.org/10.1108/IJLM-01-2017-0007>
- Sun, L. nan, Lu, L. xin, Qiu, X. lin, & Tang, Y. li. (2017). Development of low-density polyethylene antioxidant active films containing α -tocopherol loaded with MCM-41(Mobil Composition of Matter No. 41) mesoporous silica. *Food Control*, 71, 193–199. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.06.025>
- Thompson, A. K. (2003). *Fruit and Vegetables: Harvesting, Handling and Storage*. Wiley. <https://books.google.co.id/books?id=OfUkuAAACAAJ>
- Tigist, M., Workneh, T. S., & Woldetsadik, K. (2013). Effects of variety on the quality of tomato stored under ambient conditions. *Journal of Food Science and Technology*, 50(3), 477–486. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0378-0>
- Waghmare, R. B., & Annapure, U. S. (2013). Combined effect of chemical treatment and/or modified atmosphere packaging (MAP) on quality of fresh-cut papaya. *Postharvest Biology and Technology*, 85, 147–153. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.05.010>
- Watkins, C. B., & Miller, W. B. (2005). -Methylcyclopropene (1-MCP) Based Technologies for Storage and Shelf-life Extension. *Acta Horticulturae*. <http://www.hort.cornell.edu/mcp/>

Yahia, E. M. . (2009). *Modified and controlled atmospheres for the storage, transportation, and packaging of horticultural commodities*. CRC Press/Taylor & Francis.

BAB 9

PENGEMASAN PRODUK PERTANIAN

DESKRIPSI PEMBELAJARAN

Pada bab 9 pengemasan produk pertanian ini mahasiswa mempelajari secara komprehensif mengenai pengemasan produk pertanian yang mencakup fungsi utama pengemasan dalam melindungi produk, mempertahankan mutu, serta memperpanjang umur simpan. Pembahasan juga meliputi berbagai jenis bahan pengemas yang digunakan, baik bahan konvensional maupun modern, serta karakteristik dan kesesuaiannya dengan jenis produk pertanian.

Selain itu, mahasiswa dikenalkan pada teknologi pengemasan terkini seperti *Modified Atmosphere Packaging (MAP)* yang berperan dalam mengatur komposisi gas di dalam kemasan untuk memperlambat kerusakan produk. Materi juga mencakup penggunaan *edible coating* sebagai lapisan pelindung yang dapat dimakan untuk menjaga kualitas produk segar.

Bab ini membahas konsep kemasan ramah lingkungan sebagai Upaya mendukung keberlanjutan, termasuk pemilihan bahan yang biodegradable dan pengurangan limbah kemasan. Melalui, pembelajaran ini, mahasiswa diharapkan mampu memahami dan menganalisis berbagai Teknik serta inovasi pengemasan, serta menerapkannya secara tepat sesuai dengan karakteristik produk dan kebutuhan pasar.

KOMPETENSI PEMBELAJARAN

Setelah mengikuti bab 9 pengemasan produk pertanian ini diharapkan mahasiswa dan mahasiswi memiliki pengetahuan dan kemampuan:

1. Memahami konsep dasar pengemasan produk pertanian, meliputi fungsi pengemasan, jenis-jenis bahan pengemas, serta prinsip kerja teknologi pengemasan seperti *Modified Atmosphere Packaging (MAP)*, *edible coating*, dan kemasan ramah lingkungan
2. Menganalisis kesesuaian jenis kemasan dan teknologi pengemasan yang tepat berdasarkan karakteristik produk pertanian, kebutuhan penyimpanan, serta aspek keamanan dan mutu produk.
3. Merancang atau merekomendasikan sistem pengemasan produk pertanian yang efektif, efisien, dan ramah lingkungan sesuai dengan standar mutu serta kebutuhan distribusi dan pasar.

PETA KONSEP PEMBELAJARAN



9.1 Fungsi Pengemasan

Pengemasan merupakan salah satu komponen penting dalam sistem penanganan pascapanen produk pertanian. Dalam praktiknya, pengemasan tidak hanya berfungsi sebagai wadah atau pembungkus, tetapi juga memiliki peranan yang sangat strategis dalam menjaga mutu, keamanan, serta meningkatkan nilai ekonomis suatu produk. Oleh karena itu, pemahaman mengenai fungsi pengemasan menjadi hal yang mendasar dalam pengelolaan produk pertanian, baik pada skala kecil maupun industri (Marsh & Bugusu, 2007)

Salah satu fungsi utama pengemasan adalah sebagai pelindung produk dari berbagai potensi kerusakan. Produk pertanian umumnya memiliki karakteristik yang mudah rusak (*perishable*), sehingga rentan terhadap pengaruh lingkungan seperti benturan mekanis, perubahan suhu, kelembaban, paparan oksigen, serta kontaminasi mikroorganisme. Melalui penggunaan bahan dan desain kemasan yang tepat, produk dapat terlindungi dari

kerusakan fisik, kimia, maupun mikrobiologis selama proses penyimpanan distribusi (Restuccia et al., 2010)

Selain sebagai pelindung, pengemasan juga berfungsi untuk memperpanjang umur simpan produk. Proses penurunan mutu pada produk pertanian, seperti pelayuan, pembusukan, dan perubahan warna, dapat diperlambat dengan teknik pengemasan yang sesuai. Pengemasan yang baik mampu mengontrol faktor-faktor lingkungan yang memengaruhi laju respirasi dan aktivitas mikroorganisme, sehingga kualitas produk tetap terjaga dalam jangka waktu yang lebih lama (Vermeiren et al., 1999)

Fungsi berikutnya adalah memudahkan proses penanganan, penyimpanan, dan distribusi. Kemasan yang dirancang dengan baik memungkinkan produk disusun secara efisien, mudah diangkut, serta mengurangi risiko kehilangan hasil selama proses logistik. Dalam hal ini, pengemasan juga berperan dalam meningkatkan efisiensi operasional, baik dari segi waktu maupun biaya (Han, 2013)

Pengemasan juga memiliki fungsi sebagai media komunikasi dan peningkatan daya tarik produk. Kemasan yang informatif dapat memberikan berbagai informasi penting kepada konsumen, seperti komposisi produk, tanggal kedaluwarsa, cara penyimpanan, serta label keamanan pangan. Selain itu, desain kemasan yang menarik dapat meningkatkan minat konsumen dan memberikan nilai tambah terhadap produk, sehingga berpengaruh terhadap keputusan pembelian (Marsh & Bugusu, 2007)

Seiring dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, fungsi pengemasan juga semakin berkembang dengan mempertimbangkan aspek keberlanjutan lingkungan. Penggunaan bahan kemasan yang ramah lingkungan, seperti bahan yang dapat terurai secara alami (biodegradable) dan dapat didaur ulang, menjadi perhatian utama dalam industri pertanian modern. Hal ini dilakukan sebagai upaya untuk mengurangi dampak negatif limbah

kemasan terhadap lingkungan (Marsh & Bugusu, 2007; Restuccia et al., 2010)

Dengan demikian, pengemasan memiliki berbagai fungsi yang saling berkaitan, yaitu sebagai pelindung, memperpanjang umur simpan, memudahkan distribusi, meningkatkan nilai jual, serta mendukung keberlanjutan lingkungan. Pemahaman yang komprehensif mengenai fungsi-fungsi tersebut sangat penting dalam menentukan sistem pengemasan yang tepat dan efektif bagi produk pertanian.

9.2 Jenis Bahan Pengemas

Jenis bahan pengemas merupakan salah satu aspek penting dalam sistem pengemasan produk pertanian karena sangat menentukan tingkat perlindungan, umur simpan, serta kualitas produk selama penyimpanan dan distribusi. Bahan pengemas yang digunakan harus mampu melindungi produk dari kerusakan fisik, pengaruh lingkungan seperti udara dan kelembaban, serta kontaminasi mikroorganisme yang dapat menyebabkan penurunan mutu. Selain itu, pemilihan bahan pengemas juga harus mempertimbangkan sifat produk pertanian yang umumnya mudah rusak (*perishable*), sehingga diperlukan bahan yang memiliki karakteristik khusus seperti ketahanan terhadap gas dan uap air. Seiring perkembangan teknologi, bahan pengemas tidak hanya terbatas pada bahan konvensional seperti plastik, kertas, kaca, dan logam, tetapi juga berkembang menjadi bahan ramah lingkungan seperti biopolimer yang dapat terurai secara alami. Dengan demikian, pemilihan bahan pengemas yang tepat menjadi kunci dalam menjaga kualitas dan meningkatkan daya saing produk pertanian di pasar modern (Marsh & Bugusu, 2007)

1. Pengemasan Tradisional

Pengemasan tradisional merupakan metode pengemasan yang telah digunakan secara turun-temurun oleh petani dengan memanfaatkan bahan alami seperti daun pisang, anyaman bambu, dan karung goni. Jenis kemasan ini dipilih karena mudah diperoleh di lingkungan sekitar, tidak membutuhkan biaya besar, serta tidak memerlukan teknologi khusus sehingga sangat sesuai digunakan oleh petani skala kecil. Namun, pengemasan tradisional umumnya hanya memberikan perlindungan sederhana terhadap produk pertanian (Ropikoh et al., 2024)

Meskipun memiliki kelebihan dari segi biaya dan ramah lingkungan, pengemasan tradisional memiliki kelemahan dalam melindungi produk. Produk yang dikemas secara tradisional lebih rentan terhadap kerusakan fisik, kehilangan kadar air, serta kontaminasi mikroorganisme. Akibatnya, umur simpan produk menjadi lebih pendek dibandingkan dengan penggunaan kemasan modern yang lebih canggih (Sefri Aldo et al., 2024).

2. Pengemasan Modern (Konvensional)

Pengemasan modern merupakan jenis pengemasan yang menggunakan bahan seperti plastik, kaca, logam, dan kertas untuk meningkatkan perlindungan produk pertanian. Bahan-bahan tersebut dirancang untuk melindungi produk dari kerusakan mekanis, kontaminasi, serta pengaruh lingkungan seperti oksigen dan kelembaban. Selain itu, penggunaan kemasan modern memungkinkan distribusi produk dalam jarak yang lebih jauh tanpa menurunkan kualitasnya secara signifikan (Robert, 2016).

Perkembangan teknologi juga menghasilkan kemasan multilayer yang terdiri dari beberapa lapisan bahan dengan fungsi berbeda. Kombinasi ini memberikan keunggulan seperti ketahanan terhadap gas dan uap air serta meningkatkan daya simpan produk. Oleh karena itu, pengemasan modern menjadi pilihan utama dalam sistem distribusi produk pertanian saat ini (Sefri Aldo et al., 2024).

3. Pengemasan Aktif (*Active Packaging*)

Pengemasan aktif merupakan inovasi dalam teknologi kemasan yang tidak hanya berfungsi sebagai pelindung, tetapi juga mampu berinteraksi dengan lingkungan di dalam kemasan. Contohnya adalah penggunaan penyerap oksigen, penyerap etilen, dan bahan antimikroba yang dapat memperlambat kerusakan produk. Teknologi ini sangat efektif digunakan pada produk pertanian segar seperti buah dan sayuran (Vermeiren et al., 1999)

Penelitian menunjukkan bahwa pengemasan aktif mampu mengontrol komposisi gas di dalam kemasan sehingga dapat memperpanjang umur simpan produk. Selain itu, teknologi ini juga dapat menghambat pertumbuhan mikroorganisme penyebab pembusukan. Saat ini, pengemasan aktif juga mulai dikembangkan dengan bahan ramah lingkungan untuk mendukung keberlanjutan (Sefri Aldo et al., 2024).

4. Pengemasan Cerdas (*Smart Packaging*)

Pengemasan cerdas adalah jenis kemasan yang dilengkapi dengan indikator atau sensor yang dapat memberikan informasi mengenai kondisi produk secara langsung. Indikator tersebut dapat berupa perubahan warna, sensor suhu, maupun indikator kesegaran

produk sehingga konsumen dapat mengetahui kualitas produk tanpa membuka kemasan (Kerry et al., 2006)

Teknologi ini sangat bermanfaat dalam rantai distribusi karena mampu mendeteksi perubahan kondisi selama penyimpanan dan transportasi. Dengan adanya informasi ini, risiko konsumsi produk yang sudah tidak layak dapat diminimalkan, sehingga keamanan pangan dapat lebih terjamin (Sefri Aldo et al., 2024).

5. Ramah Lingkungan (*Biodegradable Packaging*)

Pengemasan ramah lingkungan merupakan jenis kemasan yang dapat terurai secara alami sehingga tidak mencemari lingkungan. Bahan yang digunakan biasanya berasal dari biopolimer seperti pati, selulosa, dan protein alami yang dapat menggantikan plastik konvensional. Penggunaan kemasan ini semakin berkembang seiring meningkatnya kesadaran terhadap masalah lingkungan (Siracusa et al., 2008)

Penelitian menunjukkan bahwa kemasan biodegradable mampu mengurangi limbah plastik secara signifikan dan dapat dibuat dari limbah pertanian seperti kulit singkong dan jerami. Hal ini menjadikan pengemasan ramah lingkungan sebagai solusi penting dalam mendukung sistem pertanian berkelanjutan di masa depan (Ropikoh et al., 2024; Siracusa et al., 2008).

9.3 Teknologi Pengemasan

Perkembangan teknologi pengemasan telah menghasilkan berbagai inovasi yang mampu meningkatkan kualitas dan keamanan produk, salah satunya adalah *Modified Atmosphere Packaging* (MAP).

1. Modified Atmosphere Packaging (MAP)

Modified atmosphere packaging (MAP) adalah teknik dengan cara mengubah komposisi gas di dalam kemasan, terutama kadar oksigen (O_2), karbon dioksida (CO_2), dan nitrogen (N_2), untuk memperlambat proses respirasi dan pertumbuhan mikroorganisme (Caleb et al., 2013). Dalam kondisi normal, udara mengandung sekitar 21% O_2 dan 0,03% CO_2 . Pada sistem MAP, kadar O_2 biasanya diturunkan dan CO_2 ditingkatkan untuk menekan aktivitas metabolik produk (Kader, 2013c)

2. Prinsip Kerja MAP dalam Fisiologi Pascapanen

Produk hortikultura setelah panen masih melakukan respirasi, yaitu proses pengambilan oksigen dan pelepasan karbon dioksida. Dengan menurunkan kadar oksigen : Laju respirasi menurun, produksi etilen berkurang, dan aktivitas enzimatis melambat. Akibatnya, proses pematangan dan penuaan dapat ditunda selain itu peningkatan CO_2 dapat menghambat pertumbuhan mikroorganisme pembusuk, sehingga kualitas produk lebih terjaga (Caleb et al., 2013)

3. Komposisi Gas dalam MAP

Komposisi gas dalam MAP harus disesuaikan dengan jenis komoditasnya misalnya, Buah Klimaterik: O_2 rendah (2-5%), CO_2 sedang, Sayuran daun: O_2 rendah (1-3%), CO_2 rendah-sedang. Pengaturan ini penting karena kondisi gas yang tidak tepat dapat menyebabkan kerusakan fisiologis seperti fermentasi anaerob (Kader, 2013c)

4. Keunggulan dan Keterbatasan MAP

Keunggulan dari penggunaan teknologi pengemasan menggunakan *Modified atmosphere packaging* (MAP) yaitu dapat memperpanjang umur simpan produk, menjaga kesegaran dan warna serta dapat mengurangi

penggunaan bahan kimia serta pengawet, sedangkan Keterbatasan dari penggunaan teknologi pengemasan menggunakan *Modified atmosphere packaging* (MAP) yaitu membutuhkan kontrol suhu yang ketat, risiko kerusakan jika komposisi gas tidak tepat dan biaya teknologi yang relatif tinggi (Alemu et al., 2025; Caleb et al., 2013; Robert, 2016)

9.4 Edible Coating

1. Konsep Dasar *Edible Coating*

Edible Coating atau pelapis yang dapat dimakan merupakan salah satu inovasi penting dalam teknologi pascapanen yang berfungsi sebagai lapisan tipis pada permukaan produk pertanian. Lapisan ini terbuat dari bahan alami seperti polisakarida, protein, dan lipid yang bersifat *biodegradable* dan aman dikonsumsi (Alemu et al., 2025)

Secara sederhana, *edible coating* bekerja seperti “kulit tambahan” pada buah atau sayuran. Lapisan ini membantu mengontrol pertukaran gas (oksigen dan karbon dioksida), uap air, serta zat terlarut antara produk dan lingkungan sekitarnya. Dalam konteks fisiologi pasca panen, keberadaan lapisan ini sangat penting karena setelah panen, produk hortikultura masih mengalami respirasi, transpirasi, dan proses metabolisme lainnya yang menyebabkan penurunan mutu. *Edible coating* mampu memperlambat proses tersebut sehingga produk tetap segar lebih lama (Prasad et al., 2018)

2. Prinsip Kerja *Edible Coating* dalam Fisiologi Pascapanen

Edible coating bekerja dengan membentuk lapisan semi-permeabel di permukaan produk. Lapisan ini tidak

sepenuhnya menutup pertukaran gas, tetapi cukup untuk mengatur laju respirasi dan kehilangan air

Secara fisiologis, mekanisme kerjanya meliputi:

1. Menurunkan laju respirasi

Lapisan *coating* mengurangi masuknya oksigen sehingga aktivitas respirasi menurun. Hal penting karena semakin tinggi respirasi, semakin cepat produk mengalami kerusakan (Kumar Tiwari et al., 2022)

2. Menghambat transpirasi (Kehilangan air)

Edible coating menutup stomata sehingga mengurangi kehilangan air, menjaga kesegaran, dan mencegah penyusutan berat (Alemu et al., 2025)

3. Menghambat aktivitas mikroba

Beberapa *coating* mengandung senyawa antimikroba alami yang mampu menekan pertumbuhan bakteri dan jamur (Hazarika et al., 2023)

4. Menekan reaksi oksidasi

Lapisan ini juga menghambat oksidasi yang menyebabkan perubahan warna dan penurunan kualitas nutrisi (Saputra et al., 2023)

Dengan mekanisme tersebut, *edible coating* mampu memperlambat proses *senescence* (penuaan fisiologis) pada produk pertanian

3. Jenis Bahan *Edible Coating*

Berdasarkan bahan penyusunnya, *edible coating* dapat dibagi menjadi beberapa jenis utama:

- a. Berbasis Polisakarida

Contohnya seperti pati, selulosa, pektin dan kitosan yang memiliki kemampuan membentuk film yang baik, efektif sebagai barrier gas, dan banyak digunakan pada buah segar. Polisakarida

banyak digunakan karena mampu mengontrol pertukaran gas dengan baik dan menjaga struktur produk (Ferreira et al., 2025)

b. Berbasis Protein

Contohnya seperti gelatin, kasein, protein kedelai yang memiliki sifat mekanik yang baik dan mampu meningkatkan tekstur produk

c. Berbasis lipid

Contohnya seperti lilin, asam lemak dan *beewax* (lilin lebah) yang efektif menahan kehilangan air dan cocok untuk produk dengan kadar air tinggi

d. Kombinasi (Komposit)

Merupakan gabungan dari beberapa bahan untuk meningkatkan efektivitas perlindungan terhadap gas, air dan mikroba.

4. Aplikasi *Edible Coating* pada Produk Pertanian

Edible coating telah banyak diterapkan pada berbagai komoditas hortikultura seperti: Untuk komoditas buah seperti: Apel, mangga, pisang dan jeruk, untuk komoditas sayuran seperti: tomat, wortel dan kentang, dan produk minimal *processing*. Aplikasi dilakukan dengan metode seperti pencelupan (*dipping*), penyemprotan (*spraying*), atau pelapisan langsung. Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan *edible coating* dapat mempertahankan warna dan tekstur, mengurangi kehilangan berat, memperlambat pematangan dan meningkatkan nilai jual produk (Ferreira et al., 2025; Hazarika et al., 2023)

5. Perkembangan Teknologi *Edible Coating* Modern

Teknologi *edible coating* berkembang ke arah yang lebih canggih seperti: *Nano-edible coating* yaitu meningkatkan sifat antimikroba dan antioksidan, *active*

coating yaitu mengandung zat aktif seperti minyak atsiri, dan *smart coating* yaitu mampu merespons perubahan lingkungan. Teknologi nano terbukti mampu meningkatkan kemampuan *coating* dalam menjaga kualitas, warna, dan umur simpan produk hortikultura (Saputra et al., 2023)

6. Peran *Edible Coating* dalam Sistem Pascapanen Modern

Dalam sistem pasca panen modern, *edible coating* menjadi solusi yang menjembatani antara kebutuhan pangan, efisiensi distribusi, dan keberlanjutan lingkungan. Teknologi ini bahkan dapat menjadi alternatif atau pelengkap dari *modified atmosphere packaging* (MAP), karena mampu mengontrol atmosfer mikro secara langsung pada permukaan produk (Alemu et al., 2025)

Dengan demikian, *edible coating* tidak hanya berfungsi sebagai pelindung, tetapi juga sebagai teknologi cerdas dalam mempertahankan kualitas fisiologis produk pertanian.

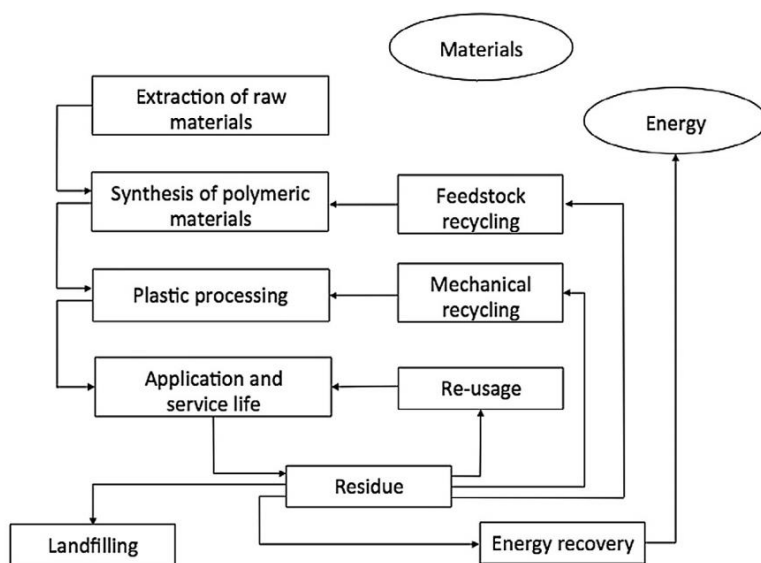
9.5 Kemasan Ramah Lingkungan

1. Konsep Kemasan Ramah Lingkungan

Kemasan ramah lingkungan (*eco-friendly packaging*) merupakan sistem pengemasan yang dirancang untuk mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan sepanjang siklus hidupnya, mulai dari produksi, distribusi, hingga pembuangan. Kemasan ini umumnya menggunakan bahan yang dapat terurai secara alami (*biodegradable*), dapat didaur ulang (*recyclable*), atau berasal dari sumber daya terbarukan. Dalam konteks produk pertanian, kemasan juga harus tetap mampu

menjaga mutu fisiologis produk seperti kadar air, laju respirasi, dan kesegaran selama penyimpanan (Marsh & Bugusu, 2007; Siracusa et al., 2008)

Konsep ini berkembang seiring meningkatnya kesadaran global terhadap masalah pencemaran lingkungan akibat limbah plastik konvensional. Industri pangan menjadi salah satu penyumbang utama limbah plastik, sehingga diperlukan inovasi kemasan yang tidak hanya fungsional tetapi juga berkelanjutan yang mendukung efisiensi sumber daya dan pengurangan limbah (Ncube et al., 2020)



Gambar 9. 1. Opsi pengelolaan limbah plastik dalam siklus hidup produk polimer (Ragaert et al., 2017)

2. Urgensi Penggunaan Kemasan Ramah Lingkungan

Penggunaan plastik sintesis dalam pengemasan produk pertanian memberikan banyak keuntungan seperti kekuatan mekanik dan daya tahan, namun

menimbulkan permasalahan serius karena sifatnya yang sulit terurai dilingkungan. Akumulasi limbah plastik dapat menyebabkan pencemaran tanah dan air serta berdampak pada kesehatan manusia melalui mikroplastik dalam rantai makanan (Geyer et al., 2017)

Dalam sistem pascapanen, penggunaan kemasan yang tidak ramah lingkungan juga berpotensi mengganggu keberlanjutan sistem produksi pertanian. Oleh karena itu, penggunaan kemasan ramah lingkungan menjadi penting untuk mendukung sistem pertanian berkelanjutan sekaligus meningkatkan daya saing produk di pasar global yang semakin peduli terhadap isu lingkungan (Ragaert et al., 2017)

Selain itu, perubahan perilaku konsumen juga menjadi faktor pendorong utama. Konsumen modern cenderung memilih produk yang menggunakan kemasan ramah lingkungan karena dianggap lebih aman dan bertanggung jawab terhadap lingkungan. Hal ini memberikan nilai tambah bagi produk pertanian yang dikemas secara berkelanjutan

3. Jenis Kemasan Ramah Lingkungan

a. Bahan *Biodegradable* (Bioplastik)

Bioplastik merupakan bahan kemasan yang dapat terurai secara biologis oleh aktivitas mikroorganisme. Bahan ini umumnya berasal dari sumber alami seperti pati, selulosa, dan protein. Dalam pengemasan produk pertanian, bioplastik memiliki potensi besar karena dapat menggantikan plastik konvensional tanpa meninggalkan residu berbahaya di lingkungan (Siracusa et al., 2008)

Penelitian menunjukkan bahwa bioplastik berbasis pati memiliki sifat penghalang gas yang baik, sehingga mampu membantu menjaga kualitas produk

hortikultura dengan mengontrol pertukaran oksigen dan karbon dioksida. Namun, kelemahannya terletak pada sifat mekanik dan ketahanan terhadap air yang masih perlu ditingkatkan (Rhim et al., 2013)

b. Kemasan Berbasis Biomaterial

Kemasan berbasis biomaterial menggunakan bahan alami seperti kitosan, pati, dan polimer *biodegradable* lainnya. Kitosan, misalnya memiliki sifat antimikroba yang dapat menghambat pertumbuhan mikroorganisme pada produk pertanian, sehingga membantu memperpanjang umur simpan (Dutta et al., 2009)

Penggunaan biomaterial dalam kemasan juga berperan dalam menjaga kualitas fisiologis produk, terutama dalam mengurangi kehilangan air dan memperlambat proses respirasi. Hal ini sangat penting pada produk segar seperti buah dan sayuran yang sensitif terhadap perubahan lingkungan (Mangaraj et al., 2009c)

c. Kemasan dari Limbah Pertanian

Pemanfaatan limbah pertanian sebagai bahan kemasan merupakan salah satu inovasi dalam konsep ekonomi sirkular. Limbah seperti jerami, kulit jagus, dan ampas tebu dapat diolah menjadi kemasan *biodegradable* yang bernilai ekonomi tinggi.

Pendekatan ini tidak hanya mengurangi limbah pertanian, tetapi juga meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber daya dan memberikan nilai tambah bagi sektor pertanian. Selain itu, penggunaan limbah sebagai bahan kemasan dapat mengurangi ketergantungan terhadap bahan berbasis fosil (Ncube et al., 2020)

d. *Edible Coating* dan *Edible Film*

Edible coating merupakan lapisan tipis yang dapat dimakan dan diaplikasikan langsung pada permukaan produk pertanian. Teknologi ini berfungsi sebagai penghalang terhadap kehilangan air, oksidasi, dan pertumbuhan mikroorganisme (Baldwin et al., 2012)

Dalam fisiologi pascapanen, *edible coating* berperan dalam mengontrol laju respirasi dan transpirasi, sehingga dapat memperlambat proses pematangan dan kerusakan. Beberapa bahan yang umum digunakan antara lain polisakarida, protein, dan lipid (Rhim et al., 2013)

4. Prinsip Desain Kemasan Ramah Lingkungan

Desain kemasan ramah lingkungan didasarkan prinsip 3R yaitu *reduce*, *reuse*, dan *recycle*. Prinsip ini bertujuan untuk mengurangi penggunaan bahan, memperpanjang masa pakai kemasan, serta memastikan kemasan dapat didaur ulang setelah digunakan (Geueke et al., 2018)

Selain itu, penggunaan bahan dari sumber daya terbarukan juga menjadi prinsip penting dalam pengembangan kemasan berkelanjutan. Dalam konteks produk pertanian, desain kemasan harus tetap mempertimbangkan kebutuhan fisiologis produk agar tidak mengganggu kualitas dan keamanan pangan (Marsh & Bugusu, 2007)

RANGKUMAN

Bab 9 membahas tentang pengemasan produk pertanian sebagai bagian penting dalam sistem pascapanen yang berperan tidak hanya sebagai pembungkus, tetapi juga sebagai upaya menjaga mutu, keamanan, serta meningkatkan nilai ekonomi produk. Pengemasan memiliki

fungsi utama sebagai pelindung dari kerusakan fisik, kimia, dan mikrobiologis, serta mampu memperpanjang umur simpan dengan mengontrol faktor lingkungan seperti suhu, kelembaban, dan komposisi gas. Selain itu, pengemasan juga memudahkan proses distribusi dan penyimpanan, sekaligus menjadi media komunikasi dan daya tarik bagi konsumen melalui informasi dan desain kemasan yang menarik.

Jenis bahan pengemas berkembang dari yang tradisional hingga modern. Pengemasan tradisional menggunakan bahan alami seperti daun pisang dan bambu yang murah dan ramah lingkungan, namun memiliki perlindungan terbatas. Sementara itu, pengemasan modern menggunakan bahan seperti plastik, kaca, dan logam yang memberikan perlindungan lebih baik dan memungkinkan distribusi jarak jauh. Inovasi lebih lanjut menghasilkan pengemasan aktif yang dapat mengontrol kondisi dalam kemasan, serta pengemasan cerdas yang dilengkapi indikator untuk memantau kualitas produk. Selain itu, berkembang pula kemasan ramah lingkungan berbasis biopolimer yang dapat terurai secara alami.

Perkembangan teknologi pengemasan ditandai dengan hadirnya Modified Atmosphere Packaging (MAP), yaitu teknik yang mengatur komposisi gas dalam kemasan untuk memperlambat respirasi dan pertumbuhan mikroorganisme sehingga umur simpan produk menjadi lebih panjang. Selain MAP, terdapat teknologi edible coating, yaitu lapisan tipis yang dapat dimakan dan berfungsi sebagai pelindung tambahan pada permukaan produk. Edible coating mampu mengurangi laju respirasi, menghambat kehilangan air, menekan pertumbuhan mikroba, serta mengurangi oksidasi sehingga kualitas produk tetap terjaga lebih lama.

Dalam konteks keberlanjutan, kemasan ramah lingkungan menjadi perhatian utama karena meningkatnya dampak negatif limbah plastik terhadap lingkungan. Kemasan ini menggunakan bahan yang biodegradable,

recyclable, dan berasal dari sumber daya terbarukan, seperti bioplastik, biomaterial, dan limbah pertanian. Selain itu, konsep edible coating juga termasuk dalam solusi ramah lingkungan. Prinsip desain kemasan berkelanjutan mengacu pada konsep 3R (reduce, reuse, recycle) yang bertujuan mengurangi limbah serta mendukung sistem pertanian yang berkelanjutan dan ramah lingkungan.

TES FORMATIF

1. Jelaskan fungsi utama pengemasan produk pertanian dan berikan contoh penerapannya!
2. Bandingkan kelebihan dan kekurangan pengemasan tradisional dan modern!
3. Jelaskan prinsip kerja teknologi *Modified Atmosphere Packaging* (MAP)!
4. Bagaimana mekanisme kerja *edible coating* dalam memperpanjang umur simpan produk?
5. Mengapa kemasan ramah lingkungan menjadi penting dalam sistem pertanian modern?

LATIHAN PROBLEM BASE LEARNING (PBL)

Kasus:

Seorang petani mangga mengalami kerugian karena buah cepat busuk saat distribusi ke kota besar yang membutuhkan waktu 3 hari pengiriman.

Tugas PBL:

1. Identifikasi Masalah
 - Apa penyebab utama kerusakan mangga selama distribusi?
2. Analisis
 - Faktor apa saja yang memerangaruhi penurunan mutu mangga? Dan Bagaimana peran pengemasan dalam masalah tersebut?

3. Alternatif Solusi

- Bandingkan beberapa solusi: Pengemasan konvensional, MAP, Edible Coating, Kemasan ramah lingkungan

4. Rekomendasi

- Tentukan jenis pengemasan terbaik untuk kasus tersebut. Jelaskan alasan ilmiahnya?

5. Evaluasi

- Apa kelebihan dan kelemahan solusi yang dipilih? dan Bagaimana dampak terhadap biaya dan lingkungan?

DAFTAR PUSTAKA

- Alemu, T. T., Intipunya, P., & Gebeyo, B. A. (2025). A comprehensive review of edible coatings for postharvest management of fruits and vegetables: enhancing food and nutrition security. *Discover Agriculture*, 3(1). <https://doi.org/10.1007/s44279-025-00348-8>
- Baldwin, E. A. ., Hagenmaier, R. D. ., & Bai, Jinhe. (2012). *Edible coatings and films to improve food quality*. CRC Press.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1201/b11082>
- Caleb, O. J., Mahajan, P. V., Al-Said, F. A. J., & Opara, U. L. (2013). Modified Atmosphere Packaging Technology of Fresh and Fresh-cut Produce and the Microbial Consequences-A Review. In *Food and Bioprocess Technology* (Vol. 6, Number 2, pp. 303–329). Springer Science and Business Media, LLC.
<https://doi.org/10.1007/s11947-012-0932-4>
- Dutta, P. K., Tripathi, S., Mehrotra, G. K., & Dutta, J. (2009). Perspectives for chitosan based antimicrobial films in food applications. *Food Chemistry*, 114(4), 1173–1182.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.11.047>
- Ferreira, M. D., Luís, L. E., Procopio, F. R., Brexó, R. P., Duarte, L. G. R., Nogueira, P. H. B., Bandini, V. P., Mitsuyuki, M. C., & Paris, E. C. (2025). Optimizing Postharvest Edible Coatings for Fruit and Vegetables with Plant-Based Polysaccharides. *Foods Journal*, 14(22).
<https://doi.org/10.3390/foods14223897>

- Geueke, B., Groh, K., & Muncke, J. (2018). Food packaging in the circular economy: Overview of chemical safety aspects for commonly used materials. *Journal of Cleaner Production*, 193, 491–505. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.005>
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Journal Science Advances*, 3, 1–5. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Han, J. H. (2013). A Review of Food Packaging Technologies and Innovations. In *Innovations in Food Packaging: Second Edition* (pp. 3–12). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394601-0.00001-1>
- Hazarika, T. K., Lalhriatpuia, C., Ngurthankhumi, R., Lalruatsangi, E., & Lalmachhuani, H. (2023). Edible Coatings in Extending the Shelf Life of Fruits: A Review. In *Indian Journal of Agricultural Research* (Vol. 57, Number 5, pp. 555–558). Agricultural Research Communication Centre. <https://doi.org/10.18805/IJARE.A-5725>
- Kader, A. A. (2013). Postharvest Technology of Horticultural Crops-An Overview from Farm to Fork. In *J. Appl. Sci. Technol. (Special Issue (Number 1))*.
- Kerry, J. P., O'Grady, M. N., & Hogan, S. A. (2006). Past, current and potential utilisation of active and intelligent packaging systems for meat and muscle-based products: A review. *Meat Science*, 74(1), 113–130. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2006.04.024>

- Kumar Tiwari, V., Chandra Verma, V., Kumar, K., Tsewang, T., Verma, A., Norbu, T., & Acharya, S. (2022). Edible coating for postharvest management of fruits and vegetables. *The Pharma Innovation Journal*, (3), 970–978. <http://www.thepharmajournal.com>
- Mangaraj, S., Goswami, T. K., & Mahajan, P. V. (2009). Applications of Plastic Films for Modified Atmosphere Packaging of Fruits and Vegetables: A Review. *Food Engineering Reviews*, 1(2), 133–158. <https://doi.org/10.1007/s12393-009-9007-3>
- Marsh, K., & Bugusu, B. (2007). Food packaging - Roles, materials, and environmental issues: Scientific status summary. In *Journal of Food Science* (Vol. 72, Number 3). <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00301.x>
- Ncube, L. K., Ude, A. U., Ogunmuyiwa, E. N., Zulkifli, R., & Beas, I. N. (2020). Environmental impact of food packaging materials: A review of contemporary development from conventional plastics to polylactic acid based materials. *Journal Materials*, 13(21), 1–24. <https://doi.org/10.3390/ma13214994>
- Prasad, K., Kumar Guarav, A., & Neha, P. (2018). Edible Coating Technology for Extending Market Life of Horticultural Produce. *Acta Scientific Agriculture*, 2, 55–64.
- Ragaert, K., Delva, L., & Van Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. In *Waste Management* (Vol. 69, pp. 24–58). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044>

- Restuccia, D., Spizzirri, U. G., Parisi, O. I., Cirillo, G., Curcio, M., Iemma, F., Puoci, F., Vinci, G., & Picci, N. (2010). New EU regulation aspects and global market of active and intelligent packaging for food industry applications. In *Food Control* (Vol. 21, Number 11, pp. 1425–1435). <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2010.04.028>
- Rhim, J. W., Park, H. M., & Ha, C. S. (2013). Bio-nanocomposites for food packaging applications. *Progress in Polymer Science*, 38(10–11), 1629–1652. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.05.008>
- Robert, G. L. (2016). *Food packaging: Principles and practice (3rd ed)*. CRC Press.
- Ropikoh, S., Widjayanti, W., Idris, M., Nuh, G. M., & Fanani, M. Z. (2024). Perkembangan Teknologi Pengemasan dan Penyimpanan Produk Pangan. *Jurnal Ilmiah Pangan Halal*, 6(1), 30–38. <https://doi.org/10.30997/jiph.v6i1.12668>
- Saputra, A., Herpandi, H., Supriadi, A., & Saputra, D. (2023). The effects of nano-edible coating on shelf life, physicochemical, microbial and sensory properties in food preservation and horticulture: A mini review. *E3S Web of Conferences*, 373. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337304006>
- Sefri Aldo, R., Elisia, R., & Kudus Susalam, M. (2024). Teknologi Packaging Dan Penyimpan Produk Pertanian. *Jurnal Tropical Animal*, 2. <https://doi.org/10.24036/jeta.v2i3.56>

- Seth, C., Pirnia, M., & Bookbinder, J. H. (2025). IoT-based Fresh Produce Supply Chain Under Uncertainty: An Adaptive Optimization Framework. *Computers & Industrial Engineering*.
<http://arxiv.org/abs/2511.05920>
- Siracusa, V., Rocculi, P., Romani, S., & Rosa, M. D. (2008). Biodegradable polymers for food packaging: a review. *Trends in Food Science and Technology*, 19(12), 634–643. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2008.07.003>
- Vermeiren, L., Devlieghere, F., Van Beest, M., De Kruijf, N., & Debevere, J. (1999). Developments in the active packaging of foods. *Trends in Food Science & Technology*, 77–86. [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(99\)00032-1](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(99)00032-1)

BAB 10

TRANSPORTASI DAN DISTRIBUSI

DESKRIPSI PEMBELAJARAN

Pada bab 10 Transportasi dan Distribusi Mahasiswa secara komprehensif mempelajari tentang konsep dan penerapan sistem transportasi dan distribusi produk hortikultura segar dalam konteks fisiologi dan teknologi pascapanen pada wilayah tropika lembab. Fokus utama meliputi prinsip transportasi komoditas segar, sistem rantai dingin, distribusi produk hortikultura, serta manajemen logistik pascapanen. Materi dirancang untuk memberikan pemahaman komprehensif mengenai bagaimana menjaga mutu fisiologis produk sejak panen hingga sampai ke konsumen melalui pengelolaan suhu, waktu dan sistem logistik yang efisien.

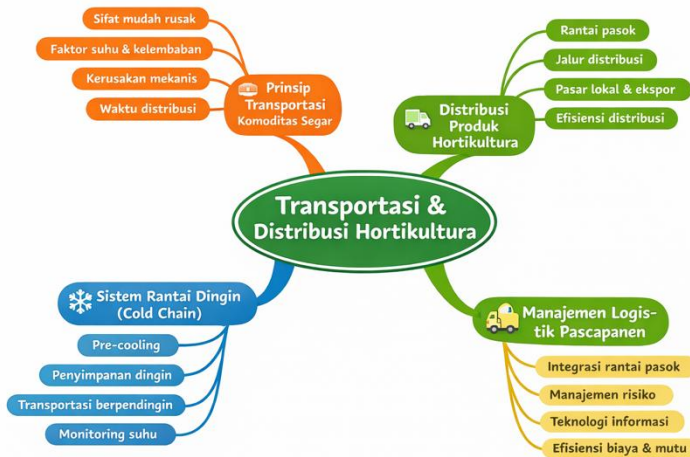
Transportasi dan distribusi merupakan tahapan kritis dalam rantai pasok hortikultura karena produk bersifat mudah rusak (*perishable*) dan sangat sensitif terhadap perubahan lingkungan. Oleh karena itu, pembelajaran ini menekankan integrasi antara aspek fisiologi tanaman, teknologi penyimpanan, dan manajemen rantai pasok modern untuk meminimalkan kehilangan hasil dan mempertahankan kualitas produk.

KOMPETENSI PEMBELAJARAN

Setelah mengikuti bab 9 pengemasan produk pertanian ini diharapkan mahasiswa dan mahasiswi memiliki pengetahuan dan kemampuan:

1. Menjelaskan prinsip dasar transportasi komoditas hortikultura segar
2. Menganalisis pengaruh suhu, kelembaban, dan waktu transportasi terhadap kualitas produk
3. Memahami konsep dan implementasi sistem rantai dingin (*cold chain*)
4. Mengidentifikasi sistem distribusi hortikultura dari hulu ke hilir
5. Mengevaluasi efektivitas manajemen logistik pascapanen
6. Merancang strategi distribusi yang efisien untuk produk pertanian tropika.

PETA KONSEP PEMBELAJARAN



10.1 Prinsip Transportasi Komoditas Segar

Produk hortikultura segar merupakan komoditas biologis hidup yang tetap mengalami aktivitas metabolisme setelah panen, seperti respirasi, transpirasi, dan produksi etilen. Proses-proses ini menyebabkan penurunan mutu secara bertahap, terutama pada kondisi lingkungan yang tidak terkendali. Oleh karena itu, transportasi tidak hanya berfungsi sebagai pemindahan produk, tetapi juga sebagai bagian penting dari sistem pengendalian mutu pascapanen yang bertujuan mempertahankan kualitas fisiologis produk (Hoffmann et al., 2025)

Secara fisiologis, laju respirasi meningkat seiring dengan kenaikan suhu, sehingga pada kondisi tropika lembab, kerusakan produk dapat terjadi lebih cepat. Kehilangan air akibat transpirasi menyebabkan pelayuan, penurunan berat, dan penurunan kesegaran produk. Selain itu, akumulasi gas etilen selama transportasi dapat mempercepat proses pematangan dan senesens. Oleh karena itu, pengendalian suhu dan ventilasi menjadi prinsip utama dalam transportasi komoditas segar (Kilelu et al., 2024)

Dari aspek teknis, transportasi komoditas hortikultura harus mempertimbangkan beberapa faktor utama, yaitu jenis komoditas, metode pengemasan, sistem transportasi, serta jarak dan distribusi. Kemasan yang baik harus mampu melindungi produk dari tekanan mekanis, getaran, dan benturan selama perjalanan. Penggunaan bahan kemasan seperti karton bergelombang atau plastik berlubang dapat membantu menjaga stabilitas produk dan sirkulasi udara (Ihsan & Derosya, 2024)

Selain itu, waktu transportasi merupakan faktor yang sangat menentukan kualitas akhir produk. Semakin cepat produk sampai ke konsumen, semakin kecil kemungkinan terjadinya kerusakan. Oleh karena itu, sistem transportasi modern mengutamakan efisiensi waktu melalui optimalisasi rute distribusi dan penggunaan kendaraan yang sesuai. Hal

ini menunjukkan bahwa prinsip transportasi tidak hanya bersifat teknis, tetapi juga melibatkan aspek manajemen logistik (Hoffmann et al., 2025)

Dalam praktiknya, mahasiswa diharapkan mampu menganalisis hubungan antara faktor fisiologis (respirasi, transpirasi) dan faktor lingkungan (suhu, kelembaban) dalam menentukan metode transportasi yang tepat untuk berbagai komoditas hortikultura

10.2 Sistem Rantai Dingin (*Cold Chain*)

Sistem rantai dingin merupakan teknologi utama dalam mempertahankan kualitas produk hortikultura selama distribusi. Prinsip dasar dari sistem ini adalah menjaga suhu produk tetap rendah secara konsisten sejak panen hingga konsumsi. Penurunan suhu akan memperlambat aktivitas enzimatik, respirasi, dan pertumbuhan mikroorganisme, sehingga umur simpan produk dapat diperpanjang (Sugiarto et al., 2024)

Tahapan pertama dalam sistem rantai dingin adalah pendinginan awal (*pre-cooling*), yaitu proses menghilangkan panas lapang yang terkandung dalam produk setelah panen. Metode *pre-cooling* meliputi *hydro-cooling*, *vacuum cooling*, dan *forced-air cooling*. Pemilihan metode tergantung pada jenis komoditas dan skala produksi. Tahap ini sangat penting karena menentukan keberhasilan tahapan berikutnya dalam rantai dingin (Abdella et al., 2021)

Setelah *pre-cooling*, produk disimpan dalam fasilitas penyimpanan dingin dan suhu kelembaban yang dikontrol. Setiap komoditas memiliki suhu optimum penyimpanan yang berbeda, sehingga diperlukan pemahaman fisiologi produk untuk menentukan kondisi yang tepat. Kesalahan dalam pengaturan suhu dapat menyebabkan *chilling injury* atau kerusakan akibat suhu terlalu rendah (Hoffmann et al., 2025)

Transportasi pendingin (*refrigerated transport*) merupakan tahap berikutnya dalam rantai dingin. Kendaraan berpendingin dilengkapi dengan sistem kontrol suhu yang memungkinkan produk tetap berada dalam kondisi optimal selama perjalanan. Komoditas suhu harus diaga tanpa fluktuasi yang signifikan, karena perubahan suhu dapat menyebabkan kondensasi dan pertumbuhan mikroorganisme (Seth et al., 2025)

Perkembangan teknologi digital telah memungkinkan integrasi sistem monitoring suhu berbasis sensor dan IoT. Sistem ini memberikan data *real-time* mengenai kondisi produk selama distribusi, sehingga memungkinkan pengambilan keputusan yang cepat dan tepat. Dalam konteks pembelajaran, mahasiswa diharapkan mampu mengevaluasi efektivitas sistem rantai dingin dan mengidentifikasi titik kritis yang berpotensi menyebabkan kerusakan produk (Kilelu et al., 2024)

10.3 Distribusi Produk Hortikultura

Distribusi produk hortikultura merupakan bagian dari sistem rantai pasok yang berfungsi menyalurkan produk dari produsen ke konsumen. Sistem distribusi mencakup berbagai aktivitas seperti pengumpulan, penyimpanan, transportasi, dan pemasaran. Efisiensi distribusi sangat berpengaruh terhadap kualitas produk dan nilai ekonomi yang diperoleh (Putri et al., 2020)

Rantai pasok hortikultura melibatkan berbagai pelaku, mulai dari petani, pedagang pengumpul, distributor, hingga pengecer. Setiap pelaku memiliki peran dalam menjaga kualitas produk selama proses distribusi. Koordinasi antar pelaku sangat penting untuk memastikan aliran produk berjalan lancar dan tepat waktu (Manurung et al., 2023)

Diwilayah tropika, distribusi hortikultura sering menghadapi kendala seperti infrastruktur transportasi yang terbatas, jarak distribusi yang jauh, serta kondisi lingkungan yang tidak mendukung. Hal ini menyebabkan peningkatan risiko kerusakan produk dan kehilangan hasil. Oleh karena itu, diperlukan strategi distribusi yang adaptif dan efisien (Kilelu et al., 2024)

Pendekatan manajemen rantai pasok modern menekankan integrasi antara produksi, distribusi, dan pemasaran. Sistem ini memungkinkan perencanaan yang lebih baik dalam pengelolaan persediaan dan distribusi produk. Selain itu, penggunaan teknologi informasi dapat meningkatkan transparansi dan efisiensi dalam rantai pasok (Putri et al., 2020)

Dalam konteks kompetensi pembelajaran, mahasiswa diharapkan mampu menganalisis sistem distribusi hortikultura, mengidentifikasi hambatan yang ada, serta merancang solusi untuk meningkatkan efisiensi distribusi.

10.4 Manajemen Logistik Pascapanen

Manajemen logistik pascapanen merupakan sistem pengelolaan aliran produk hortikultura dari tahap panen hingga ke konsumen. Logistik mencakup pengelolaan transportasi, penyimpanan, distribusi, serta informasi yang terkait dengan aliran produk. Tujuan utama dari manajemen logistik adalah menjaga kualitas produk, mengurangi kehilangan hasil, dan meningkatkan efisiensi sistem distribusi (Manurung et al., 2023)

Integrasi dalam sistem logistik sangat penting untuk memastikan kelancaran aliran produk. Setiap tahapan dalam rantai pasok harus terkoordinasi dengan baik agar tidak terjadi penumpukan atau kekurangan produk di suatu titik distribusi. Integrasi ini juga membantu mengurangi biaya operasional dan meningkatkan efisiensi (Putri et al., 2020)

Manajemen logistik juga melibatkan pengelolaan risiko, seperti kerusakan produk, keterlambatan pengiriman, dan fluktuasi permintaan pasar. Pendekatan berbasis data dan teknologi sangat diperlukan untuk mengantisipasi risiko tersebut. Penggunaan sistem informasi logistik memungkinkan perencanaan yang lebih akurat dan respons yang lebih cepat terhadap perubahan kondisi (Seth et al., 2025)

Teknologi modern seperti big data, *artificial intelligence* (AI), dan sistem pelacakan (*tracking system*) telah meningkatkan efisiensi logistik pascapanen. Teknologi ini memungkinkan pemantauan kondisi produk secara *real-time* serta analisis data untuk meningkatkan pengambilan keputusan. Hal ini sangat penting dalam menghadapi tantangan global dalam sistem distribusi pangan (Hoffmann et al., 2025)

Selain aspek teknologi, faktor sumber daya manusia juga sangat penting dalam manajemen logistik. Keterampilan dalam penanganan produk hortikultura, mulai dari panen hingga distribusi, sangat menentukan kualitas produk akhir. Oleh karena itu, peningkatan kapasitas SDM menjadi bagian penting dalam sistem logistik pascapanen (Ihsan & Derosya, 2024)

Dalam pembelajaran, mahasiswa diharapkan mampu merancang sistem logistik pascapanen yang efisien dan berkelanjutan, dengan mempertimbangkan aspek teknis, ekonomi, dan lingkungan.

RANGKUMAN

Bab ini membahas pentingnya transportasi dan distribusi dalam menjaga kualitas produk hortikultura pascapanen, khususnya di wilayah tropika lembab. Produk hortikultura bersifat mudah rusak karena masih mengalami proses fisiologis seperti respirasi dan transpirasi, sehingga memerlukan penanganan khusus selama transportasi.

Prinsip utama transportasi komoditas segar meliputi pengendalian suhu, kelembaban, ventilasi, serta perlindungan dari kerusakan mekanis. Selain itu, waktu distribusi harus diminimalkan untuk mengurangi penurunan kualitas produk.

Sistem rantai dingin (*cold chain*) menjadi teknologi kunci dalam mempertahankan mutu produk. Sistem ini mencakup proses *pre-cooling*, penyimpanan dingin, transportasi berpendingin, dan distribusi dengan kontrol suhu yang konsisten. Kegagalan dalam menjaga suhu dapat menyebabkan kerusakan permanen pada produk.

Distribusi produk hortikultura melibatkan berbagai pelaku dalam rantai pasok, mulai dari petani hingga konsumen. Efisiensi distribusi sangat dipengaruhi oleh koordinasi antar pelaku, infrastruktur, serta penggunaan teknologi.

Manajemen logistik pascapanen bertujuan untuk mengintegrasikan seluruh proses distribusi agar lebih efisien, mengurangi kehilangan hasil, serta menjaga kualitas produk. Penggunaan teknologi seperti IoT, big data, dan sistem pelacakan menjadi faktor penting dalam meningkatkan efisiensi logistik modern.

TES FORMATIF

1. Jelaskan hubungan antara proses fisiologis (respirasi dan transpirasi) dengan penurunan kualitas produk hortikultura selama transportasi!
2. Mengapa pengendalian suhu menjadi faktor paling penting dalam sistem transportasi dan distribusi produk hortikultura? Jelaskan dengan contoh!
3. Uraikan tahapan dalam sistem rantai dingin (*cold chain*) dan jelaskan peran masing-masing tahapan tersebut!
4. Analisis faktor-faktor yang menyebabkan inefisiensi distribusi produk hortikultura di daerah tropika!
5. Jelaskan bagaimana teknologi modern (IoT, AI, *tracking system*) dapat meningkatkan efisiensi logistik pascapanen!

LATIHAN PROBLEM BASE LEARNING (PBL)

Kasus :

Seorang petani mangga di Kalimantan Timur mengalami kerugian besar karena sekitar 30% hasil panennya rusak saat sampai di pasar kota. Buah mengalami: Pelayuan, memar dan pembusukan lebih cepat. Distribusi dilakukan selama ± 2 hari menggunakan truk biasa tanpa pendingin. Buah hanya dikemas dalam karung tanpa ventilasi.

Tugas PBL:

1. Identifikasi Masalah
 - Apa saja penyebab utama kerusakan produk dan faktor fisiologis dan lingkungan apa yang terlibat?
2. Analisis Masalah
 - Jelaskan hubungan antara suhu, kelembaban, metode pengemasan, dan waktu transportasi dengan kerusakan buah!
3. Alternatif Solusi

- Ajukan minimal 3 solusi perbaikan, misalnya dalam hal perbaikan kemasan, penggunaan rantai dingin dan optimalisasi distribusi
- 4. Rekomendasi Terbaik
 - Pilih solusi terbaik dan jelaskan alasan ilmiahnya!
- 5. Desain sistem
 - Rancang sistem distribusi ideal untuk mangga tersebut mencakup dari jenis kemasan, metode transportasi, suhu penyimpanan dan waktu distribusi!

DAFTAR PUSTAKA

- Abdella, A., Brecht, J. K., & Uysal, I. (2021). A Time-Temperature Dataset for the Strawberry Cold Chain Across Multiple Shipments and Locations. *Computers and Electronics in Agriculture*.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110477>
- Hoffmann, T. G., de Souza, C. K., Sonawane, A. D., Praeger, U., Büchele, F., Neuwald, D. A., Jedermann, R., Linke, M., Sturm, B., & Mahajan, P. V. (2025). Challenges and future perspectives in postharvest cold storage: technological review on sustainable and efficient cold storage of fresh produce. In *Food Research International* (Vol. 221). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.117406>
- Ihsan, T., & Derosya, V. (2024). Tinjauan Strategi Pengemasan Buah dan Sayur dalam Memerangi Food Loss dalam Rantai Pasokan Pascapanen di Indonesia. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 22(4), 1078–1087.
<https://doi.org/10.14710/jil.22.4.1078-1087>
- Kilelu, C. W., Musyoka, D. M., & Kalele, D. N. (2024). Unraveling smallholder food loss and value for sustainable cold chain investments: a case of horticultural value chains in Kiambu County, Kenya. *Frontiers in Horticulture*, 3.
<https://doi.org/10.3389/fhort.2024.1474056>
- Manurung, A., Timisela, N. R., & Tuhumury, M. T. F. (2023). Manajemen Rantai Pasok Agroindustri Pala di Desa Morella Kecamatan Leihitu Kabupaten Maluku Tengah. *Jurnal Agrosilvopasture-Tech*, 2(2), 332–337.

<https://doi.org/10.30598/j.agrosilvopasture-tech.2023.2.2.332>

- Putri, F. paradika, Marimin, & Indah Yuliasih. (2020). PENINGKATAN EFEKTIVITAS DAN EFISIENSI MANAJEMEN RANTAI PASOK AGROINDUSTRI BUAH: TINJAUAN LITERATUR DAN RISET SELANJUTNYA. *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 338–354. <https://doi.org/10.24961/j.tek.ind.pert.2020.30.3.338>
- Seth, C., Pirnia, M., & Bookbinder, J. H. (2025). IoT-based Fresh Produce Supply Chain Under Uncertainty: An Adaptive Optimization Framework. *Computers & Industrial Engineering*. <http://arxiv.org/abs/2511.05920>
- Sugiarto, E., Kurniaty Ratoko, S., Yazid Bustommy, A., Kunci, K., Suplai, R., Dingin, R., & Hortikultura, P. (2024). Penerapan Sistem Rantai Dingin Dalam Penanganan Produk Hortikultura Untuk Menjaga Kualitas dan Kesegaran Produk Pada Agroindustri Tujuan Ekspor. *JITES*, 4(1). <https://jites.untara.ac.id/index.php/jites>

BAB 11

PASCAPANEN KOMODITAS TROIKA LEMBAB DI KALIMANTAN TIMUR

DESKRIPSI PEMBELAJARAN

Bab ini mengkaji secara mendalam karakteristik fisiologis, teknologi penanganan pascapanen, dan sistem distribusi komoditas tropika lembab yang spesifik di wilayah Kalimantan Timur. Mahasiswa akan memahami keunikan fisiologi pascapanen buah tropika endemik (Buah Naga, Pisang, Cempedak, Nanas, Rambutan, Lai/Durian Kaltim), sayuran tropika, rempah dan tanaman obat khas (Kratom/Mitragyna speciosa, Jahe, Lada), serta sereal tropika dalam konteks ekosistem tropis lembab Kalimantan. Perspektif pengembangan sistem distribusi menuju kawasan IKN (Ibu Kota Nusantara) menjadi konteks strategis yang relevan

KOMPETENSI PEMBELAJARAN

Setelah mengikuti bab 10 Pascapanen Komoditas Tropika Lembab di Kalimantan Timur ini diharapkan mahasiswa dan mahasiswi memiliki pengetahuan dan kemampuan:

1. Mendeskripsikan karakteristik fisiologi pascapanen komoditas buah, sayuran, rempah, dan sereal tropika endemik Kalimantan Timur.

2. Menganalisis faktor-faktor fisiologi dan biokimia yang memengaruhi umur simpan dan mutu komoditas tropika lembab.
3. Merancang teknologi penanganan pascapanen yang tepat dan adaptif untuk kondisi iklim tropis lembab Kalimantan Timur.
4. Mengidentifikasi potensi dan tantangan pascapanen tanaman obat endemik Kalimantan Timur, khususnya Kratom (*Mitragyna speciosa*).
5. Mengevaluasi sistem distribusi produk tropika dan merancang rantai pasok yang efisien untuk wilayah Kalimantan Timur.
6. Mengintegrasikan teknologi digital dan inovasi pascapanen dalam mendukung ketahanan pangan dan pengembangan kawasan IKN.

PETA KONSEP PEMBELAJARAN

PASCAPANEN KOMODITAS TROPIKA LEMBAB DI KALIMANTAN TIMUR



Buah & Sayuran Tropika	Rempah & Sereal	Sistem Distribusi
• Buah Naga, Pisang, Cempedak • Nanas, Rambutan, Lai • Penanganan & Mutu	• Kratom, Jahe, Lada • Padi, Jagung, Sorghum • Standardisasi & Nilai Tambah	• Infrastruktur & Akses Pasar • Rantai Pasok Kaltim • Digitalisasi & IKN

11.1 Pascapanen Buah Tropika Kalimantan Timur

11.1.1 Konteks Fisiologi Buah Tropika

Buah tropika Kalimantan Timur dicirikan oleh laju respirasi yang tinggi, produksi etilen yang aktif pada buah klimakterik, kandungan air yang tinggi, dan kepekaan terhadap perubahan suhu (*chilling injury*). Sebagian besar buah tropika merupakan buah klimakterik mengalami lonjakan laju respirasi dan produksi etilen yang masif pada fase pematangan sehingga pengendalian etilen menjadi kunci utama perpanjangan umur simpan (*Majeed & Waseem, 2022; Yahia, 2009*)

Kondisi pascapanen di Kalimantan Timur menghadapi tantangan ganda: suhu dan kelembaban ambient yang tinggi mempercepat deteriorasi, sementara infrastruktur cold chain yang belum merata mempersulit pendinginan segera setelah panen. Hal ini menyebabkan kehilangan pascapanen buah tropika di Kaltim diperkirakan mencapai 25–40%, jauh di atas standar negara maju yang berkisar 5–10% (*Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2019; Kitinoja & Alhassan, 2012a*)

11.1.2 Buah Naga (*Hylocereus undatus*/*Selenicereus undatus*)

Buah naga merupakan tanaman kaktus yang berasal dari Amerika Tengah namun kini banyak dibudidayakan di Kalimantan Timur, khususnya di Kabupaten Kutai Kartanegara dan Penajam Paser Utara. Buah naga termasuk buah non-klimakterik dengan laju respirasi sedang (20–40 mg CO₂/kg/jam pada 20°C) dan produksi etilen sangat

rendah ($< 0,01 \mu\text{L/kg/jam}$). Implikasinya adalah buah naga tidak mengalami pematangan pasca panen yang dramatis, namun rentan terhadap kehilangan air dan kerusakan mekanis (Phebe, 2020; Shah et al., 2023)

Penanganan pascapanen buah naga yang kritis meliputi: (1) pemanenan pada indeks kematangan tepat (warna kulit merah penuh, hari ke-28–32 setelah antesis), (2) pendinginan cepat ke suhu $10\text{--}13^{\circ}\text{C}$ (suhu $< 5^{\circ}\text{C}$ menyebabkan chilling injury berupa pencokelatan sisik), (3) penyimpanan pada RH 90–95% untuk menekan transpirasi, dan (4) pengemasan individual dengan foam net untuk mencegah kerusakan mekanis. Perlakuan 1-MCP pada konsentrasi $1 \mu\text{L/L}$ selama 12 jam terbukti memperpanjang umur simpan buah naga hingga 28 hari pada suhu 10°C (Phebe, 2020; Shah et al., 2023)

11.1.3 Pisang (*Musa acuminata* dan *Musa balbisiana*)

Pisang merupakan komoditas buah terpenting di Kalimantan Timur, dengan berbagai kultivar lokal bernilai tinggi seperti Pisang Kepok, Pisang Awak, dan Pisang Batu. Pisang adalah buah klimakterik klasik dengan pola respirasi dan produksi etilen yang khas: laju respirasi meningkat 3–5 kali lipat selama klimakterik, diikuti peningkatan produksi etilen eksponensial yang memicu perubahan warna, tekstur, dan cita rasa (Majeed & Waseem, 2022; Yahia, 2009)

Pisang sangat sensitif terhadap suhu dingin (chilling injury pada suhu $< 13^{\circ}\text{C}$) yang menyebabkan penghitaman kulit, gagal matang, dan penurunan rasa manis. Strategi pascapanen pisang meliputi: panen pada indeks 75–85% perkembangan (3/4 penuh), delateksasi dengan air

mengalir, perlakuan fungisida thiabendazole atau asam salisilat untuk menekan penyakit Anthracnose (*Colletotrichum musae*), penyimpanan pada 13–15°C dan RH 90–95%. Penggunaan 1-MCP sebelum penyimpanan dapat menunda klimakterik 7–14 hari tambahan (*Dong et al., 2016; Majeed & Waseem, 2022*)

11.1.4 Cempedak (*Artocarpus integer*)

Cempedak adalah buah khas Borneo yang memiliki nilai ekonomi tinggi secara lokal namun belum banyak dikembangkan secara komersial nasional. Buah cempedak termasuk buah klimakterik komposit (multiple fruit) yang memiliki laju respirasi sangat tinggi (80–120 mg CO₂/kg/jam pada 25°C) akibat massa buah yang besar dan proses pematangan yang cepat dan serentak. Masa simpan buah cempedak utuh pada suhu ambient hanya 3–5 hari (*Pui et al., 2022; Yahia, 2009*)

Teknologi pascapanen cempedak difokuskan pada: (1) panen pada stadia pre-klimakterik (aroma mulai tercium, warna kulit berubah dari hijau ke kuning-cokelat), (2) perlakuan asam oksalat atau asam sitrat untuk menekan pencokelatan enzimatis daging buah yang dipotong, (3) penyimpanan pada suhu 13–16°C dan RH 85–90% untuk buah utuh, dan (4) pengolahan menjadi produk olahan (keripik, selai, dodol) sebagai strategi nilai tambah untuk mengatasi shelf life yang sangat pendek. Pengembangan produk fresh-cut cempedak dalam kemasan MAP menjadi peluang inovasi yang menjanjikan (*Mahajan et al., 2014; Pui et al., 2022*)

11.1.5 Nanas (*Ananas comosus*)

Nanas Kalimantan Timur, terutama kultivar lokal 'Nanas Mahakam' dari Loa Janan, dikenal memiliki rasa lebih manis dan kandungan air lebih rendah dibanding nanas Jawa. Nanas termasuk buah non-klimakterik; pematangannya sangat dipengaruhi oleh suhu selama pertumbuhan dan tidak dapat diinduksi oleh etilen eksogen setelah dipanen. Pemilihan waktu panen yang tepat berdasarkan indeks kematangan visual (proporsi kulit berwarna kuning $\geq 50\%$) sangat kritis karena nanas yang dipanen terlalu dini tidak akan mencapai kualitas optimal (*Majeed & Waseem, 2022; Yahia, 2009*)

Suhu penyimpanan optimal nanas adalah 7–10°C (nanas kuning matang) hingga 10–13°C (nanas setengah matang). Penyimpanan di bawah 7°C menyebabkan chilling injury berupa pencokelatan internal dan tekstur berair. Pengemasan dalam karton berventilasi dengan lapisan foam pad mengurangi kerusakan mekanis selama transportasi jarak jauh ke pasar Balikpapan dan Samarinda (*Kitinoja & Alhassan, 2012a; Majeed & Waseem, 2022*)

11.1.6 Rambutan dan Buah Khas Kalimantan Timur Lainnya

Rambutan (*Nephelium lappaceum*) adalah komoditas ekspor potensial Kalimantan Timur yang memiliki permasalahan pascapanen serius berupa pencokelatan dan kekeringan rambut (spintern browning) yang terjadi sangat cepat (2–3 hari pada suhu ambient). Browning rambut dipicu oleh oksidasi senyawa fenolik oleh enzim polifenol oksidase (PPO) yang dipercepat oleh kehilangan air.

Perlakuan sulfit (SO_2) atau asam askorbat untuk menghambat PPO, dikombinasikan dengan penyimpanan pada 10°C dan RH 95%, dapat memperpanjang penampilan komersial rambutan hingga 14–21 hari (*Yahia, 2009*)

Lai atau Durian Kalimantan (*Durio kutejensis*) merupakan komoditas endemik Borneo yang sangat diminati secara lokal namun distribusinya terbatas akibat aroma kuat dan daya simpan pendek (2–3 hari pada suhu ambient). Lai memiliki karakteristik klimakterik dengan produksi etilen dan respirasi tinggi. Penelitian terkini menunjukkan penyimpanan pada 10°C dalam kemasan MA dengan O_2 5% dan CO_2 10% dapat memperpanjang umur simpan aril lai hingga 14–18 hari sambil mempertahankan flavor khas (*Yahia, 2009*)

11.2 Pascapanen Sayuran Tropika

11.2.1 Karakteristik Umum Sayuran Tropika Kalimantan Timur

Sayuran tropika di Kalimantan Timur dihasilkan utamanya di sentra produksi seperti Tenggarong (Kutai Kartanegara), Long Ikis (PPU), dan Lempake (Samarinda). Dibandingkan buah, sayuran umumnya memiliki laju respirasi lebih tinggi dan masa simpan lebih pendek karena tingginya kandungan air (85–95%) dan luas permukaan yang besar. Transpirasi yang tidak terkendali di iklim Kaltim (suhu $28\text{--}32^\circ\text{C}$, RH 80–90%) menjadi faktor pembatas utama umur simpan sayuran (*Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2019; Majeed & Waseem, 2022; Yahia, 2009*)

11.2.2 Sayuran Berdaun (Kangkung, Bayam, Sawi)

Kangkung (*Ipomoea aquatica*) dan bayam (*Amaranthus tricolor*) adalah sayuran paling banyak dikonsumsi di Kalimantan Timur. Sayuran berdaun memiliki laju respirasi tertinggi di antara komoditas hortikultura (80–200 mg CO₂/kg/jam pada 20°C) dan dapat kehilangan air hingga 10% dalam waktu 2–3 jam di kondisi ambient Kaltim tanpa pendinginan. Kelayuan (*wilting*) menjadi kerusakan fisik utama yang menurunkan nilai jual secara drastis (*Majeed & Waseem, 2022; Yahia, 2009*)

Penanganan pascapanen sayuran berdaun yang kritis meliputi: (1) pemanenan di pagi hari (06:00–08:00) untuk menghindari suhu lapang tinggi, (2) hydrocooling atau pencelupan dalam air dingin sesegera mungkin setelah panen, (3) pengemasan dengan film perforasi mikro dalam kemasan MA, (4) penyimpanan pada suhu 0–2°C dan RH 98–100%, dan (5) distribusi menggunakan kendaraan berpendingin. Di tingkat pasar tradisional Kaltim, penggunaan keranjang bambu basah dan penempatan di area teduh merupakan adaptasi teknologi sederhana yang umum dipraktikkan (*Kitinoja & Alhassan, 2012a; Yahia, 2009*)

11.2.3 Sayuran Buah dan Polong

Terung ungu (*Solanum melongena*) dan kacang panjang (*Vigna unguiculata* ssp. *sesquipedalis*) merupakan sayuran buah dan polong yang banyak dibudidayakan di Kaltim. Terung memiliki suhu penyimpanan optimal 10–12°C; suhu di bawah 10°C menyebabkan chilling injury berupa pitting dan pencokelatan biji. Penyimpanan pada 10°C dan RH 90–

95% memperpanjang umur simpan terung hingga 14–21 hari, dibandingkan hanya 5–7 hari pada suhu ambient (*Yahia et al., 2019; Brecht et al., 2016*)

Kacang panjang sangat cepat mengalami penurunan kualitas berupa menguningnya polong (chlorophyll breakdown) dan pengerasan (lignification) biji akibat proses pematangan yang berlanjut pasca panen. Penyimpanan pada suhu 4–7°C memperlambat proses ini, namun suhu di bawah 4°C dapat menyebabkan chilling injury. Pengemasan dengan atmosfer termodifikasi (O₂ 2–5%, CO₂ 5–10%) secara signifikan memperlambat chlorophyll breakdown dan mempertahankan warna hijau polong (*Majeed & Waseem, 2022; Yahia, 2009*)

11.2.4 Labu-Labuan (*Cucurbitaceae*)

Labu siam (*Sechium edule*) dan berbagai jenis labu lainnya merupakan komoditas sayuran penting di Kaltim, terutama sebagai sumber karbohidrat alternatif. Labu memiliki laju respirasi relatif rendah dan umur simpan lebih panjang dibanding sayuran berdaun (4–8 minggu pada kondisi optimal). Proses penyembuhan luka (curing) pada labu yang mengalami kerusakan mekanis panen penting dilakukan pada suhu 25–30°C selama 5–7 hari untuk membentuk lapisan gabus pelindung (periderm) yang mencegah masuknya patogen (*Majeed & Waseem, 2022; Yahia, 2009*)

11.3 Pascapanen Rempah dan Tanaman Obat

11.3.1 Karakteristik Khusus Pascapanen Rempah

Rempah dan tanaman obat memiliki karakteristik pascapanen yang unik dibanding buah dan sayuran: tujuan utama pascapanen adalah mempertahankan kandungan senyawa bioaktif (minyak atsiri, alkaloid, flavonoid, terpenoid) yang merupakan sumber nilai ekonomi utamanya. Proses pengeringan, bukan pendinginan, menjadi teknologi pascapanen dominan untuk rempah karena kandungan air yang harus diturunkan dari 70–90% (segar) menjadi $\leq 12\text{--}14\%$ (kering) untuk mencegah pertumbuhan jamur dan menjamin stabilitas kimia selama penyimpanan (Ndraha *et al.*, 2018)

11.3.2 Kratom (*Mitragyna speciosa* Korth.)

Kratom atau Purik adalah tanaman pohon asli hutan Kalimantan yang daun-daunnya mengandung senyawa alkaloid aktif, terutama mitraginin dan 7-hidroksimitraginin. Kalimantan Timur, bersama Kalimantan Barat dan Tengah, merupakan daerah penghasil kratom utama di Indonesia. Daun kratom segar sangat rentan deteriorasi cepat akibat aktivitas enzim yang tinggi dan kandungan air tinggi (75–80%). Setelah pemetikan, daun harus segera diproses untuk mencegah kehilangan alkaloid dan pertumbuhan kapang. (Vásquez-Ocmín *et al.*, 2018)

Teknologi pascapanen kratom yang optimal meliputi beberapa tahapan kritis: (1) Pemetikan selektif daun dewasa (daun ke-4 hingga ke-8 dari pucuk) yang mengandung alkaloid tertinggi; (2) Pengeringan segera pada suhu 40–50°C menggunakan pengering mekanis atau pengeringan di

tempat teduh (bukan di bawah sinar matahari langsung, karena UV menurunkan kadar mitraginin); (3) Penggilingan menjadi serbuk halus (≤ 60 mesh) setelah kadar air mencapai $\leq 12\%$; (4) Pengemasan vakum atau dalam atmosfer N_2 untuk mencegah oksidasi alkaloid; (5) Penyimpanan dalam wadah gelap kedap cahaya (Vásquez-Ocmín et al., 2018)

11.3.3 Jahe (*Zingiber officinale*) dan Kunyit (*Curcuma longa*)

Jahe dan kunyit merupakan rimpang (rhizome) yang menjadi komoditas rempah utama Kalimantan Timur dengan luas pertanaman terus berkembang. Rimpang segar memiliki kandungan air 80–85% dan laju respirasi sedang. Permasalahan pascapanen utama rimpang adalah susut bobot akibat transpirasi, kerusakan mekanis yang memicu busuk, serta pertumbuhan tunas yang tidak dikehendaki selama penyimpanan (Nina Sari et al., 2025)

Untuk penyimpanan jangka pendek rimpang segar (1–4 minggu), suhu 12–15°C dan RH 90–95% optimal. Untuk penyimpanan jangka panjang, pengeringan menjadi simplisia (kadar air $\leq 12\%$) merupakan pilihan utama. Kandungan gingerol pada jahe dan kurkumin pada kunyit—senyawa bioaktif bernilai tinggi—harus dipantau sebagai indikator mutu selama proses pengeringan dan penyimpanan. Pengeringan pada suhu $> 60^\circ\text{C}$ menyebabkan degradasi gingerol menjadi shogaol dan zingerone yang memiliki profil aktivitas biologis berbeda (Ndraha et al., 2018)

11.3.4 Lada Hitam (*Piper nigrum*) dan Tengkawang (*Shorea stenoptera*)

Lada hitam Kalimantan Timur dihasilkan terutama dari Kabupaten Kutai Barat dan Mahakam Ulu. Pascapanen lada hitam melibatkan proses fermentasi terkontrol: lada buah segar (lada hijau) difermentasi selama 3–7 hari untuk melepaskan kulit, kemudian dikeringkan hingga kadar air $\leq 12\%$ untuk menghasilkan lada hitam kering. Kandungan piperin—senyawa aktif pemberi rasa pedas—harus dipertahankan minimal 5% (standar mutu ekspor ASTA). Pengeringan dengan energi surya merupakan praktik umum, namun pengeringan mekanis memberikan konsistensi mutu lebih baik (*Nina Sari et al., 2025*)

Tengkawang (*Shorea stenoptera*) adalah pohon endemik Borneo yang biji-bijinya mengandung lemak (tengkawang fat/illipe butter) berkualitas tinggi—pengganti mentega kakao dalam industri konfeksi premium. Pascapanen biji tengkawang meliputi: pemanenan biji masak yang jatuh di lantai hutan, pengeringan segera untuk mencegah pertumbuhan jamur dan ketengikan (oksidasi asam lemak), serta penyimpanan kering pada suhu $< 20^{\circ}\text{C}$. Kandungan asam stearat dan asam oleat dalam tengkawang fat dapat mencapai 55–65% dan 30–35%, menjadikannya komoditas ekspor bernilai sangat tinggi.

11.4 Pascapanen Serelia Tropika

11.4.1 Padi (*Oryza sativa*) di Kalimantan Timur

Produksi padi di Kalimantan Timur terpusat di dataran aluvial Sungai Mahakam (Kabupaten Kutai Kartanegara) dan beberapa wilayah PPU. Kaltim memiliki tradisi padi lokal yang kaya (padi Siam, padi Seratus Malam, dan padi Logam dari sistem pertanian dayak) yang memiliki karakteristik pascapanen unik. Padi Kaltim umumnya ditanam satu kali setahun (padi gogo di lahan kering) dengan kadar air panen 22–26%, lebih tinggi dari standar optimal 20–22% akibat curah hujan tinggi yang menghambat pengeringan di lapang.

Tahapan pascapanen padi yang kritis di Kaltim meliputi: (1) Pemanenan tepat waktu untuk menghindari kehilangan akibat serangan burung, tikus, dan patogen bulir; (2) Perontokan (threshing) sesegera mungkin untuk menekan susut panen yang dapat mencapai 5–15% akibat keterlambatan; (3) Pengeringan gabah dari kadar air 22–26% (saat panen) ke $\leq 14\%$ (standar penyimpanan aman) menggunakan pengering lantai jemur atau pengering mekanis (flat-bed dryer, LSU dryer); (4) Penyimpanan gabah kering dalam gudang berventilasi baik pada suhu $< 30^{\circ}\text{C}$ dan $\text{RH} < 70\%$ untuk mencegah pertumbuhan aflatoksin (*Aspergillus flavus*) (*Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)*, 2019)

Tabel 11. 1. Parameter kadar air kritis serealia tropika Kalimantan Timur (Sumber: (Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2019)

Komoditas	Kadar Air Panen (%)	Target KA Penyimpanan (%)	Umur Simpan Aman
Padi/Gabah	22–26	≤ 14	12–18 bulan
Jagung Pipilan	25–35	≤ 14	6–12 bulan
Sorghum	18–25	≤ 13	12 bulan
Ubi Kayu (chip)	60–70 (segar)	≤ 14 (kering)	6–12 bulan

11.4.2 Jagung (*Zea mays*) dan Sorghum (*Sorghum bicolor*)

Jagung mulai dikembangkan secara serius di Kalimantan Timur sebagai bahan baku pakan ternak, mendukung industri peternakan yang berkembang di PPU dan Kutai. Permasalahan pascapanen jagung di Kaltim adalah tingginya kadar air panen (25–35%) akibat curah hujan tinggi yang menghambat pengeringan alami di lapang. Kondisi ini menciptakan risiko kontaminasi aflatoksin yang sangat tinggi, mengingat *Aspergillus flavus* tumbuh optimal pada kadar air $> 18\%$ dan suhu 25–35°C (Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2019)

Pengeringan mekanis jagung menggunakan batch dryer atau continuous flow dryer dengan suhu udara pengering

60°C (benih) hingga 80°C (pakan) menjadi solusi kritis. Sorghum sebagai tanaman sereal toleran kering mulai dikembangkan di lahan marginal Kaltim sebagai alternatif bahan pangan dan pakan. Pascapanen sorghum relatif lebih mudah karena kadar tanin tinggi pada lapisan perikarpnya memberikan ketahanan alami terhadap serangan jamur selama penyimpanan (*Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2019*)

11.5 Sistem Distribusi Produk Tropika Kalimantan Timur

11.5.1 Karakteristik Rantai Pasok Produk Tropika Kaltim

Sistem distribusi produk pertanian di Kalimantan Timur memiliki kekhasan yang sangat dipengaruhi oleh kondisi geografis: topografi berbukit, jaringan sungai yang luas, wilayah pedalaman yang terisolasi, dan konsentrasi pasar di kota-kota pesisir (Balikpapan, Samarinda, Bontang). Rantai pasok konvensional produk tropika Kaltim umumnya melibatkan 4–6 pelaku antara: petani → pengepul desa → pedagang besar kecamatan → distributor kota → retailer → konsumen. Panjangnya rantai ini menyebabkan biaya transaksi tinggi, kehilangan pascapanen kumulatif besar, dan rendahnya bagian harga yang diterima petani (*Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2019; Shashi et al., 2018*)

Transportasi sungai menggunakan kapal kelotok dan speed boat masih menjadi sarana distribusi utama dari sentra produksi pedalaman (Kutai Barat, Mahakam Ulu) ke

kota-kota besar. Kondisi ini menciptakan tantangan cold chain yang sangat berat karena: (1) waktu tempuh panjang (6–24 jam) tanpa fasilitas pendinginan di atas kapal, (2) ketergantungan pada kondisi cuaca dan tinggi air sungai, dan (3) terbatasnya infrastruktur bongkar muat di desa-desa terpencil (*Ndraha et al., 2018*)

11.5.2 Infrastruktur Cold Chain dan Peluang Peningkatan

Cold chain Kalimantan Timur masih sangat terbatas dibandingkan kebutuhan. Fasilitas cold storage terpusat di Balikpapan dan Samarinda, sementara wilayah produksi di pedalaman hampir tidak memiliki fasilitas pendinginan. Teknologi Zero Energy Cool Chamber (ZECC) berbasis bahan lokal (bambu, pasir basah) merupakan solusi pra-pendinginan murah yang telah dipromosikan oleh FAO untuk negara berkembang, termasuk sentra produksi terpencil di Kaltim. Solar-powered cold storage skala kecil (1–5 ton) mulai diperkenalkan melalui program pemerintah sebagai solusi energi mandiri di daerah terpencil (*Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2019; Kitinoja & Alhassan, 2012a; Ndraha et al., 2018*)

11.5.3 Dampak Pembangunan IKN terhadap Sistem Distribusi

Pembangunan Ibu Kota Nusantara (IKN) di wilayah PPU dan Kutai Kartanegara menciptakan peluang dan tantangan baru bagi sistem distribusi produk pertanian Kaltim. Proyeksi kebutuhan pangan IKN yang besar (menargetkan 1,5–2 juta penduduk) menciptakan pasar baru yang masif dan berdekatan dengan sentra produksi. Hal ini mendorong

perlunya modernisasi sistem distribusi: pengembangan infrastruktur jalan dan jembatan yang membuka aksesibilitas wilayah produksi, pembangunan pasar induk berpendingin (pasar agribisnis), dan pengembangan sistem distribusi berbasis platform digital (*Sun et al., 2017*)

Digitalisasi rantai pasok melalui platform e-commerce pertanian dan sistem informasi pasar berbasis smartphone membuka peluang disintermediasi (pengurangan perantara) yang dapat meningkatkan margin petani sekaligus menekan biaya distribusi. Teknologi IoT untuk pemantauan suhu real-time dalam kendaraan distribusi, dikombinasikan dengan sistem manajemen inventori berbasis cloud, menjadi kunci modernisasi cold chain Kaltim menuju standar distribusi produk segar berkualitas tinggi (*Badia-Melis et al., 2018; Shashi et al., 2018; Sun et al., 2017*)

11.5.4 Standarisasi Mutu dan Sertifikasi

Standarisasi mutu produk tropika Kaltim merupakan prasyarat untuk menembus pasar modern (supermarket, horeca) dan pasar ekspor. Penerapan standar SNI untuk komoditas buah dan sayuran, Good Agricultural Practices (GAP) untuk produksi, dan Good Handling Practices (GHP) untuk pascapanen perlu diperkuat melalui pendampingan dan pelatihan petani. Untuk produk organik dan produk spesifik indikasi geografis (GI) seperti Durian Lai Kaltim atau Nanas Mahakam, sertifikasi GI memberikan nilai tambah ekonomi yang signifikan (*Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2019; Sun et al., 2017*)

RANGKUMAN

Pascapanen komoditas tropika lembab di Kalimantan Timur memiliki karakteristik unik yang dipengaruhi oleh kondisi ekosistem tropis lembab Borneo. Berikut poin-poin kunci:

Iklim tropis lembab Kaltim (suhu 26–32°C, RH 80–90%) mempercepat deteriorasi pascapanen semua komoditas. Laju kehilangan pascapanen 25–40% jauh di atas standar negara maju, menegaskan urgensi teknologi pascapanen yang adaptif. Buah tropika Kaltim didominasi oleh buah klimakterik (pisang, cempedak, rambutan, lai) yang sensitif etilen, serta buah non-klimakterik (buah naga, nanas) yang sensitive chilling injury. Perlakuan 1-MCP, MAP, dan cold chain menjadi intervensi kunci perpanjangan umur simpan. Sayuran tropika Kaltim memerlukan penanganan segera pasca panen (hydrocooling, pengemasan MAP) untuk menekan respirasi dan transpirasi tinggi di kondisi tropis. Pemanenan pagi hari dan pendinginan cepat adalah praktik wajib.

Kratom (*Mitragyna speciosa*) sebagai tanaman obat endemik Kaltim bernilai ekonomi sangat tinggi. Pascapanen yang tepat (pengeringan terkontrol, penyimpanan gelap vakum) kritis untuk mempertahankan kandungan alkaloid (mitraginin) yang menjadi penentu nilai. Rempah Kaltim (jahe, kunyit, lada, tengkawang) memerlukan pengeringan segera sebagai teknologi pascapanen utama, dengan memperhatikan suhu pengeringan optimal untuk mempertahankan senyawa bioaktif. Sereal tropika Kaltim (padi, jagung) menghadapi tantangan kadar air panen tinggi akibat curah hujan tinggi, menciptakan risiko kontaminasi aflatoksin. Pengeringan mekanis menjadi investasi

infrastruktur pascapanen yang paling mendesak. Sistem distribusi Kaltim unik karena ketergantungan pada jalur sungai, fragmentasi rantai pasok panjang, dan cold chain terbatas. Pembangunan IKN membuka peluang modernisasi sistem distribusi melalui infrastruktur baru, digitalisasi rantai pasok, dan pengembangan pasar induk berpendingin.

TES FORMATIF

1. Jelaskan mengapa komoditas buah tropika Kalimantan Timur seperti Cempedak dan Lai (Durian Kaltim) memiliki umur simpan yang sangat pendek pada suhu ambient. Hubungkan jawaban Anda dengan konsep laju respirasi, produksi etilen, dan kandungan substrat pada buah klimakterik. Strategi teknologi apa yang paling feasible untuk memperpanjang umur simpan kedua buah tersebut di kondisi Kaltim?
2. Kratom (*Mitragyna speciosa*) merupakan tanaman obat endemik Kalimantan yang memiliki nilai ekonomi tinggi namun penanganan pascapanennya belum terstandardisasi. Uraikan secara komprehensif teknologi pascapanen kratom yang optimal untuk mempertahankan kandungan mitraginin, mencakup: tahapan proses, parameter teknis (suhu, kadar air), dan metode pengemasan yang tepat.
3. Bandingkan tantangan cold chain antara distribusi produk pertanian dari wilayah pedalaman Mahakam Ulu ke Samarinda (menggunakan jalur sungai) dengan distribusi dari Tenggarong ke Balikpapan (jalur darat). Identifikasi titik-titik kritis chain break

pada masing-masing jalur dan merekomendasikan solusi teknologi yang tepat dan terjangkau untuk kondisi Kalimantan Timur.

4. Pembangunan IKN di Penajam Paser Utara diproyeksikan membutuhkan pasokan produk pertanian segar dalam jumlah besar. Rancang sistem distribusi produk pertanian tropika dari sentra produksi Kaltim (Kutai Kartanegara, PPU) ke pasar IKN yang memenuhi standar mutu tinggi. Pertimbangkan aspek infrastruktur cold chain, standarisasi mutu, digitalisasi rantai pasok, dan keberlanjutan.
5. Sereal tropika Kaltim (padi dan jagung) menghadapi risiko kontaminasi aflatoxin yang serius akibat kondisi pengeringan yang tidak memadai. Jelaskan mekanisme toksikologi aflatoxin, kondisi lingkungan yang mendukung pertumbuhan *Aspergillus flavus*, dan teknologi pascapanen yang dapat mencegah kontaminasi aflatoxin secara efektif pada kondisi Kalimantan Timur.

Latihan Problem Based Learning (PBL)

KASUS 1 — Pengembangan Rantai Pasok Buah Naga Organik Kalimantan Timur Koperasi Tani Naga Borneo di Penajam Paser Utara memiliki kebun buah naga organik 50 ha dan berencana memasok buah naga segar ke supermarket premium di Jakarta dan ekspor ke Singapura. Transit ke Jakarta membutuhkan 2 hari (via kargo udara) atau 5 hari (via kapal), dan ke Singapura 3 hari (udara). Saat ini koperasi hanya memiliki gudang non-berpendingin dan tidak memiliki pengalaman ekspor.

Tugas kelompok (4–5 mahasiswa):

1. Tentukan indeks kematangan panen dan protokol penanganan pasca panen buah naga (pre-cooling, sortasi, grading, pengemasan) sesuai standar ekspor.
2. Bandingkan dua opsi pengiriman (udara vs kapal) dari aspek biaya, kualitas produk tiba, dan risiko. Hitung estimasi susut bobot masing-masing skenario.
3. Rancang sistem cold chain dari kebun PPU hingga konsumen Singapura, termasuk spesifikasi suhu, alat monitoring, dan protokol penanganan di setiap titik.
4. Identifikasi persyaratan sertifikasi dan standar mutu yang harus dipenuhi untuk pasar Singapura (HS Code, maksimum residu pestisida, sertifikasi organik).
5. Buat analisis kelayakan finansial sederhana: berapa harga jual minimum di Singapura agar koperasi mendapat keuntungan 20% di atas biaya produksi + distribusi?

DAFTAR PUSTAKA

- Badia-Melis, R., Mc Carthy, U., Ruiz-Garcia, L., Garcia-Hierro, J., & Robla Villalba, J. I. (2018). New trends in cold chain monitoring applications - A review. In *Food Control* (Vol. 86, pp. 170–182). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.11.022>
- Dong, F., Fu, X., Watanabe, N., Su, X., & Yang, Z. (2016). Recent advances in the emission and functions of plant vegetative volatiles. In *Molecules* (Vol. 21, Number 2). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/molecules21020124>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2019). *The state of food and agriculture. 2019, Moving forward on food loss and waste reduction*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/3/ca6030en/ca6030en.pdf>
- Kitinoja, L., & Alhassan, H. Y. (2012). Identification of appropriate postharvest technologies for improving market access and incomes for small horticultural farmers in Sub-Saharan Africa and South Asia. *Acta Horticulturae*. <https://doi.org/https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.934.1>
- Mahajan, P. V., Caleb, O. J., Singh, Z., Watkins, C. B., & Geyer, M. (2014). Postharvest treatments of fresh produce. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 372(2017). <https://doi.org/10.1098/rsta.2013.0309>
- Majeed, Y., & Waseem, M. (2022). Postharvest Handling Systems. In *Encyclopedia of Smart Agriculture*

- Technologies* (pp. 1–9). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-89123-7_125-1
- Ndraha, N., Hsiao, H. I., Vlajic, J., Yang, M. F., & Lin, H. T. V. (2018). Time-temperature abuse in the food cold chain: Review of issues, challenges, and recommendations. In *Food Control* (Vol. 89, pp. 12–21). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.01.027>
- Nina Sari, T. A., Nurfitriani, D., Mutamimah, R., Yudianto, & Wakhidah, A. Z. (2025). The Diversity of Medicinal Plant Used by Local Community in Borneo, Indonesia: A Review. *Jurnal Jamu Indonesia*, 10(1), 24–39. <https://doi.org/10.29244/jji.v10i1.324>
- Phebe, D. , C. M. K. , S. A. A. , L. O. M. , & J. O. A. (2020). Red pitaya (*Hylocereus polyrhizus*) fruit colour and betacyanin content depend on maturity. *International Food Research Journal*, 16(1), 233–241.
- Pui, L. P., Karim, R. B., Yusof, Y. A., Wong, C. W., & Ghazali, H. M. (2022). QUALITY CHANGES OF ‘CEMPEDAK’ (Artocarpus integer) FRUIT POWDER PACKAGED IN ALUMINUM-LAMINATED POLYETHYLENE POUCHES.’ *Carpathian Journal of Food Science and Technology*, 14(1), 192–206. <https://doi.org/10.34302/crpjfst/2022.14.1.16>
- Shah, K., Chen, J., Chen, J., & Qin, Y. (2023). Pitaya Nutrition, Biology, and Biotechnology: A Review. In *International Journal of Molecular Sciences* (Vol. 24, Number 18). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/ijms241813986>

- Shashi, Cerchione, R., Singh, R., Centobelli, P., & Shabani, A. (2018). Food cold chain management: From a structured literature review to a conceptual framework and research agenda. In *International Journal of Logistics Management* (Vol. 29, Number 3, pp. 792–821). Emerald Group Holdings Ltd. <https://doi.org/10.1108/IJLM-01-2017-0007>
- Sun, L. nan, Lu, L. xin, Qiu, X. lin, & Tang, Y. li. (2017). Development of low-density polyethylene antioxidant active films containing α -tocopherol loaded with MCM-41(Mobil Composition of Matter No. 41) mesoporous silica. *Food Control*, 71, 193–199. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.06.025>
- Vásquez-Ocmín, P., Cojean, S., Rengifo, E., Suyyagh-Albouz, S., Amasifuen Guerra, C. A., Pomel, S., Cabanillas, B., Mejía, K., Loiseau, P. M., Figadère, B., & Maciuk, A. (2018). Antiprotozoal activity of medicinal plants used by Iquitos-Nauta road communities in Loreto (Peru). *Journal of Ethnopharmacology*, 210, 372–385. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2017.08.039>
- Yahia, E. M. . (2009). *Modified and controlled atmospheres for the storage, transportation, and packaging of horticultural commodities*. CRC Press/Taylor & Francis.

BIODATA PENULIS



Marwati

Dosen Program Studi Teknologi Hasil Pertanian
Fakultas Pertanian Universitas Mulawarman

Penulis merupakan dosen pada Program Studi Teknologi Hasil Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Mulawarman. Penulis memiliki keahlian di bidang Mikrobiologi Hasil Pertanian dan Fisiologi Pascapanen. Selain aktif dalam kegiatan pengajaran, penulis juga terlibat dalam berbagai penelitian dan pengembangan di bidang teknologi pangan dan hasil pertanian.

Penulis menyelesaikan pendidikan Strata 1 pada Program Studi Teknologi Hasil Pertanian di Universitas Hasanuddin (1996–2001) dan melanjutkan pendidikan Strata 2 pada Program Studi Ilmu dan Teknologi Pangan di Universitas Gadjah Mada (2005–2007). Dalam kegiatan akademik, penulis mengampu berbagai mata kuliah seperti Mikrobiologi Hasil Pertanian, Fisiologi dan Teknologi

Pascapanen, Sanitasi dan Sanitasi dan Keamanan Pada Proses Pengolahan

Penulis aktif melakukan penelitian, publikasi ilmiah, serta pengembangan inovasi pangan, khususnya yang berkaitan dengan produk fermentasi, keamanan pangan, dan pemanfaatan bahan lokal. Selain itu, penulis juga berkontribusi dalam kegiatan pengabdian kepada masyarakat dan pengembangan UMKM pangan. Diharapkan karya-karya penulis dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang teknologi hasil pertanian, serta menjadi referensi bagi mahasiswa, peneliti, akademisi, praktisi, dan masyarakat umum.

BIODATA PENULIS



Hj. Maulida Rachmawati, SP., MP.

Dosen Program Studi Teknologi Hasil Pertanian
Fakultas Pertanian Universitas Mulawarman

Penulis lahir di Samarinda tanggal 16 Februari 1978. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknologi Hasil Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Mulawarman. Menyelesaikan S1 pada Jurusan Agronomi Faperta Unmul dan melanjutkan S2 pada Jurusan Ilmu Teknologi Pangan UGM serta sekarang melanjutkan ke Program Doktor Ilmu Pertanian Faperta Unmul (S3).

Penulis juga aktif sebagai pengurus PATPI Cabang Samarinda, sebagai Auditor Halal sekaligus Penyelia Halal di Samarinda, Kalimantan Timur. Sarjana (S1): (1996-2000), S2 : (2001-2004), dan S3 : (2022-Sekarang) untuk minat/homebase Pascapanen dan pengolahan hasil pertanian. Penulis dapat dihubungi melalui email: maulidarachmawati@faperta.unmul.ac.id atau rachmawatimaulida@gmail.com

BIODATA PENULIS



Nuzlul Musdalifah

Dosen Program Studi Teknologi Hasil
Pertanian Fakultas Pertanian
Universitas Mulawarman

Penulis lahir di Palopo tanggal 28 April 1990. Penulis merupakan dosen pada Program Studi Teknologi Hasil Pertanian, Fakultas Pertanian Universitas Mulawarman. Penulis menyelesaikan pendidikan Strata 1 pada Program Studi Keteknikan Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Hasanuddin (2008-2012), dan pendidikan Strata 2 di Program Studi Teknologi Pascapanen, Fakultas Teknologi Pertanian IPB University (2013-2016). Penulis tertarik pada bidang teknologi pascapanen, sehingga penulis membuka peluang untuk berkolaborasi di bidang tersebut. Semoga buku Fisiologi Dan Teknologi Pascapanen Pertanian Tanaman Tropika Lembab memberikan wawasan dan menjadi referensi Bagi mahasiswa, peneliti, akademisi, praktisi, maupun masyarakat umum

Kontak Penulis : <http://nuzlulmusdalifah@gmail.com>

BIODATA PENULIS



Melda Nurmaisari

Dosen Program Studi Teknologi Hasil
Pertanian Fakultas Pertanian
Universitas Mulawarman

Penulis lahir di Kotabumi tanggal 26 Mei 1999. Penulis merupakan dosen pada Program Studi Teknologi Hasil Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Mulawarman. Penulis menyelesaikan Pendidikan Strata 1 pada Program Studi Teknik Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Sriwijaya (2017-2021), dan Pendidikan Strata 2 di Program Studi Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung (2021-2023). Penulis tertarik pada bidang rekayasa manajemen dan sistem agroindustry pertanian, sehingga penulis membuka peluang untuk berkolaborasi di bidang tersebut. Semoga buku Fisiologi Dan Teknologi Pascapanen Pertanian Tanaman Tropika Lembab memberikan wawasan dan menjadi referensi Bagi mahasiswa, peneliti, akademisi, praktisi, maupun masyarakat umum
Kontak penulis : nurmaisari@faperta.unmul.ac.id