


6. Buku Fisiologi Tumbuhan.pdf

 class 1 -- No Repository 038

 class 2

 Rct.tech1222

Document Details

Submission ID

trn:oid::1:3270784663

Submission Date

Jun 7, 2025, 10:30 PM GMT+4:30

Download Date

Jun 7, 2025, 10:42 PM GMT+4:30

File Name

6_Buku_Fisiologi_Tumbuhan.pdf

File Size

4.9 MB

201 Pages




44,908 Words

293,177 Characters

12% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

Top Sources

- 12%  Internet sources
 - 2%  Publications
 - 5%  Submitted works (Student Papers)
-

Top Sources

- 12% Internet sources
- 2% Publications
- 5% Submitted works (Student Papers)

Top Sources

The sources with the highest number of matches within the submission. Overlapping sources will not be displayed.

| | | | |
|----|----------------|-------------------------------|-----|
| 1 | Internet | repository.penerbiteureka.com | <1% |
| 2 | Internet | text-id.123dok.com | <1% |
| 3 | Internet | id.wikipedia.org | <1% |
| 4 | Internet | unars.ac.id | <1% |
| 5 | Internet | etd.repository.ugm.ac.id | <1% |
| 6 | Internet | www.kompas.com | <1% |
| 7 | Internet | pbio.fkip.binabangsa.ac.id | <1% |
| 8 | Internet | core.ac.uk | <1% |
| 9 | Internet | liasalvina.blogspot.com | <1% |
| 10 | Student papers | Universitas Islam Bandung | <1% |
| 11 | Internet | repository.unhas.ac.id | <1% |

| | | | |
|----|----------------|--------------------------------------|-----|
| 12 | Internet | repository.uinsu.ac.id | <1% |
| 13 | Internet | es.scribd.com | <1% |
| 14 | Internet | repository.unej.ac.id | <1% |
| 15 | Internet | staffnew.uny.ac.id | <1% |
| 16 | Student papers | Universitas Islam Negeri Raden Fatah | <1% |
| 17 | Internet | blog.umy.ac.id | <1% |
| 18 | Internet | simdos.unud.ac.id | <1% |
| 19 | Internet | 123dok.com | <1% |
| 20 | Internet | ouci.dntb.gov.ua | <1% |
| 21 | Internet | blogs.uajy.ac.id | <1% |
| 22 | Internet | himepoenya.blogspot.com | <1% |
| 23 | Internet | informasains.com | <1% |
| 24 | Internet | alvahime.blogspot.com | <1% |
| 25 | Internet | naomisiah23.blogspot.com | <1% |

| | | | |
|----|----------------|-------------------------------|-----|
| 26 | Internet | newsmaker.tribunnews.com | <1% |
| 27 | Internet | suyatnorindang.blogspot.com | <1% |
| 28 | Internet | ar.scribd.com | <1% |
| 29 | Internet | nora.nerc.ac.uk | <1% |
| 30 | Internet | journal.unimma.ac.id | <1% |
| 31 | Internet | www.liputan6.com | <1% |
| 32 | Internet | dianfitriarni.wordpress.com | <1% |
| 33 | Internet | www.degruyter.com | <1% |
| 34 | Internet | hdl.handle.net | <1% |
| 35 | Internet | journal.ipb.ac.id | <1% |
| 36 | Internet | link.springer.com | <1% |
| 37 | Internet | repository.penerbitwidina.com | <1% |
| 38 | Student papers | Universitas Sebelas Maret | <1% |
| 39 | Internet | libweb.kpfu.ru | <1% |

| | | | |
|----|----------------|-----------------------------|-----|
| 40 | Internet | id.123dok.com | <1% |
| 41 | Student papers | University of West Attica | <1% |
| 42 | Internet | mospace.umssystem.edu | <1% |
| 43 | Internet | repo.unand.ac.id | <1% |
| 44 | Internet | talentaconfseries.usu.ac.id | <1% |
| 45 | Internet | ir.library.louisville.edu | <1% |
| 46 | Internet | mospace.lib.umanitoba.ca | <1% |
| 47 | Internet | opac.skru.ac.th | <1% |
| 48 | Internet | repository.polinela.ac.id | <1% |
| 49 | Internet | slideplayer.info | <1% |
| 50 | Internet | www.igb.illinois.edu | <1% |
| 51 | Internet | kjaquatic.com | <1% |
| 52 | Internet | www.byarcadia.org | <1% |
| 53 | Internet | www.iris.unina.it | <1% |

| | | | |
|----|----------------|---|-----|
| 54 | Internet | ejournalunb.ac.id | <1% |
| 55 | Internet | journals.ecotas.org | <1% |
| 56 | Internet | www.coursehero.com | <1% |
| 57 | Student papers | University of Edinburgh | <1% |
| 58 | Internet | digitalcommons.brockport.edu | <1% |
| 59 | Internet | dokumen.tips | <1% |
| 60 | Internet | oldsite.niser.ac.in | <1% |
| 61 | Internet | digilib.unila.ac.id | <1% |
| 62 | Internet | scholar.sun.ac.za | <1% |
| 63 | Internet | repository.ub.ac.id | <1% |
| 64 | Internet | sgbau.ac.in | <1% |
| 65 | Internet | tojqi.net | <1% |
| 66 | Student papers | Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco | <1% |
| 67 | Internet | bestjournal.untad.ac.id | <1% |

| | | | |
|----|----------------|---|-----|
| 68 | Internet | ejournal.forda-mof.org | <1% |
| 69 | Internet | dbpedia.org | <1% |
| 70 | Internet | helda.helsinki.fi | <1% |
| 71 | Internet | tlo-i-biljka.eu | <1% |
| 72 | Internet | www.e-journal.janabadra.ac.id | <1% |
| 73 | Internet | books.openedition.org | <1% |
| 74 | Internet | honors.libraries.psu.edu | <1% |
| 75 | Internet | ijhst.ut.ac.ir | <1% |
| 76 | Internet | jppipa.unram.ac.id | <1% |
| 77 | Internet | docplayer.info | <1% |
| 78 | Internet | repositori.usu.ac.id | <1% |
| 79 | Student papers | Universitas Airlangga | <1% |
| 80 | Internet | bbppmbtph.tanamanpangan.pertanian.go.id | <1% |
| 81 | Internet | brainly.co.id | <1% |

| | | | |
|----|----------------|---|-----|
| 82 | Internet | nsseptiani.blogspot.com | <1% |
| 83 | Internet | www.slideshare.net | <1% |
| 84 | Student papers | Universidad San Francisco de Quito | <1% |
| 85 | Internet | ejournal.kemenperin.go.id | <1% |
| 86 | Internet | soalterbaru.com | <1% |
| 87 | Student papers | Fakultas Ekonomi dan Bisnis Universitas Gadjah Mada | <1% |
| 88 | Student papers | University of Teesside | <1% |
| 89 | Internet | atrium.lib.uoguelph.ca | <1% |
| 90 | Internet | idoc.pub | <1% |
| 91 | Student papers | Endeavour College of Natural Health | <1% |
| 92 | Student papers | Griffth University | <1% |
| 93 | Internet | elifesciences.org | <1% |
| 94 | Student papers | Universitas Muhammadiyah Surakarta | <1% |
| 95 | Internet | agustinesumanti.blogspot.com | <1% |

| | | | |
|-----|----------------|--------------------------------------|-----|
| 96 | Internet | nurfitrianypalu.blogspot.com | <1% |
| 97 | Internet | www.powtoon.com | <1% |
| 98 | Student papers | HAS Den Bosch | <1% |
| 99 | Student papers | University of Diyala | <1% |
| 100 | Student papers | University of Latvia | <1% |
| 101 | Internet | deebioholic.blogspot.com | <1% |
| 102 | Internet | fnm.um.si | <1% |
| 103 | Internet | ilmupertanianindonesia1.blogspot.com | <1% |
| 104 | Internet | opus.cloud1.lib.uts.edu.au | <1% |
| 105 | Internet | plantprotection.scu.ac.ir | <1% |
| 106 | Internet | repositories.lib.utexas.edu | <1% |
| 107 | Internet | repository.unisma.ac.id | <1% |
| 108 | Internet | ruj.uj.edu.pl | <1% |
| 109 | Internet | triasihkurniawati.blogspot.com | <1% |

| | | | |
|-----|----------|--|-----|
| 110 | Internet | www.digitalna-knjiznica.bf.uni-lj.si | <1% |
| 111 | Internet | www.gurupendidikan.co.id | <1% |
| 112 | Internet | www.neliti.com | <1% |

Editor
Araz Meilin
Aisjah Rachmawaty Ryadin



FISILOGI TUMBUHAN

**Irma Lisa Sridanti, Yusuf Sabilu,
Nuraisyah Takdir, Leni Handayani,
Suryati Tjokrodingrat, Sangkala
Heny Ekawati Haryono,
Shubzan Andi Mahmud,
Rima Melati, Laswi Irmayanti**

FISIOLOGI TUMBUHAN

Penulis

Irma Lisa Sridanti
Yusuf Sabilu
Nuraisyah Takdir
Leni Handayani
Suryati Tjokrodiningrat
Sangkala
Heny Ekawati Haryono
Shubzan Andi Mahmud
Rima Melati
Laswi Irmayanti

Editor

Araz Meilin
Aisjah Rachmawaty Ryadin



PENERBIT

PT. KAMIYA JAYA AQUATIC

FISIOLOGI TUMBUHAN

Penulis : Irma Lisa Sridanti, Yusuf Sabilu, Nuraisyah Takdir,
Leni Handayani, Suryati Tjokrodiningrat, Sangkala,
Heny Ekawati Haryono, Shubzan Andi Mahmud,
Rima Melati, Laswi Irmayanti.

Editor : Araz Meilin, Aisjah Rachmawaty Ryadin

ISBN : 978-623-8784-04-2 (PDF)

Desain Sampul dan Tata Letak : Faisal Alimaturahim

Penerbit :
PT. Kamiya Jaya Aquatic

Anggota IKAPI No. 001/MALUKUUTARA/2024

Redaksi :
RT 008 RW 003 Kelurahan Fitu, Kecamatan Ternate Selatan,
Kota Ternate, Maluku Utara
Telp. : 0812-2279-3284
Email : kamiyajayaaquatic@gmail.com
Website : <https://kjaquatic.com/>

Distributor :
PT. Kamiya Jaya Aquatic

Cetakan Pertama : September 2024

Hak Cipta dilindungi undang-undang
Dilarang memperbanyak atau memindahkan sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun dan dengan cara apapun, termasuk memfotokopi, merekam, atau dengan teknik perekaman lainnya tanpa seizin tertulis dari penerbit.

PRAKATA

Bersyukur kami panjatkan ke hadirat Allah Subhanahu Wa Taala sehingga buku yang berjudul “Fisiologi Tumbuhan” ini dapat diterbitkan sesuai waktu yang direncanakan. Buku ini merupakan kompilasi tulisan dari beberapa penulis yang berasal dari beragam perguruan tinggi. Buku ini sendiri berisi sepuluh bab yang membahas mulai dari pengenalan fisiologi tumbuhan, anatomi dan morfologi tumbuhan, fotosintesis, respirasi tumbuhan, transportasi air dan nutrisi dalam tumbuhan, perkembangbiakan tanaman, gerak pada tumbuhan, interaksi tumbuhan dengan lingkungan, fisiologi stres tanaman, bioteknologi tumbuhan. Kami berharap buku ini menjadi sumber bacaan utama bagi pembaca yang terlibat dalam bidang biologi maupun pertanian dan bidang lain yang menyangkut dengan fisiologi tumbuhan, baik kalangan akademisi yaitu dosen dan mahasiswa, praktisi maupun masyarakat dan pemerhati tumbuhan.

Keterbaharuan dalam sebuah buku merupakan prioritas yang sangat kami kedepankan, meskipun mungkin dalam buku ini masih terdapat kekurangan yang tidak kami sengaja. Kritik dan masukan dari pembaca sangat kami harapkan dalam proses buku ini untuk berkembang di masa mendatang. Tak lupa kami mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah berkontribusi dalam tuntasnya penerbitan buku ini.

Ternate, September 2024

Penulis

DAFTAR ISI

PRAKATA..... iii
DAFTAR ISI iv
DAFTAR TABEL vii
DAFTAR GAMBARviii

Bab 1. PENGENALAN FISILOGI TUMBUHAN

1.1 Batasan dan Sejarah Fisiologi Tumbuhan..... 1
 1.2 Klasifikasi Fisiologi Tumbuhan..... 6
 1.3 Peranan Fisiologi Tumbuhan..... 8

Bab 2. ANATOMI DAN MORFOLOGI TUMBUHAN

2.1 Pengertian, Peran dan Ruang Lingkup 10
 2.2 Struktur Umum Tubuh Tumbuhan 12
 2.3 Sistem Akar dan Sistem Pucuk..... 16
 2.4 Pertumbuhan Tanaman 17
 2.5 Akar Tumbuhan 21
 2.6 Batang Tumbuhan 25
 2.7 Daun Tumbuhan 27
 2.8 Bunga..... 29
 2.9 Buah dan Biji 31

Bab 3. FOTOSINTESIS

3.1 Pengertian Fotosintesis 35
 3.2 Tempat Terjadinya Fotosintesis 36
 3.3 Proses Terjadinya Fotosintesis..... 40
 3.4 Reaksi Terang dan Reaksi Gelap..... 41
 3.5 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Fotosintesis 46

Bab 4. RESPIRASI TUMBUHAN

4.1 Pendahuluan 50
 4.2 Proses Respirasi Tumbuhan 55
 4.3 Dampak Terganggunya Proses Respirasi 64
 4.4 Respirasi pada Organ dan Jaringan Tumbuhan Tertentu 66
 4.5 Teknik Pengukuran Respirasi 68

| | |
|---|-----|
| 4.6 Aplikasi Pengetahuan Respirasi dalam Pertanian | 70 |
| Bab 5. TRANSPORTASI AIR DAN NUTRISI DALAM TUMBUHAN | |
| 5.1 Proses-Proses Penting..... | 72 |
| 5.2 Transportasi Air..... | 75 |
| 5.3 Transpirasi..... | 78 |
| 5.4 Daun dan Atmosfir | 80 |
| 5.5 Mekanisme Penyerapan Air | 81 |
| 5.6 Pengangkutan Air dan Nutrisi di dalam Tanaman..... | 82 |
| 5.7 Mekanisme Pengangkutan..... | 84 |
| Bab 6. PERKEMBANGBIAKAN TANAMAN | |
| 6.1 Pengantar | 86 |
| 6.2 Perkembangbiakan Secara Generatif | 87 |
| 6.3 Perkembangbiakan Secara Vegetatif..... | 91 |
| Bab 7. GERAK PADA TUMBUHAN | |
| 7.1 Gerak Endonom..... | 98 |
| 7.2 Gerak Etinom..... | 100 |
| 7.3 Mekanisme Gerak pada Tumbuhan | 111 |
| Bab 8. INTERAKSI TUMBUHAN DENGAN LINGKUNGAN | |
| 8.1 Difusi | 113 |
| 8.2 Respons Fotosintesis Terhadap Ligkungan | 114 |
| 8.3 Cahaya..... | 117 |
| 8.4 Karbon Dioksida | 121 |
| 8.5 Suhu Lingkungan | 122 |
| 8.6 Interaksi Tumbuhan dengan Air | 123 |
| 8.7 Faktor Nutrient dan Polutan..... | 125 |
| 8.8 Pengaruh Perubahan Iklim..... | 127 |
| 8.9 Respon Transpirasi Tumbuhan terhadap Lingkungan..... | 128 |
| Bab 9. FISILOGI STRESS TANAMAN | |
| 9.1 Pengantar..... | 132 |
| 9.2 Stress Abiotik | 134 |
| 9.3 Stress Biotik..... | 147 |

Bab 10. BIOTEKNOLOGI TUMBUHAN

| | |
|---|------------|
| 10.1 Pengertian Bioteknologi..... | 150 |
| 10.2 Kultur Jaringan..... | 152 |
| 10.3 Rekayasa Genetika | 156 |
| 10.4 <i>Marker Assisted Selection (MAS)</i> /Seleksi dengan Penanda | 157 |
| DAFTAR PUSTAKA | 165 |
| BIODATA PENULIS..... | 183 |

DAFTAR TABEL

| | |
|--|-----|
| 10.1 Tahapan perkembangan bioteknologi..... | 151 |
| 10.2 Komposisi bahan untuk buffer ekstrak | 159 |
| 10.3 Contoh primer RAPD dari Operon Technology | 162 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|---|----|
| 1.1 Percobaan Van Helmont menggunakan ranting willow | 3 |
| 1.2 Percobaan J.von Sach | 4 |
| 1.3 Daur karbon di alam..... | 5 |
| 2.1 Organ tumbuhan..... | 12 |
| 2.2 Gambaran umum daur hidup Angiospermae | 13 |
| 2.3 Tipe perkecambahan..... | 14 |
| 2.4 Sistem akar dan sistem pucuk | 16 |
| 2.5 Pertumbuhan primer dan pertumbuhan sekunder pada batang..... | 19 |
| 2.6 Pertumbuhan primer dan pertumbuhan sekunder pada batang..... | 20 |
| 2.7 Letak meristem dan jaringan pembuluh akar, batang dan daun | 21 |
| 2.8 Anatomi akar dikotil dan monokotil, akar tunggang dan akar serabut..... | 24 |
| 2.9 Bagian-bagian akar pada pertumbuhan primer akar..... | 25 |
| 2.10 Struktur batang dikotil dan gymnospermae dan struktur batang monokotil..... | 26 |
| 2.11 Modifikasi batang, stolon, rhizoma, umbi dan umbi lapis | 27 |
| 2.12 Potongan melintang Dicotyledoneae dan Monocotyledoneae | 28 |
| 2.13 Morfologi daun..... | 29 |
| 2.14 Bagian-bagian bunga | 30 |
| 2.15 Buah dan bagian-bagiannya | 32 |
| 2.16 Bagian bunga dan buah kacang polong, struktur biji, dan struktur bakal biji..... | 33 |
| 3.1 Struktur anatomi daun | 37 |
| 3.2 Struktur kloroplast | 38 |
| 3.3 Aliran elektron non siklik | 43 |
| 3.4 Aliran elektron siklik | 44 |
| 3.5 Siklus Calvin | 45 |
| 3.6 Dua tahapan kerjasama reaksi terang dan reaksi gelap..... | 46 |
| 4.1 Siklus Krebs..... | 58 |
| 4.2 Rantai transpor elektron pada mitokondria..... | 61 |
| 4.3 Rantai transpor elektron..... | 62 |
| 5.1 Pergerakan air dari dalam tanah melalui sel-sel sampai di pembuluh xilem..... | 75 |

5.2 Kekuatan pendorong utama aliran air dari tanah melalui tumbuhan ke atmosfer: perbedaan konsentrasi uap air (ΔC_{wv}), tekanan hidrostatik ($\Delta \Psi_p$), dan potensi air ($\Delta \Psi_w$) 76

5.3 Fluktuasi transpirasi dan tekanan osmotik sel-sel daun selama 18 jam.. 80

5.4 Skema penampang memanjang dan melintang dari pembuluh saring dan sel pelengkap (tabung sieve elements) 84

6.1 Bagian-bagian bunga 88

6.2 Morfologi bunga padi..... 89

6.3 Bagian bunga tanaman jagung..... 90

6.4 Umbi batang kentang 92

6.5 Umbi lapis 93

6.6 Umbi batang tanaman singkong..... 93

6.7 Rhizoma pada jahe..... 94

6.8 Tunas pada tanaman pisang..... 94

6.9 Tunas adventif tanaman cocor bebek..... 95

6.10 Stolon pada strawberry 95

6.11 Spora pada pakis 96

7.1 Nutasi dan higroskopis 100

7.2 Fototaksis..... 110

7.3 Kemotaksis 111

8.1 Reaksi terang pada fotosintesis 115

8.2 Fotosintesis dan fotorespirasi..... 116

8.3 Photosynthesis Active Radiation (PAR)..... 118

8.4 Hubungan antar intensitas naungan pada beberapa varietas tanaman jagung 118

8.5 Pengaruh peningkatan suhu terhadap laju fotosintesis 122

8.6 Proses kehilangan air melalui stomata..... 125

8.7 Gambaran umum transpirasi dan evaporasi..... 129

9.1 Dampak stress lingkungan pada tanaman 134

9.2 Respon tanaman pada suhu rendah..... 137

9.3 Pengaruh stress suhu rendah tanaman padi..... 138

9.4 Konsep diagram sinyal transmisi dari akar-tunas dan pucuk-tunas sebagai respon stress kekeringan..... 140

9.5 Gejala di areal perakaran pada kondisi genangan dengan modifikasi metabolisme dan fisiologi sebagai respon adaptif 143

9.6 Mekanisme serapan logam oleh akar dan efek kerusakan yang dapat menurunkan produksi tanaman 146

10.1 Tahapan kultur jaringan 155

10.2 Contoh kultur jaringan tanaman..... 156

Bab 1

PENGENALAN FISILOGI TUMBUHAN

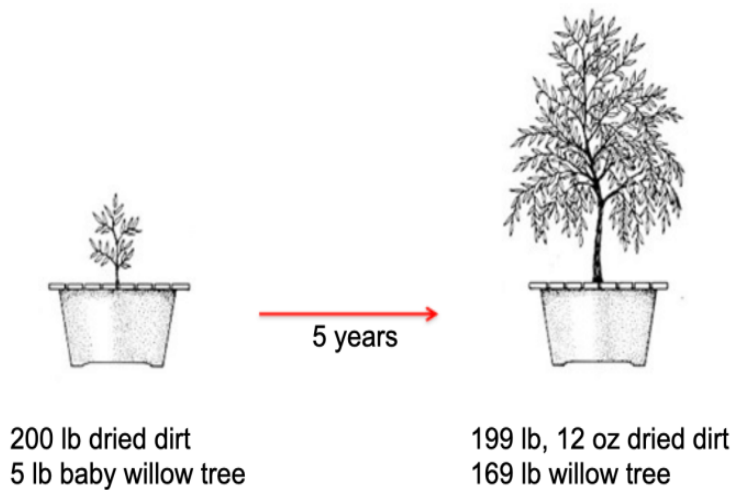
1.1 Batasan dan Sejarah Fisiologi Tumbuhan

Tumbuhan memiliki akar, batang, dan daun dengan peranan yang berbeda setiap bagian organnya, dimana fungsi organ ini adalah sebagai jaringan yang bertugas memindahkan atau mengangkut material esensial untuk dapat ditransmisikan dari bagian sel yang satu ke bagian sel yang lainnya, selanjutnya dari jaringan satu ke jaringan lainnya, yang kemudian dari organ satu ke organ yang lainnya sehingga substrat dapat terpenuhi hingga ke seluruh bagian tumbuhan (Salisbury & Ross, 1995). Reaksi yang melewati beberapa tahapan ini mengalami penguraian senyawa-senyawa dengan ikatan-ikatan molekul yang kompleks. Proses metabolisme yang melibatkan banyak reaksi kimia, maupun fisika ini didalam pertumbuhan dan perkembangan tanaman sangat unik untuk dipelajari dan di teliti lebih dalam guna memberikan informasi pengetahuan yang lebih khusus atau spesifik berdasarkan hasil kajian ilmiah, yang selanjutnya lebih umum disebut dengan fisiologi tumbuhan (*physiology of plantae*).

Mahhluk hidup yang ada di atas permukaan bumi ini keseluruhan baik secara langsung maupun tidak langsung dalam proses pertahanan kehidupannya sangat ditentukan oleh keberadaan tumbuhan yang ada di daratan maupun di perairan. Tumbuhan merupakan organisme yang bersifat *autotrof* atau organisme yang dapat menghasilkan energi sendiri bagi kehidupannya, dan sifat *autotrof* ini hanya dimiliki oleh tumbuhan tidak bagi organisme lainnya, hal ini dikarenakan tumbuhan memiliki klorofil. Tumbuhan dapat mengambil sebesar 200 milyar ton lebih karbon dari udara berupa CO₂ dalam setiap tahunnya, dimana kemudian CO₂ ini diubah menjadi senyawa penting bagi kehidupan melalui proses fotosintesis (Istirochah, 2019).

Fisiologi tumbuhan adalah konsep ilmu yang menguraikan tentang terjadinya tahapan metabolisme yang berlangsung didalam jaringan tumbuhan. Selain itu, ilmu fisiologi tumbuhan juga menjelaskan tentang sifat-sifat tumbuhan yang meliputi tahapan reaksi kimiawi yang sangat kompleks dimana tahapan-tahapan tersebut saling berhubungan sangat erat sehingga mampu berinteraksi dengan padat dalam mendukung proses tumbuh kembang tanaman (Sufardi, 2020). Selain faktor tanaman itu sendiri faktor lain seperti faktor iklim serta rangkaian hubungan antara tumbuhan dan organisme pendukung menjadi bagian dari dasar fisiologi tumbuhan. Materi-materi yang merupakan pokok pikiran pada fisiologi tumbuhan merupakan satu batasan yang dapat ditelaah dan didalami pada ilmu fisiologi tumbuhan (Fiqa *et al.*, 2021).

Fisiologi tumbuhan merupakan salah satu cabang ilmu biologi yang didalamnya mempelajari tentang proses-proses dan mekanisme aktivitas tumbuhan agar dapat bertahan hidup. Pembahasan ilmu ini sangat kompleks karena tidak hanya membahas aktivitas tumbuhan saja melainkan reaksi kimiawi apa saja yang terjadi didalam organ, jaringan dan bahkan di dalam sel tumbuhan tersebut. Jadi sebelum mempelajari ilmu ini seseorang harus memiliki bekal dari ilmu-ilmu yang mendasari fisiologi tumbuhan. Sejarah fisiologi tumbuhan dimulai dari percobaan yang dilakukan oleh Van Helmont pada abad ke-16, yang merupakan seorang Belanda. Pada saat itu percobaan menggunakan ranting willow yang ditanam di dalam pot. Tanaman tersebut disiram setiap hari. Dalam waktu 5 tahun kemudian massa ranting willow tersebut bertambah 30 kali lipat, sedangkan massa tanah didalam pot menjadi sangat sedikit. Dari percobaan tersebut Van Helmont berkesimpulan bahwa sumber energinya adalah air bukan tanah. Kejadian ini adalah kali pertama dilakukannya riset eksperimental untuk mengkaji fenomena atas kejadian fisiologis tumbuhan (**Gambar 1.1**).

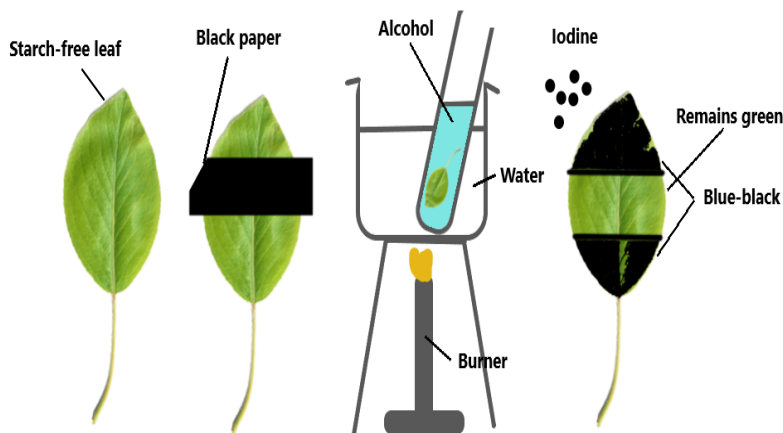


Gambar 1.1 Percobaan Van Helmont menggunakan ranting willow

(Sumber: Kompas.com, 2024)

Selanjutnya J. Priestley dari Inggris dan J. Innhaus dari Belanda di akhir abad ke-18 dan awal abad ke-19, dengan hasil penelitian yang dilakukan secara beruntun mengasilkan penemuan bahwa adanya kaitan yang sangat penting pada fenomena fotosintesis. Fenomena ini membuktikan pada tumbuhan hijau dapat meleburkan molekul CO_2 di udara dengan spektrum cahaya. Molekul air pada tanah mengalami difusi bahan organik dan menguraikan O_2 . Fenomena yang berlangsung dalam tumbuhan ini melibatkan proses transportasi energi, penyerapan air dan transpirasi nutrisi nitrogen, penyerapan mineral, sensitivitas tanaman serta fenomena gerakan tanaman (Gardner *et al.*, 1991). Berdasarkan berbagai fenomena yang ditemukan dan dikaji pada proses metabolisme yang terjadi pada siklus hidup tanaman ini pada tahun 1800 J. Senebière yang berasal dari swiss menuliskan dan menerbitkan sebuah buku yang pertama kalinya di dunia tentang berbagai hasil penelitian yang terpusat pada pengembangan dan kajian ilmu fisiologi tumbuhan yang menjadi salah satu rujukan pengembangan ilmu fisiologi tumbuhan.

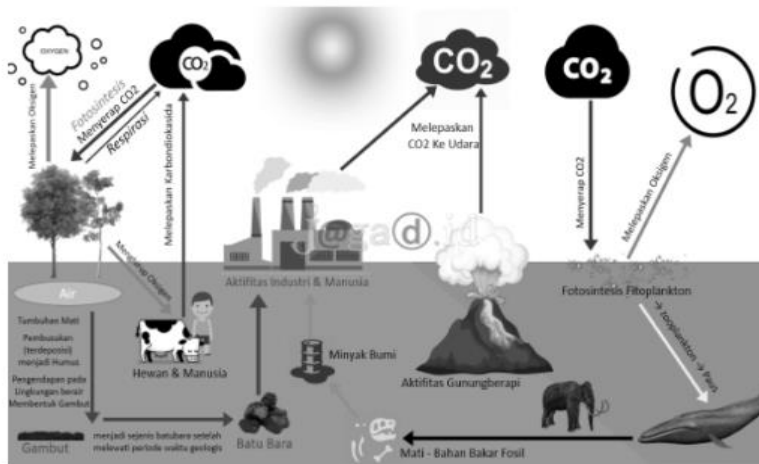
Pada akhir abad ke-19, J. von Sachs seorang Jerman mengawali adanya keterampilan yang mempelajari spesifik atau khusus tentang ilmu fisiologi tumbuhan. Bersama dengan murid-muridnya ia berhasil membuktikan bahwa fisiologi tumbuhan menjadi mata pelajaran khusus yang terpisah dari ilmu Botani (**Gambar 1.2**). Pada dekade waktu tahun 1920 - 1930 an dengan kemajuan ilmu fisika dan ilmu kimia, mikrobiologi serta fisiologi umum, sehingga ilmu fisiologi tumbuhan semakin banyak mengalami perkembangan, dan menjadi titik lahirnya ilmu biokimia dan ilmu biofisika yang menjadikan fisiologi tumbuhan berkembang kajiannya hingga ke tingkat sel. Pada tahun 1940-an kajian tentang organel, analisis proses respirasi, proses fotosintesis dengan mitokondria dan kloroplas menjadi fokus utama perkembangan ilmu fisiologi tumbuhan (Salisbury & Ross, 1995).



Gambar 1.2 Percobaan J.von Sach
(Sumber: Kompas.com, 2024)

Setelah tahun 1950-an perkembangan ilmu fisiologi tumbuhan lebih berkembang pada metabolisme terjadinya kombinasi makromolekul, struktur dan fungsi biofilm. Dimana metode *in vitro* dengan menggunakan enzim dan proses transpor elektron, berkembang menjadi kajian biologi molekuler sebagai bagian dari ilmu fisiologi tumbuhan. Selain mengkaji berbagai fenomena yang terjadi akibat interaksi internal tumbuhan itu sendiri, ilmu fisiologi tumbuhan berkembang pada kajian

terkait perkembangan tanaman dari individu tanaman hingga golongan dan populasi. Hal ini erat kaitannya dengan produksi tanaman yang dihasilkan dalam satuan luas. Pada fenomena yang terjadi banyak tanaman yang tidak mampu bertahan hidup hingga menghasilkan. Untuk itu kajian fisiologi tumbuhan berkembang menuju yang lebih luas, yaitu memperhatikan interaksi antara individu tanaman dengan lingkungan pendukungnya (Baucom *et al.*, 2020). Struktur tanaman dan komponen pendukung pada populasinya menjadi faktor utama dalam kajian pertumbuhan tanaman hingga pada skala produksi per satuan luas. Perilaku ini dapat dipengaruhi oleh hubungan antara individu tumbuhan dengan faktor lingkungan luar atau dengan tumbuhan lain. Dengan melihat fenomena pengaruh dan interaksi antara tumbuhan dan lingkungan seperti fenomena dan proses ventilasi dan transmisi cahaya, ketersediaan air tanah, ketersediaan pupuk, interaksi simbiosis serta fenomena lainnya maka terdapat pengaruh dan interaksi serta pembatasan ekologi dalam proses fisiologis tumbuhan (Istirochah, 2019) (**Gambar 1.3**).



Gambar 1.3 Daur karbon di alam
(Sumber: Istirochah, 2019)

Ruang Lingkup ilmu fisiologi tumbuhan berkonsentrasi pada bagaimana reaksi -reaksi yang terjadi pada metabolisme tumbuhan ketika berlangsung. Lingkup kajian pada cabang ilmu ini beberapa diantaranya

adalah : 1) Fotosintesis; 2) Respirasi; 3) Transpirasi; 4) Absorpsi Air dan Nutrisi Tanaman.

1.2 Klasifikasi Fisiologi Tumbuhan

Substansi utama pada fisiologi tumbuhan yaitu fokus pada tahapan atau proses berlangsungnya metabolisme yang terjadi pada tumbuhan. Pesatnya perkembangan ilmu saat ini serta dikuatkan oleh kemajuan ilmu kimia dan ilmu fisika, dimana kemudian ilmu fisiologi tumbuhan dikelompokkan menjadi beberapa kedudukan sesuai dengan batasan pokok ulasan materi sebagai berikut :

1.2.1 Fisiologi Tanaman

Fisiologi tanaman menguraikan tahapan-tahapan perubahan pada sistem metabolisme yang terjadi pada tanaman budidaya (Murtiwulandari *et al.*, 2020). Pada proses budidaya tanaman tentunya yang diharapkan adalah hasil yang dapat memberikan keuntungan bagi manusia, untuk itu faktor-faktor yang mempengaruhi proses metabolisme tanaman budidaya yang meliputi pertumbuhan dan perkembangan anatomi tanaman seperti ; akar, batang, daun, biji, umbi dan lain-lain sangat penting untuk dapat diuraikan dan dipahami lebih mendalam

1.2.2 Fisiologi pasca panen

Pada bagian ilmu fisiologi pasca panen fokus menguraikan bagaimana perilaku tahapan-tahapan yang berlaku pada metabolisme yang terjadi pada bagian anatomi tanaman yang merupakan organ produksi setelah organ produksi tersebut memasuki tahapan selepas panen. Kajian fisiologi pasca panen ini menguraikan respon yang kompleks dan rumit yang terjadi pada tanaman budidaya setelah pasca panen. Gerakan yang saling berinteraksi umumnya bersifat katabolik, dimana senyawa-senyawa kompleks yang merupakan molekul-molekul besar seperti pati, selulosa, protein, lemak dan asam nukleat mengalami penguraian yang padat sehingga berubah menjadi senyawa-senyawa yang bermolekul lebih kecil dengan susunan yang lebih simpel dan sederhana. Daya dalam mengendalikan percepatan reaksi katabolik yang terjadi dalam

metabolisme tersebut dalam upaya mengendalikan dan menambah waktu kesegaran hasil panen merupakan unsur telaah yang utama dalam memberikan manfaat terhadap penerapan ilmu fisiologi pasca panen agar memberikan manfaat yang luas terhadap ketersediaan hasil panen yang sehat dan segar.

1.2.3 Eko-fisiologi

Kajian ekofisiologi menguraikan tentang adanya interaksi yang saling mempengaruhi antara faktor lingkungan terhadap rangkaian tahapan metabolisme tumbuhan, meliputi interaksi yang menghasilkan fenomena positif (menguntungkan) dan interaksi fenomena yang memberikan dampak negatif (merugikan) terhadap proses tumbuh kembang tumbuhan dan kebutuhan hidup manusia. Komponen faktor lingkungan dikelompokkan dalam dua komponen umum yaitu lingkungan abiotik dan lingkungan biotik. Ilmu ekofisiologi secara umum memberikan penekanan terhadap kajian yang memperhatikan adanya interaksi atau pengaruh faktor lingkungan abiotik, seperti dampak intensitas cahaya, periode penyinaran, kapasitas cahaya, suhu, kelembaban, transfigurasi pengutamaan gas-gas atmosfer, tingkatan fisika, dan lapisan kimia tanah (Sianipar, 2021). Selain itu kondisi cekaman atau lingkungan tidak optimal pada komponen lingkungan abiotik juga menjadi kajian sebagai dampak fisiologis tumbuhan. Kajian ekofisiologi yang berfokus pada substansi yang menguraikan respon tumbuhan terhadap cekaman adalah *stress fisiologi* atau fisiologi cekaman.

1.2.4 Fisiologi benih

Fase perkecambahan benih melewati banyak tingkatan, seperti proses peningkatan kadar air benih (imbibisi), reaktivasi atau keaktifan kembali enzim, elaborasi bahan sediaan serta perkembangan radikula. Fisiologi benih merupakan bagian dari kajian cabang fisiologi tumbuhan yang batasan serta lingkup kajiannya meliputi metabolisme pada reaksi-reaksi yang terjadi saat fase perkecambahan benih (Zidny *et al.*, 2022). Pengetahuan terkait performa benih saat mencapai matang secara fisiologis adalah sangat penting untuk diketahui, hal ini dikarenakan

benih yang telah matang secara fisiologis telah memiliki kondisi fisiologis yang telah siap untuk dapat mengekspresikan vigornya secara optimal .

Kajian fisiologi tumbuhan yang menjadi klasifikasi diatas merupakan kajian substansi fisiologi tumbuhan yang saat ini mendapat banyak perhatian. Hal yang mendasari bahwa fisiologi tumbuhan sangat penting untuk dikaji adalah bahwasanya fisiologi tanaman dapat mengembangkan interaksi yang essensial antara karakter fenotipik dan performa tanaman, hal ini disebabkan upaya menguraikan dan memperkirakan interaksi kompleks antara karakter-karakter yang relevan dan/atau antara karakter-karakter tanaman dengan lingkungan.

1.3 Peranan Fisiologi Tumbuhan

Pengembangan ilmu pengetahuan saat ini adalah salah satu perilaku baik yang penting dilakukan bagi kualitas kehidupan yang lebih baik. Melalui berbagai kajian dan inovasi yang dihasilkan. Hal ini berdampak karena dengan semakin meningkatnya kebutuhan manusia dalam memenuhi kehidupannya (Fauziah, 2021). Fisiologi tumbuhan sebagai salah satu cabang ilmu pengetahuan, memiliki peranan penting dalam perkembangan dunia ilmu pengetahuan.

Peranan ilmu fisiologi tumbuhan antara lain adalah sebagai berikut :

- a. Fisiologi tumbuhan merupakan rujukan dan panduan bagi manusia dalam memenuhi keberlangsungan kehidupannya melalui tanaman, pangan sebagai bahan pokok, sebagai bahan obat-obatan, bahan baku kosmetik, sumber bahan baku pakaian, seni untuk keindahan atau estetika, dapat digunakan sebagai bahan upacara adat, bahan baku dasar industri, dan bahan sandang berupa papan atau bahan kayu lainnya.
- b. Fisiologi tumbuhan sebagai panduan guna menghadirkan iklim lingkungan yang kondusif, terkendali, dan stabil. Proses fotosintesis pada tumbuhan menghasilkan oksigen (O_2) dan juga karbohidrat ($C_nH_{2n}O_n$). Kondisi cuaca di siang hari udara yang berada disekitar pohon akan terasa lebih segar dan sejuk, hal ini disebabkan karena tumbuhan mengeluarkan oksigen (O_2) dalam reaksi fotosintesis.

- c. Peranan tumbuhan juga memiliki manfaat bagi konservasi, yaitu dapat mencegah terjadinya longsor maupun erosi (Maimunah *et al.*, 2020). Akar tumbuhan yang kuat dan luas dapat membantu aliran air di permukaan tanah mengalir dengan baik sehingga akan terhindar dari bencana erosi ataupun tanah longsor.

Bab 2

ANATOMI DAN MORFOLOGI TUMBUHAN

2.1 Pengertian, Peran dan Ruang Lingkup

Anatomi dan morfologi tumbuhan adalah dua cabang utama dalam botani yang mempelajari struktur fisik dan organisasi tumbuhan. Anatomi tumbuhan adalah ilmu pengetahuan murni mengenai tumbuhan, yang menjadi bagian dari ilmu botani, seperti halnya ilmu-ilmu tumbuhan murni lain seperti morfologi, fisiologi, taksonomi, palaeobotani, fitogeografi. Morfologi tumbuhan yaitu ilmu biologi tumbuhan yang mengkaji struktur (bentuk dan susunan) bagian luar tubuh tumbuhan, sedangkan Anatomi yaitu ilmu biologi tumbuhan yang mengkaji struktur sel, struktur jaringan, struktur organ-organ bagian dalam penyusun tubuh tumbuhan. Sifat morfologi dan fisiologi suatu jenis tumbuhan sangat erat kaitannya dengan struktur anatominya.

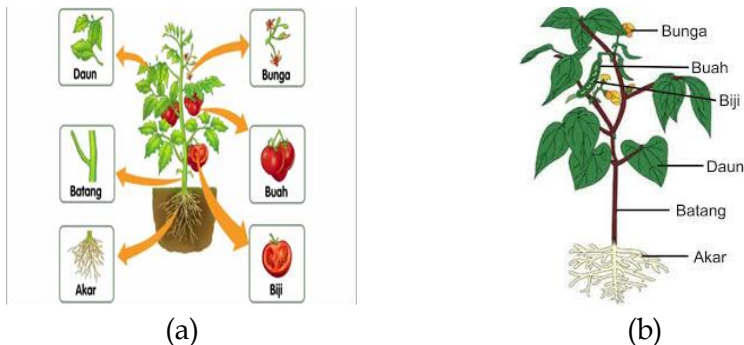
Kajian tanaman hortikultura, budidaya tanaman, penyakit tanaman (patologi), kajian ekologi, selalu membutuhkan pengetahuan tentang bentuk luar dan susunan sel, susunan jaringan dan organ tanaman. Kajian dan analisis dari tubuh tanaman sangat dipengaruhi oleh pengetahuan dan pemahaman tentang sel, jaringan, organ-organ serta bentuk luar serta modifikasi dari organ-organ, sehingga bagian-bagian tersebut memiliki fungsi dan peran tertentu bagi tanaman. Fotosintesis, pergerakan air, translokasi dan penyimpanan produk fotosintesis, dan penyerapan nutrisi dan air dari dalam tanah dan udara, baik akar dalam tanah maupun akar yang berada bukan tanah (misal akar udara, akar lekat) sangat terkait dengan morfologi (struktur luar) dan anatomi (struktur dalam) dari tumbuhan. Penyakit tanaman tidak dapat dipahami dengan baik, apabila tidak mengetahui struktur jaringan yang terserang, mencegah akibat penyakit tanaman, adanya parasit tanaman, daya tahan terhadap penyakit, hal tersebut dapat dijelaskan dengan perubahan

struktur morfologi dan anatomi inang. Praktek hortikultura seperti pemangkasan, pembentukan kalus, penyembuhan luka, regenerasi, perkembangan akar dan tunas baru, akan berhasil jika sifat, susunan dan struktur tumbuhan dipahami dengan baik. Identifikasi material-material tumbuhan yang ditemukan sebagai fosil, potongan-potongan, campuran dalam formula obat-obatan, dapat dilakukan bila memahami anatomi dengan baik (Purnobasuki, 2014).

Pemahaman yang baik tentang morfologi dan anatomi tumbuhan mendukung pada ilmu terapan yaitu memberikan dasar yang kuat untuk penerapan ilmu pengetahuan dan teknologi tumbuhan. Pemahaman tentang struktur daun, akar, dan batang dapat menjadi dasar pemilihan dan pemuliaan tanaman yang memiliki sifat-sifat yang diinginkan seperti kecepatan pertumbuhan, ketahanan terhadap hama dan penyakit, serta adaptasi terhadap lingkungan tertentu; pengetahuan tentang komponen-komponen aktif dalam tanaman dapat membantu dalam pengembangan obat-obatan alami yang lebih efektif dan aman; memilih gen tertentu yang akan dimodifikasi atau ditransfer ke tanaman lain untuk memperbaiki sifat-sifatnya, seperti peningkatan hasil panen, resistensi terhadap penyakit, atau adaptasi terhadap perubahan lingkungan; membantu dalam upaya pelestarian tanaman-tanaman langka atau terancam punah dengan cara memahami kebutuhan habitatnya, proses reproduksi, dan faktor-faktor lain yang mempengaruhi kelangsungan hidupnya (Purnobasuki, 2014).

Spermatophyta (tumbuhan biji) memiliki organ akar, batang, daun, bunga, buah dan biji. Organ dengan bentuk dan struktur yang berbeda menunjukkan adanya fungsi yang berbeda pada kehidupan tumbuhan. Seluruh organ tumbuhan bekerjasama satu sama lain, untuk menjalankan fungsi tumbuhan dan adaptasinya terhadap tempat tumbuhnya atau habitatnya. Perbedaan susunan dan struktur organ menunjukkan perbedaan struktur dan fungsi serta adaptasinya dari tumbuhan tersebut. Tubuh tumbuhan dibentuk oleh komponen sel, jaringan, dan organ yang dipersatukan dengan substansi antar sel sehingga unit-unit jaringan dan organ menjalankan fungsi tertentu dan membentuk organisme tumbuhan. Sel-sel baik bentuknya sama ataupun berbeda tetapi asal-usulnya sama, membentuk kelompok yang menjalankan fungsi tertentu dikenal sebagai jaringan. Struktur jaringan dapat sederhana yaitu dibentuk satu

tipe sel, kompleks yaitu dibentuk lebih dari satu tipe sel. Jaringan-jaringan membentuk organ. Morfologi dan anatomi organ bervariasi setiap kelompok tumbuhan dan juga organ tumbuhan dapat mengalami modifikasi, sehingga organ-organ menjalankan fungsi tertentu atau adaptasi tertentu. Macam organ tumbuhan pada tumbuhan pada **Gambar 2.1**.



Gambar 2.1 Organ tumbuhan. (a) Tomat ; (b) Kacang Hijau

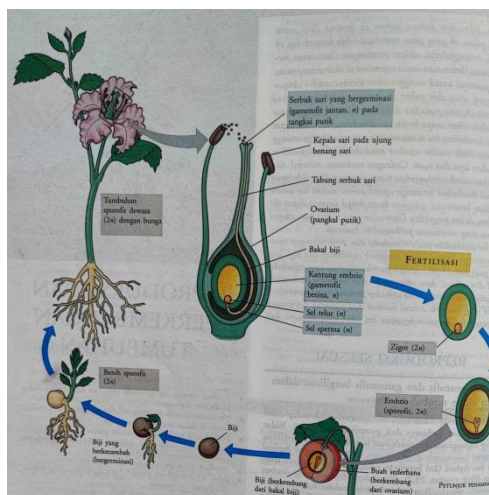
Sumber:a.<https://infosekarang.my.id/bagian-bagian-dari-pohon.tomat.html>;b.<https://repository.uisu.ac.id/bitstream/123456789/1373/3/Chapter%20I%2C%20II.pdf>

2.2 Struktur Umum Tubuh Tumbuhan

Struktur tumbuhan yang menghasilkan biji (Spermatophyta) berawal dari biji. Dalam biji terdapat embrio, selanjutnya biji akan berkecambah bila faktor lingkungan mendukung. Embrio dalam biji memiliki sumbu yang pendek, membentuk dua kutub yaitu radikula (titik tumbuh akar) dan plumulae (titik tumbuh pucuk). Pada sumbu pendek tersebut terdapat kotiledon atau daun lembaga. Pada kotiledon tersedia nutrisi yang diperlukan pada saat perkembangan awal kecambah sebelum akar mampu menyerap air dan nutrisi dari dalam tanah. Nutrisi untuk perkecambahan juga disimpan jaringan khusus yang disebut endosperma. Pada perkecambahan, struktur akar pertama yang muncul adalah akar yang dapat memungkinkan tumbuhan muda tertambat pada tanah dan dapat menyerap air, akar tersebut disebut dengan akar primer dan akan berkembang menjadi akar tunggang, selanjutnya berkembang dengan

terbentuknya cabang-cabang akar atau akar lateral, dan selanjutnya akan terus bercabang-cabang menghasilkan akar lateral tambahan. Pada akar monokotil akar primernya berumur pendek, dan sistem akarnya akan berkembang dari pangkal batang yang muncul dari buku batang yang disebut dengan akar serabut.

Pada perkembangan tumbuhan, tumbuhan muda (perkembangan kecambah) akan terus berkembang menjadi tumbuhan dewasa dan akan menghasilkan bunga. Pada bunga terdapat benang sari (stamen) dan putik (pistillum). Stamen menghasilkan serbuk sari dan putik menghasilkan sel telur yang terdapat pada kantung embrio, dan kedua sel kelamin akan mengalami peleburan menjadi zigot dan zigot berkembang menjadi embrio yang terdapat dalam kantung embrio. Bakal biji dalam ovarium berkembang menjadi biji dan bakal buah (ovarium) menjadi buah (Raven *et al.*, 2013). Gambaran umum siklus hidup angiospermae (**Gambar 2.2**).

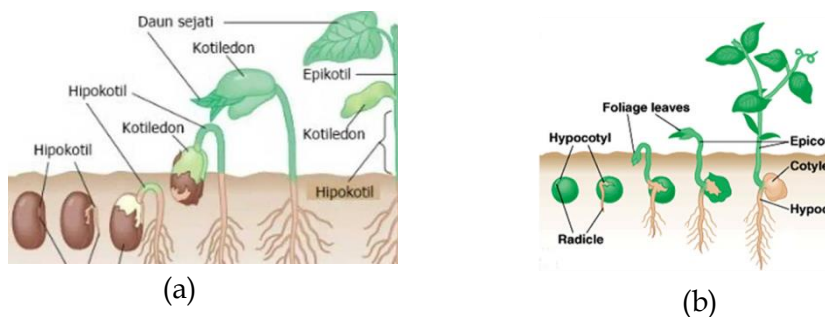


Gambar 2.2 Gambaran umum daur hidup Angiospermae (Sumber: Campbell *et al.*, 1999)

Pada kacang buncis (*Phaseolus vulgaris*) dan jarak (*Ricinus communis*), setelah akar tumbuh dari biji, hipokotil memanjang dan selanjutnya membengkok sehingga ujung pucuk terlindungi dari kerusakan pada saat tertarik dari tanah, setelah tumbuh lurus keatas dengan kotiledon dan plumulae diatas permukaan tanah. Tipe perkecambahan dimana kotiledon terangkat di atas permukaan tanah

disebut *epigeous*. Selama perkecambahan biji dan perkembangan tumbuhan muda (*seedling*), makanan disimpan pada kotiledon dan digunakan sebagai sumber makanan pada tumbuhan muda. Selanjutnya kotiledon mengalami pengurangan ukuran dan layu dan akhirnya rontok, dimana pada saat itu tumbuhan muda tidak lagi tergantung pada makanan yang tersimpan dalam kotiledon.

Pada kacang polong (*Pisum sativum*), epikotil tumbuh memanjang dan membengkok untuk melindungi ujung pucuk dan daun muda pada saat terangkat dari tanah, pemanjangan terjadi di atas kotiledon dan kotiledon tetap berada dalam tanah dan pada akhirnya kotiledon akan membusuk pada saat makanan telah habis digunakan untuk pertumbuhan tumbuhan muda (*seedling*) disebut dengan perkecambahan tipe *hipogeous* (Raven *et al.*, 2013). Tipe perkecambahan pada **Gambar 2.3**.



Gambar 2.3 Tipe perkecambahan : (a) Tipe epigeous pada kacang buncis, (b) Tipe hipogeous pada kacang polong (Sumber: Campbell *et al.*, 1999)

Biji pada jagung dan umum pada Gramineae, kecambah akan menembus tanah dengan koleoptil membungkus tunas embrionik mendesak naik keatas menembus tanah ke udara, kemudian ujung tunasnya (*shoot*) tumbuh lurus ke atas melalui saluran pada koleoptil tubuler (Campbell *et al.*, 1999). Cara munculnya pucuk (*shoot*) selama perkecambahan bervariasi dari berbagai jenis tumbuhan.

Pada kondisi lingkungan yang cocok, biji akan berkecambah selanjutnya berkembang menjadi tumbuhan muda (*seedling*). Pada peristiwa perkecambahan, tumbuhan muda dengan akar (*root*) yang tumbuh dalam tanah, serta pucuk (*shoot*) dengan batang dan daun-daun

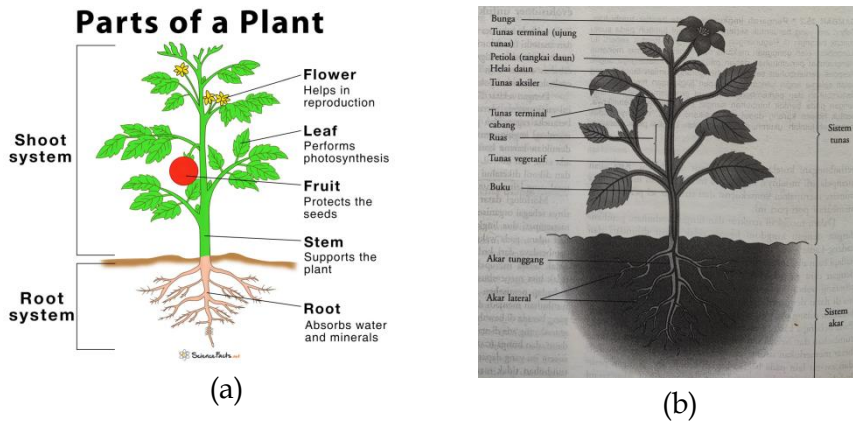
di atas tanah. Pertumbuhan akar dan pucuk disebabkan oleh pembentukan sel-sel baru oleh jaringan meristem, kemudian sel-sel hasil pembelahan akan mengalami pertumbuhan dan difensiasi sel-sel. Bila tanaman telah dewasa, dihasilkan bunga dan selanjutnya terjadi penyerbukan dan fertilisasi, dan terbentuk buah dan biji dan seterusnya (daur hidup).

Organ tumbuhan terdiri atas terdiri dari akar, batang, daun, bunga, buah dan biji. Organ dibentuk oleh jaringan-jaringan yaitu: meristem, parenkim, kolenkim, sklerenkim, xilem, floem, kambium, kambium gabus, epidermis, dan jaringan sekretori. Jaringan dibentuk sel-sel yang asal usulnya sama atau berasal dari sel induk yang sama dan memiliki fungsi tertentu. Setiap sel hidup dibentuk oleh bahan hidup yang disebut protoplasma, dan dilindungi oleh dinding sel. Akar berfungsi menancapkan tanaman pada tanah, menyerap air dan garam-garam mineral, juga penyimpanan makanan cadangan. Pucuk (*shoot*) dibentuk oleh batang dan daun-daun. Daun dan bagian tubuh tumbuhan yang berwarna hijau akan menghasilkan makanan (karbohidrat) melalui fotosintesis, dan mengeluarkan air melalui proses penguapan. Pada ujung pucuk dan ujung akar terdapat meristem apikal. Meristem tersebut membelah menghasilkan sel baru, selanjutnya sel baru hasil pembelahan mengalami diferensiasi menjadi jaringan tertentu dan menjalankan fungsi khusus atau fungsi tertentu. Pembelahan sel meristem menyebabkan pertambahan panjang pada pucuk dan pada akar. Baik pada ujung akar maupun tunas pucuk terdapat meristem apikal, yang sel-selnya mampu membelah menghasilkan sel-sel baru. Sel-sel tersebut akan membelah membentuk tunas baru atau cabang, serta menambah panjang batang atau akar (Evert, 2006).

13 Tumbuhan mempunyai sistem akar (*root*) dan sistem pucuk (*shoot*). Sistem pucuk terdiri atas batang utama yang menyangga daun, bunga dan alat-alat tumbuhan lainnya. Batang berfungsi sebagai penghubung berbagai organ tumbuhan. Air dan garam-garam dari dalam tanah diangkut melalui buluh kayu (*xilem*) pada batang, sedang makanan yang disintesis pada daun diangkut melalui buluh tapis (*floem*) keseluruhan bagian tubuh tumbuhan (Campbell *et al.*, 1999).

56 Tubuh tumbuhan secara morfologi terdiri atas unit sel-sel, yang dilindungi oleh dinding, dan masing-masing sel dengan mengadakan

suatu kesatuan dengan adanya substansi antar sel. Tubuh tumbuhan disusun oleh kelompok sel-sel yang secara struktur dan fungsi berbeda dengan kelompok sel yang lain disebut jaringan. Struktur jaringan dapat bersifat sederhana, terdiri atas satu tipe sel, juga dapat bersifat kompleks yaitu terdiri atas lebih dari satu tipe sel (Evert, 2006). Sistem akar dan sistem pucuk dapat dilihat pada **Gambar 2.4**.



Gambar 2.4 (a) Sistem akar (*root system*); (b) sistem pucuk (*shoot system*)
 (Sumber: a. <https://mercusuar.co/2022/08/08/bagian-utama-tumbuhan/9> Juli 2024; b. Campbell *et al.*, 2003)

2.3 Sistem Akar dan Sistem Pucuk

Pada tumbuhan berbunga sistem akar berfungsi menancapkan ke dalam tanah, menyerap air, menyerap nutrisi tumbuhan yang terlarut dalam tanah, juga tempat penyimpanan makanan cadangan. Sistem pucuk terdiri dari batang, cabang, dan ranting-ranting penyangga daun, dan juga bunga dan buah. Istilah pucuk ini merupakan istilah kolektif seluruh bagian tumbuhan yang berada di atas permukaan tanah, terdiri dari batang utama, cabang, ranting, daun, bunga, buah dan biji, dan alat-alat tumbuhan lainnya. Batang berfungsi untuk penunjang dan penghubung organ tumbuhan. Air dan seluruh zat terlarut (unsur hara) di dalamnya akan diangkut keseluruh bagian tanaman melalui batang. Hasil fotosintesis pada daun dan bagian lainnya yang berwarna hijau (misal batang dan cabang muda) diangkut keseluruh bagian tubuh tumbuhan untuk digunakan ataupun disimpan juga diangkut melalui batang. Air

dan unsur hara dari dalam tanah diangkut ke daun dan bagian organ lainnya melalui buluh kayu (*xilem*), sedang hasil-hasil fotosintesis pada daun diangkut keseluruhan tubuh tumbuhan dan tempat penyimpanan makanan cadangan dalam organ tumbuhan yaitu melalui buluh tapis (*floem*) (Lovelles, 1991).

2.4 Pertumbuhan Tanaman

Pertumbuhan awal dan pertumbuhan memanjang batang dan akar pada tubuh tumbuhan disebut pertumbuhan primer dan tubuh yang dibentuk disebut tubuh primer dan jaringan yang dibentuk disebut jaringan primer. Spermatophyta dikotil memiliki jaringan primer dan jaringan sekunder, sedangkan pada monokotil hanya mempunyai jaringan primer. Pertumbuhan primer menyebabkan batang, cabang, dan ranting-ranting dan akar (ujung akar dan cabang akar) bertambah panjang, sedangkan pertumbuhan sekunder menyebabkan akar dan batang diameternya bertambah lebar. Pertumbuhan primer disebabkan oleh meristem apikal (meristem ujung), dan meristem interkalar (pada tumbuhan beruas), sedangkan pertumbuhan sekunder disebabkan oleh aktifitas meristem lateral yaitu kambium pembuluh dan kambium gabus. Sel-sel kambium pembuluh membelah kearah dalam menghasilkan jaringan buluh kayu (*xilem* sekunder), dan ke arah luar menghasilkan jaringan buluh ayak (*floem* sekunder) dan menyebabkan diameter batang, cabang dan akar bertambah. Jaringan xilem berfungsi untuk mengangkut air dan garam-garam dari dalam tanah, dan juga berfungsi sebagai penguat atau penyokong karena dinding selnya tebal dan berlapis-lapis (Evert, 2006).

Kambium terdapat di dalam berkas pengangkut, dan sebagian dari parenkim intervasikuler. Pada waktu terjadi pertumbuhan sekunder, sel-sel meristem apikal yang terdapat dibagian ujung, tidak terganggu sifat merismatiknya karena adanya aktifitas meristem lateral, tetapi berjalan simultan yaitu tumbuhan bertambah panjang, juga diameternya bertambah. Pembentukan sel-sel baru di daerah apikal, pembentukan tunas dan percabangan, menyebabkan penambahan panjang batang, sedang pertumbuhan sekunder menambah diameter batang dan akar. Pertumbuhan sekunder juga menyebabkan pembentukan jaringan gabus,

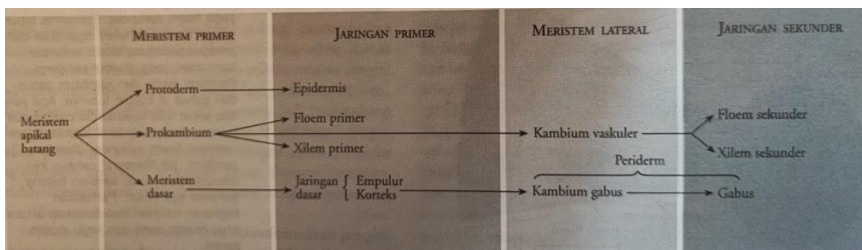
kambium gabus atau felogen dan juga parenkim gabus. Jaringan gabus berfungsi mengganti epidermis batang maupun akar yang telah rusak karena penambahan menebal organ akar dan batang akibat pertumbuhan sekunder (Evert, 2006).

Tubuh primer tumbuhan, terdiri dari tiga sistem jaringan yaitu jaringan dermal (epidermis), jaringan pembuluh (vaskuler), dan jaringan dasar. Pertumbuhan primer disebabkan karena adanya meristem apikal pada akar dan pucuk, serta meristem interkalar pada tumbuhan yang memiliki ruas-ruas. Meristem apikal pada pucuk dan meristem interkalar menyebabkan pemanjangan pada batang, sedangkan meristem apikal pada akar menyebabkan pemanjangan pada akar. Pertumbuhan sekunder yaitu merujuk pada penambahan diameter batang atau akar, yang terjadi pada tumbuhan berpembuluh (*gymnospermae* dan *angiospermae*) dan biasanya dimulai setelah terbentuknya jaringan dasar atau primer (Raven *et al.*, 1992).

Pertumbuhan sekunder disebabkan terjadi karena adanya meristem lateral yaitu kambium pembuluh dan kambium gabus. Proses pertumbuhan sekunder melibatkan dua aktivitas utama yaitu: 1). Pembelahan kambium pembuluh, yaitu jaringan dewasa yang bersifat meristematik, yaitu sel-sel penyusunnya mampu membelah dan berkembang menjadi jaringan baru yang terletak diantara sel-sel pembentuk kayu (xilem) dan sel-sel pembentuk kulit kayu (floem) batang dan akar. Kambium pembuluh membentuk sel-sel baru yang menambah diameter batang atau akar. Kambium pembuluh (kambium vaskuler) ditemukan pada tumbuhan berpembuluh, membelah menjadi dua jenis sel yaitu sel-sel xilem yang membentuk sel-sel kayu pada bagian dalam dan sel-sel floem yang membentuk sel-sel kulit kayu pada bagian luar. 2). Pertumbuhan pembuluh kayu (xilem) yaitu proses ini melibatkan penambahan lapisan-lapisan kayu dan menghasilkan pertumbuhan radial, dimana lapisan-lapisan baru ini disebut sebagai lingkaran tahunan, dan dapat dilihat sebagai lingkaran pertumbuhan pada potongan lintang batang atau akar, sedangkan sel-sel kulit kayu akan terus bertambah, tetapi pada saat yang sama juga mengalami kerusakan sejalan dengan bertambahnya diameter batang. Kambium gabus adalah tipe kambium sekunder yang terdapat pada tumbuhan tertentu, terutama pada beberapa spesies pohon tertentu seperti pohon-pohon berkambium gabus (Fahn,

1982). Kambium gabus berbeda dari kambium vasikuler yang biasa terdapat pada batang tumbuhan berkayu. Kambium gabus terletak di bagian dalam kulit kayu (*phellogen*), yang berada di bawah epidermis. Fungsinya adalah untuk menghasilkan jaringan gabus atau felogen yang akan menjadi kulit gabus (*cork*) di luar dan feloderm di dalam (Fahn, 1982). Kambium gabus adalah kulit gabus atau *cork* yang berfungsi sebagai lapisan luar yang melindungi batang tumbuhan dari kerusakan fisik, infeksi, dan dehidrasi. *Cork* juga membantu dalam regulasi suhu dan melindungi tumbuhan dari kebakaran dan hewan herbivora.

Pertumbuhan primer sebagai akibat adanya meristem apikal, menghasilkan meristem primer dimana sel-selnya secara terus menerus melakukan pembelahan menghasilkan protoderm, prokambium, dan meristem dasar, yang masing-masing menghasilkan jaringan dermal (epidermis), jaringan pembuluh, dan jaringan dasar pada tumbuhan. Meristem primer menghasilkan jaringan primer yaitu jaringan pelindung (epidermis dan derifatnya), jaringan pengangkut (floem primer dan xilem primer), dan jaringan dasar (parenkim pada korteks, dan empulur). Untuk memahami pertumbuhan primer dan pertumbuhan sekunder **Gambar 2.5** dan **Gambar 2.6**.

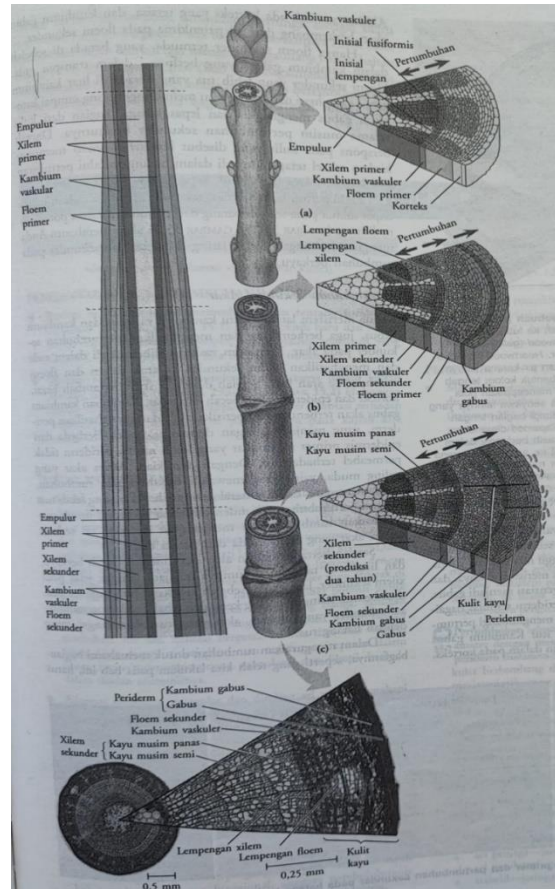


Gambar 2.5 Pertumbuhan primer dan pertumbuhan sekunder pada batang

(Sumber : Campbell *et al.*, 2003; Raven *et al.*, 1992)

Dari **Gambar 2.5** menunjukkan bahwa seluruh jaringan pada batang tubuh tumbuhan berasal sel meristem apikal. Meristem apikal akan membelah menghasilkan tiga bagian meristem primer yaitu protoderm, prokambium, dan meristem dasar. Prokambium menghasilkan kambium dan meristem dasar dimana sel-selnya menghasilkan kambium gabus,

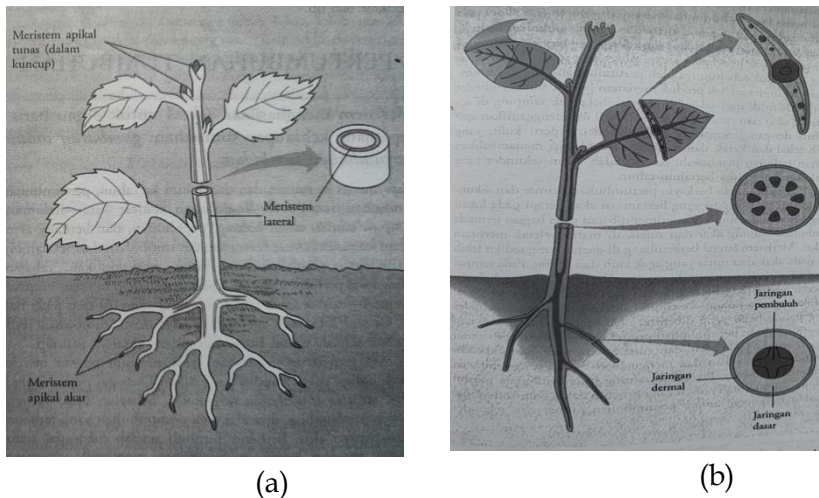
dimana sel-selnya masih bersifat meristematik, sehingga disebut meristem lateral yang letaknya dibagian tepi sumbu tubuh tumbuhan.



Gambar 2.6 Pertumbuhan primer dan pertumbuhan sekunder pada batang
(Sumber: Campbell *et al.*, 2003)

Meristem apikal akar terletak pada ujung akar, berfungsi menghasilkan meristem primer akar dan meregenerasi tudung akar dan menyebabkan pertambahan panjang akar. Meristem lateral pada akar menyebabkan penambahan diameter batang akar dan cabang akar pada akar tunggang. Meristem lateral pada akar sama dengan meristem laretal pada batang yaitu kambium vasikuler dan kambium gabus (felogen). Kambium pembuluh pada akar membelah menghasilkan jaringan

pembuluh sekunder (xilem dan floem sekunder) dan Felogen menghasilkan gabus dan parenkim gabus yang berfungsi sebagai jaringan pelindung pada bagian akar yang telah mengalami penambahan diameter. Xilem sekunder, floem sekunder, dan gabus disebut jaringan sekunder. Meristem berdasarkan letaknya (**Gambar 2.7a**), hubungan jaringan pembuluh pada akar, batang dan daun (**Gambar 2.7b**).



Gambar 2.7 (a) Letak meristem; (b) Jaringan pembuluh akar, batang dan daun

(Sumber: Campbell *et al.*, 2003; Raven *et al.*, 1992)

2.5 Akar Tumbuhan

Salah satu bagian tumbuhan yang memiliki jaringan pengangkut adalah akar. Fungsi utama akar yaitu menyerap air, unsur hara dari tanah, dan menunjang berdirinya tubuh tumbuhan di atas permukaan tanah. Selain itu akar juga berfungsi sebagai tempat penyimpanan cadangan makanan seperti pada kentang (*Daucus carota*), singkong *Manihot utilisimma*), Uwi (*Dioscorea*), dan ubi jalar (*Ipomoea batatas*). Akar pada umumnya berada dalam tanah, tidak memiliki pigmen hijau (berklorofil), punya buluh-buluh akar unisel. Meristem apikal akar berfungsi mengontrol pertumbuhan dan diferensiasi akar. Pada ujung akar terdapat tudung akar (*caliptra*), fungsinya melindungi titik tumbuh akar (meristem) dari kerusakan pada akar menembus subtrat (tanah). Akar adalah

perkembangan calon akar (*radicula*) embrio pada biji. Calon akar berkembang menjadi akar utama (akar primer).

Pada saat biji berkecambah *radicula* (calon akar pada embrio) tumbuh dan berkembang dengan percabangan dengan ukuran lebih kecil dari batang akar utama menjadi sistem akar tunggang, dan menjadi ciri dikotil dan gymnospermae. Sedangkan akar primer yang tidak berumur panjang setelah *radicula* berkembang karena segera mengering dan meluruh, dan selanjutnya pada pangkal batang tumbuh akar baru seperti benang-benang (serabut) yang disebut dengan akar adventif, membentuk sistem akar serabut dimana sistem akar tersebut menjadi sistem akar serabut (Evert, 2006). Akar tersusun oleh 3 sistem jaringan pokok, yaitu epidermis, korteks, dan silinder pembuluh (*stele*) (Raven, 2013).

Akar dikotil dan gymnospermae struktur dari luar ke dalam yaitu epidermis, korteks, eksodermis, endodermis, perisikel, dan silinder pembuluh dan pada ujung akar dilindungi oleh tudung akar (*caliptra*). Epidermis dibentuk selapis sel dengan dinding tipis, permukaan dilapisi kutikula dan terletak paling luar. Disebelah dalam epidermis terdapat korteks terdiri dari sel-sel parenkim dengan dinding tipis, dan seringkali didalamnya terdapat butiran pati. Disebelah bawah epidermis terdapat sel-sel korteks yang mengandung suberin dan berbeda dengan sel-sel korteks dibawahnya disebut *eksodermis*. Lapisan terdalam dari sel-sel korteks tersusun rapat tanpa adanya rongga antar sel disebut *endodermis*. Pada silinder pembuluh terdapat lingkaran tepi dan memiliki jaringan pembuluh. Lingkaran tepi tersebut dibentuk sel-sel parenkim disebelah dalam dan berdampingan dengan endodermis, berfungsi membentuk akar lateral yang disebut perisikel. Silinder pembuluh terdiri dari xilem, floem, dan kambium (Fahn, 1991).

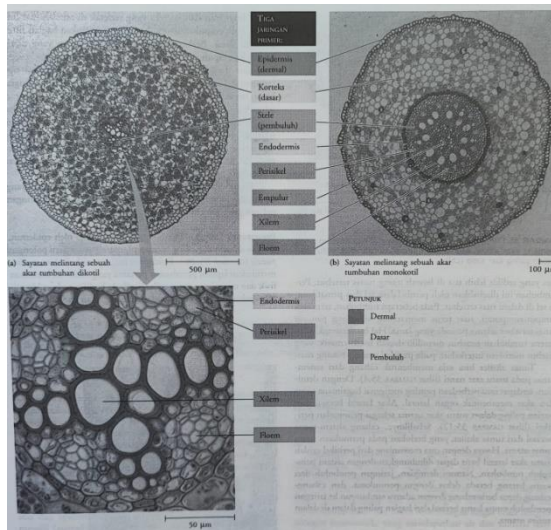
Berdasarkan bentuk, modifikasi dan fungsinya, akar tumbuhan ada beberapa macam yaitu : 1) Akar tunggang (*radix primaria*) yaitu akar dengan batang akar tumbuh lurus ke dalam tanah dengan cabang-cabang akar-akar lateral, contoh tomat, bayam, pepaya, dan tumbuhan berkayu; 2) Akar serabut (*radix adventitia*), adalah akar adventif berbentuk benang-benang, tumbuh dari pangkal batang, umum pada tumbuhan monokotil, contoh: padi, rumput, jagung; 3) Akar gantung berupa akar adventif yang berukuran besar tumbuh atau muncul dari batang atau cabang tumbuh menggantung di atas permukaan tanah, contoh beringin, 4) Akar napas

(pneumatofora) yaitu akar-akar muncul dipermukaan tanah (lumpur) atau air untuk membantu respirasi di lingkungan yang tergenang air, contoh: pohon api-api/*Avicennia alba* (mangrove); 5) Akar penghisap (haustorium), yaitu akar berfungsi menyerap makanan atau nutrisi dari inang, biasanya pada tumbuhan parasit, contoh: benalu, tali putri; 6) akar penyimpanan (akar ubi), yaitu akar dimana didalamnya terdapat cadangan makanan atau menyimpan cadangan makanan, contoh singkong; 7) akar penunjang yaitu akar yang muncul diatas pangkal batang ke tanah untuk memberikan dukungan tambahan pada tumbuhan yang besar dan berat, contoh pandang, bakau; 8) Akar penopang atau juga disebut akar papan (buttress roots) yaitu akar yang muncul pada pangkal batang, melebar dan membesar ke samping dan menonjol pada permukaan tanah, memberikan dukungan struktural pada pohon besar supaya tidak mudah tumbang, contoh pohon besar misalnya *Ficus* (Tjitrosoepomo, 2010). Jenis-jenis akar ini menunjukkan adaptasi tumbuhan terhadap lingkungan untuk mendapatkan air, nutrisi, dan dukungan struktural yang diperlukan untuk pertumbuhan dan kelangsungan hidup (Tjitrosoepomo, 2010). Sistem akar utama ada dua macam yaitu sistem akar tunggang dan sistem akar serabut. Kedua macam sistem akar tersebut memiliki struktur mirip, karena melakukan fungsi dasar yang sama yaitu penyerapan air dan nutrisi serta dukungan struktural. Meskipun struktur dasar akar serabut dan akar tunggang mirip, perbedaan utama terletak pada bentuk dan pola percabangannya, yang mencerminkan adaptasi evolusioner terhadap kebutuhan spesifik dari jenis tumbuhan tersebut (Tjitrosoepomo, 2010).

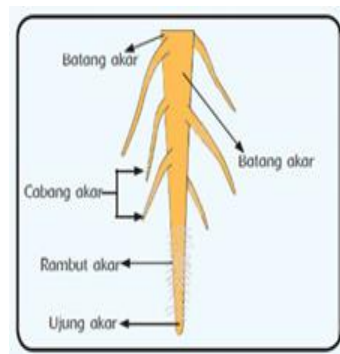
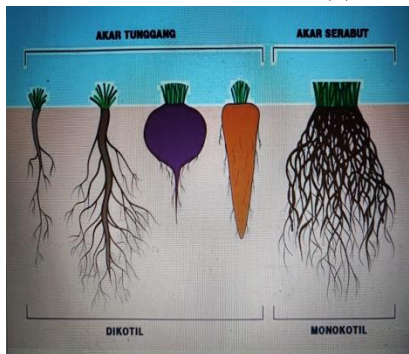
Akar tunggang memiliki bagian-bagian yaitu : 1) Pangkal akar (*collum*), adalah bagian penghubung akar dengan batang; 2) Batang akar (*corpus radices*), adalah bagian akar yang tumbuh memanjang ke bawah atau ke dalam tanah; 3) Akar lateral (*radix lateralis*) yaitu cabang-cabang dari batang akar; 4) Ujung akar (*apex radices*), yaitu bagian paling ujung dari akar sebagai zona meristem; 5) Tudung akar (*caliptra*), yaitu struktur pelindung ujung akar saat menembus tanah; 6) Rambut akar (*pilus radices*), yaitu struktur halus untuk ruang penyerapan akar terhadap air dan nutrisi (Tjitrosoepomo, 2010).

Akar serabut adalah sistem akar dibentuk oleh akar berbentuk benang-benang atau serabut yang banyak tumbuh dari pangkal batang,

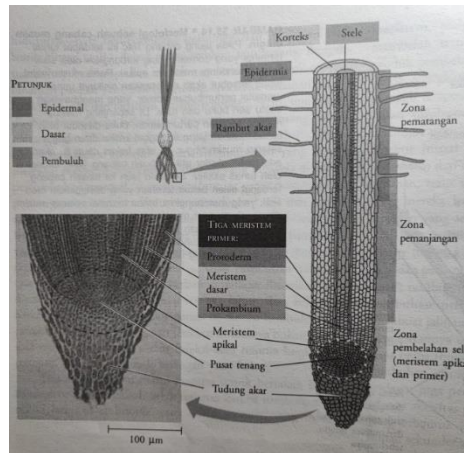
biasanya terdapat pada tumbuhan monokotil. Bagian-bagiannya mirip dengan akar tunggang tetapi tanpa akar utama yang dominan (Tjitrosoepomo, 2010). Bagian-bagian akar serabut adalah 1) **Pangkal akar (collum)**, yaitu penghubung antara akar dengan batang; 2) Serabut akar **utama** yaitu akar berbentuk benang-benang atau muncul dari pangkal batang; 3) **Akar lateral** yaitu akar kecil berbentuk benang pendek, muncul dari akar serabut utama; 4) **Ujung akar (apex radice)**, yaitu bagian paling ujung dari akar serabut, meliputi beberapa zona seperti pada akar tunggang; dan 5) Tudung akar (*Calyptra*); 6) **Rambut akar (pilus radice)**, yaitu struktur halus yang meningkatkan permukaan akar untuk penyerapan air dan nutrisi (Hidayat, 1994, Tjitrosoepomo, 2010). Struktur akar, akar tunggang dan akar serabut (**Gambar 2.8a; Gambar 2.9**).



(a)



(b) (c)
Gambar 2.8 (a) Anatomi akar dikotil dan monokotil; (b) Akar tunggang dan Akar serabut; (c) bagian-bagian akar tunggang
 (Sumber: (a) Campbell *et al.*, 2003); b. <https://www.mastah.org/akar-serabut/>



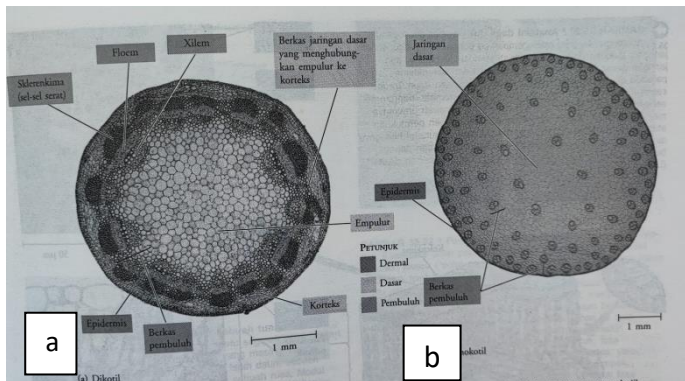
Gambar 2.9. Bagian-bagian akar pada pertumbuhan primer akar
 (Sumber: Campbell *et al.*, 2003)

2.6 Batang Tumbuhan

Batang adalah bagian tumbuhan yang umum ada di atas tanah, tetapi beberapa tumbuhan dengan modifikasi batang berada dalam tanah. Batang dicirikan sebagai sumbu utama tumbuhan di atas permukaan tanah dengan buku dan ruas yang jelas, ataupun tanpa buku yang jelas. Batang juga amat pendek dan daunnya tersusun rapat membentuk roset, baik roset akar maupun roset batang.

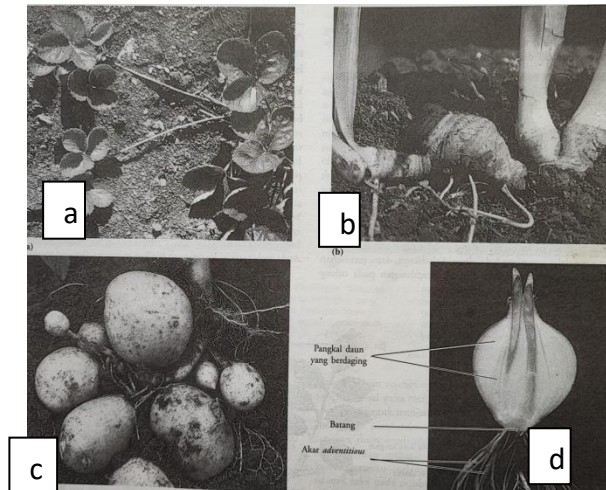
Struktur batang tumbuhan berpembuluh sangat bervariasi. Batang tumbuhan memiliki tiga jaringan utama yaitu jaringan dermal/pelindung (epidermis), jaringan dasar (korteks dan empulur) dan jaringan pengangkut (xilem dan floem) (**Gambar 2.10**). Pada *Coniferae*, *Dicotyledoneae*, jaringan pembuluh berbentuk silinder, disebelah luar dibatasi oleh korteks, dan sebelah dalam adalah empulur. Sistem jaringan pembuluh pada batang primer berupa berkas-berkas dan terpisah satu

sama lain dan dinamakan ikatan pembuluh. Parenkim diantara dua ikatan pembuluh yang bedampingan disebut *parenkim intervasikuler* atau *jari-jari empulur* (Raven *et al.*, 1992). Ikatan pembuluh pada batang yang tersusun dalam lingkaran yaitu pada Gymnospermae dan Dicotyledoneae, sedangkan ikatan pembuluh yang letaknya tersebar yaitu pada Monocotyledonea.



Gambar 2.10 (a) Struktur batang dikotil dan gymnospermae; (b) struktur batang monokotil
(Sumber: Campbell *et al.*, 2003)

Batang tumbuhan juga mengalami perubahan bentuk sehingga fungsinya berubah. Modifikasi batang yaitu berupa 1) sulur merupakan modifikasi cabang yaitu pada kacang panjang, pare, timun; 2) umbi pada kentang, ubi jalar; 3) umbi lapis pada bawang; 4) geragih pada teki, semanggi, strowberi; 5) duri pada jeruk; 5) rimpang pada keluarga Zingiberacea (Riastuti, 2020). Gambar beberapa modifikasi batang (**Gambar 2.11**)



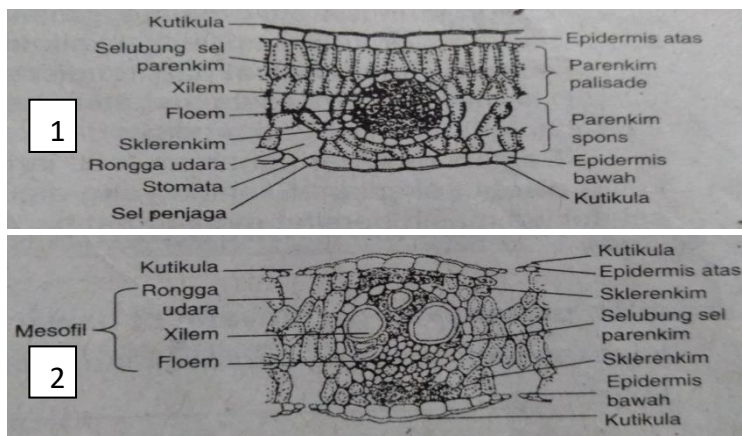
Gambar 2.11 (a) Modifikasi batang; (b) Stolon/geragih pada stroberi; (c) Rhizoma/rimpang pada jahe; (d) Umbi pada kentang; (e) Umbi lapis pada bawang (Sumber: Campbell *et al.*, 2003)

2.7 Daun Tumbuhan

Daun salah satu organ yang beragam secara anatomi dan morfologi. Susunan jaringan pengangkut pada tangkai dan tulang daun, terdapat kemiripan dengan jaringan pengangkut pada batang, perbedaan dalam hal ukurannya, yaitu pada pada batang lebih besar pada batang dibanding jaringan pengangkut pada tangkai dan tulang daun. Salah satu karakteristik daun adalah pertumbuhan terbatas, yaitu pada ukuran tertentu pertumbuhannya terhenti. Daun disusun oleh jaringan dermal (epidermis), jaringan dasar (mesofil) dan jaringan pengangkut, tetapi kambium pembuluh tidak berkembang, oleh karena itu daun tidak penebalan sekunder (Raven *et al.*, 1992).

Keberadaan epidermis pada daun bersifat permanen sampai gugurnya daun. Sel epidermis daun tersusun kompak dan permukaannya dilapisi kutikula, dan juga celah daun (stomata). Stomata dapat berada pada permukaan atas dan bawah daun disebut daun *amfistomatik*; dapat juga hanya pada permukaan atas daun, disebut daun *Hipostomatik*. Pada dikotil berdaun lebar letak stomata tidak beraturan (tersebar), pada monokotil dan gymnospermae stomata terletak berderet sejajar dengan sumbu daun. Mesofil disusun oleh parenkim terletak di antara epidermis

atas dan epidermis bawah, kaya klorofil sehingga area untuk fotosintesis. Mesofil pada daun dikotil terdiferensiasi menjadi parenkim palisade berbentuk tiang dan parenkim spons yang susunannya seperti bunga karang dengan adanya ruang-ruang diantaranya, mengandung sedikit kloroplas. Bentuk sel-sel palisade menyerupai tiang-tiang yang kompak dan tersusun rapat yang kedua ujungnya mengarah pada sel-sel, menempati setengah sampai dua pertiga mesofil, banyak mengandung kloroplas. Jaringan pengangkut (jaringan pembuluh) letaknya tersebar diseluruh helaian daun (Raven *et al.*, 1992). Berkas pengangkut berada dalam daun tulang daun dan pertulangan daun berada dalam daging daun dan disebut sistem pertulangan daun. Pertulangan pada daun ada dua pola, yaitu sistem pertulangan berbentuk jala dan sistem pertulangan daun sejajar. Susunan daun dari permukaan atas sampai permukaan bawah daun (**Gambar 2.12**).

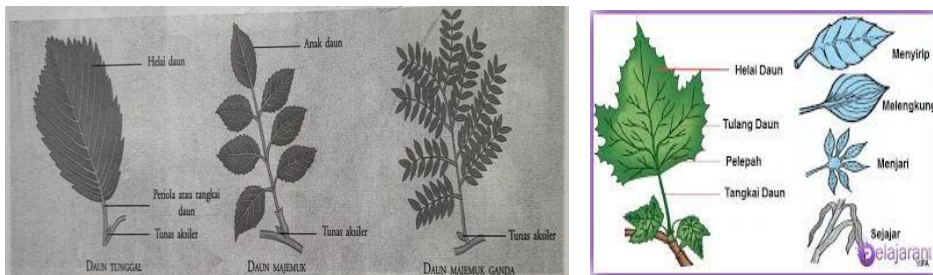


Gambar 2.12. Potongan melintang (1) Dicotyledoneae; (2) Monocotyledoneae.

(Sumber: <https://m.nyambungterus.com/dalam/post/struktur-anatomi-daun-dikotil-dan-monokotil/>)

Secara morfologi daun terdiri atas tiga bagian yaitu pelepah daun (vagina), tangkai daun (petiolus), dan helaian daun (lamina). Berdasarkan kelengkapan bagian daun, daun ada dua macam yaitu daun lengkap (bila ketiga bagian daun ada) dan daun tidak lengkap yaitu bila salah satu bagian dari ketiga bagian daun tidak ada. Berdasarkan jumlah helaian

daun, maka dikenal daun tunggal, daun majemuk, daun majemuk ganda. Daun tunggal bila pada tangkai daun hanya memiliki helaian daun tunggal dan muncul dari buku batang, contoh daun mangga (*Mangifera indica*). Daun majemuk bila pada satu tangkai terdapat lebih dari satu helaian anak daun (leaflet), dimana pada satu ibu tangkai daun muncul beberapa anak daun, contoh daun gamal (*Gliricidia sepium*), Kersen (*Muntingia calabura*). Daun Majemuk ganda bila ibu tangkai (tangkai utama) daun, akan bercabang lagi (cabang ibu tangkai) dimana duduk anak daun (leaflet), contoh pada daun kelor (*Moringa oleifera*) (Hidayat, 1994, Tjitrosoepomo, 2010). Berdasarkan macam pertulangan helaian daun, maka daun bertulang daun menyirip, melengkung, menjari, dan sejajar (**Gambar 2.13**).

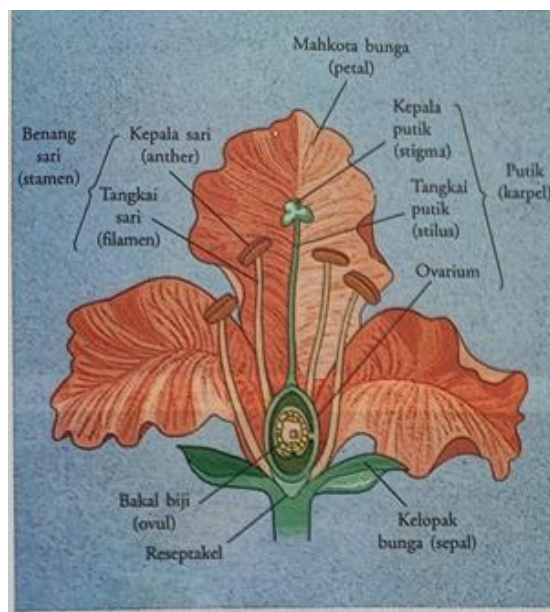


Gambar 2.13 Morfologi daun.
(Sumber: Campbell *et al.*, 2003)

2.8 Bunga

Bunga adalah salah satu organ, berfungsi pada reproduksi tanaman. Memiliki bagian steril (bukan sel kelamin) dan bagian fertil (untuk perkembangbiakan) yang duduk pada tangkai bunga (*pedicelus*) dan dasar bunga (*receptakulum*). Bunga duduk pada sumbu batang batang atau ranting, pada ketiak daun pada buku batang atau ranting. Batang mengalami modifikasi dengan ruas-ruas batang menjadi sangat yang pendek yang ditempati atau munculnya bunga dengan tangkai bunga (*pedicelus*). Bunga memiliki bagian-bagian yaitu tangkai bunga (*pedicelus*), dasar bunga (*receptakulum*), kelopak (*calyx*), mahkota (*corolla*), benang sari (*stamen*), dan putik (*pistillum*). Kelopak terdiri dari daun-daun kelopak

(*sepalae*), mahkota terdiri dari daun-daun mahkota (*petalae*). Jika antara kelopak dan mahkota disusun oleh daun-daun yang bentuk dan warnanya mirip, maka bagian demikian disebut Tenda bunga (perigonium) yang disusun oleh daun-daun tenda bunga (*tepalae*). *Calyx*, *corolla*, dan perigonium adalah bagian bunga yang steril. Benang sari (*stamen*) dan putik (*pistillum*) adalah bagian bunga fertil berfungsi pada reproduksi tanaman. Keseluruhan stamen disebut androsium dan keseluruhan putik disebut ginesium. Benang sari terdiri atas tangkai benang sari (*filamentum*), dan kepala sari (*anthera*), sedang putik terdiri dari kepala putik (*stigma*), tangkai putik (*stylus*), dan bakal buah (*ovarium*) (Hidayat, 1994, Tjitrosoepomo, 2010). Morfologi bunga secara detail pada **Gambar 2.14**.



Gambar 2.14 Bagian-bagian bunga
(Sumber: Campbell *et al.*, 2003)

Kepala sari (*anthera*) terdiri dari dua bagian yaitu bagian penghubung kepala sari disebut konektivum dan 4 lobus kotak spora (sporangium). Dalam kotak sporangium terdapat serbuk sari (butir pollen). Putik disusun oleh daun-dau buah (*carpella*). Kumpulan daun-daun buah membentuk ovarium (bakal buah). Bakal biji (ovulum) melekat pada bagian dinding bakal buah yang disebut plasenta (Hidayat, 1994,

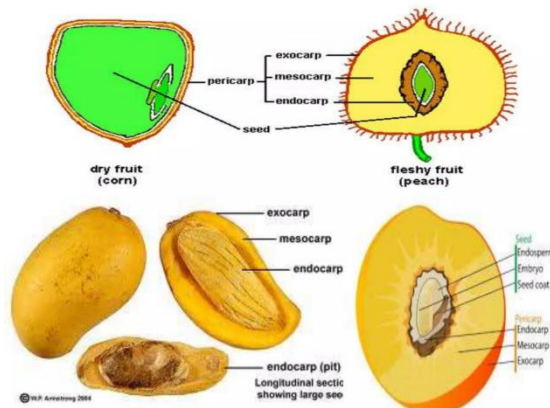
Tjitrosoepomo, 2010). Bakal biji (ovulum) berada dalam bakal buah (ovarium) yang berada dalam dinding bakal buah dengan tangkai bakal biji (*funikulus*). Bakal biji terdiri dari kulit bakal biji (*integumen*), dan sel telur, sel sinergid, inti kutup dan sel antipoda, dan juga celah kecil yang disebut mikropil sebagai tempat lewatnya tabung serbuk sari mencapai sel telur saat fertilisasi (Raven *et al.*, 1992; Evert, 2006; Tjitrosoepomo, 2010).

2.9 Buah dan Biji

Buah dan biji adalah bagian yang tidak terpisahkan satu sama lain, dimana biji berada dalam buah (biji adalah bagian dari buah). Buah dan biji berasal dari perkembangan ovarium (bakal buah) dan bakal biji (ovulum) setelah terjadi fertilisasi dan terbentuk zigot. Setelah terbentuk zigot maka bakal buah berkembang menjadi buah (*fructus*) dan bakal biji menjadi biji (semen). Dalam biji terdapat calon individu baru (embrio). Zigot yang terdapat dalam biji juga berkembang menjadi embrio. Pada saat perkembangan bakal buah menjadi buah dan bakal biji menjadi biji, bagian perhiasan bunga, dan kelopak akan mengering dan gugur (Tjitrosoepomo, 2010). Pada tumbuhan tertentu, misal pada pisang (*Musa paradisiaca*), tomat, dan manggis merupakan contoh tanaman yang bersifat partenokarpi alami buah terbentuk tanpa adanya fertilisasi, tetapi biji tidak berkembang (biji tanpa embrio) yang disebut partenokarpi. Partenokarpi dengan biji tanpa dengan penyerbukan atau polinasi misalnya pada pisang, jeruk, labu, dan tomat, terjadi secara alamia, tetapi partenokarpi dapat juga terjadi secara buatan dengan menggunakan hormon pertumbuhan tanaman, memanfaatkan sinar iradiasi polen, merubah jumlah kromosom (Rezaldi, 2019).

Dinding buah sering dibedakan atas tiga lapisan yaitu: *eksocarp* yang juga dinamakan *epikarp* atau kulit luar; *mesocarp* yang berupa daging buah; dan *endocarp* yaitu bagian paling dalam yang biasanya keras (Tjitrosoepomo, 2010). Berdasarkan histologinya dinding buah, maka buah dapat digolongkan menjadi *buah kering* dan *buah berdaging*. Buah kering adalah buah dengan dinding buah (perikarp) mengering ketika matang. Buah kering dinding dengan dinding buah kering dan mengeras, contohnya adalah gandum, jagung, padi, kacang tanah, buah kapuk. Buah berdaging adalah buah dengan dinding buah (perikarp) tebal, berdaging,

mengandung air ketika matang. Buah berdaging terdiri dari buah buni dan buah batu. Buah buni dengan perikarp tebal dan berair, dinding buah dibagi atas tiga bagian yaitu 1) lapisan paling luar, mengandung pigmen pada saat buah masak disebut *eksokarpium*; 2) lapisan tengah, dengan daging tebal, berair, lembut disebut *mesokarpium*, 3) lapisan paling dalam berupa selaput berbatasan dengan daging yang tebal dan terletak bagian dalam disebut *endokarpium* (Tjitrosoepomo, 2010). Pada buah yang perikarpnya tebal dan berdaging berdaging terdapat biji-biji berukuran kecil, contoh pada anggur, tomat. Buah batu yaitu buah yang endokarpiumnya tebal dan keras, misalnya pada buah mangga dan buah kelapa. Bagian-bagian buah berdaging dan biji (**Gambar 2.15**).



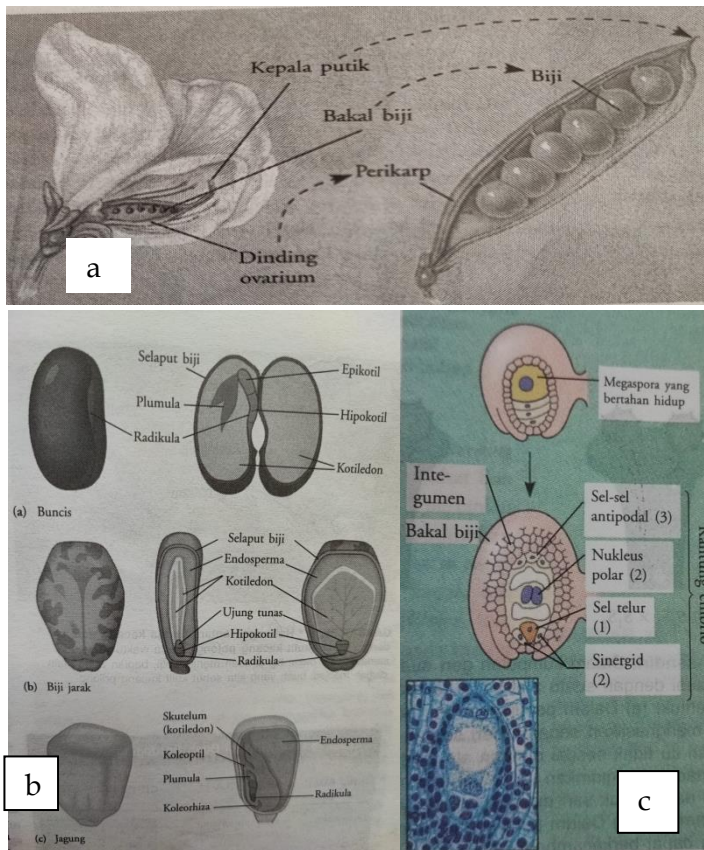
Gambar 2.15 Buah dan bagian-bagiannya

Sumber : <https://www.slideshare.net/slideshow/buah-2/25785923>

Bakal biji berkembang menjadi biji setelah fertilisasi. Biji terdiri dari kulit biji, cadangan makanan (endosperma), dan embrio (Raven, 2013). Kulit biji (testa) berasal dari integumen. Embrio berasal dari sel telur yang dibuahi inti generatif dari serbuk sari yang disebut (zigot). Bagian-bagian embrio yaitu radikel (calon akan) dan plumule (calon pucuk). Endosperma biji adalah cadangan makanan, yang dipersiapkan untuk sumber nutrisi bagi kecambah, sebelum akar berfungsi.

Pada rumput-rumputan, embrio terdiri plumulae diselaputi oleh bagian pelepah yang disebut koleoptil fungsinya pelindung plumulae dan juga menembus tanah hingga calon akar mencapai permukaan tanah, sedangkan radikel dilindungi oleh bagian seperti seludang yang disebut

koleoriza. Keping biji berupa helaian besar dan tebal merupakan pembatas dengan endosperma disebut scutelum, berfungsi membantu mencerna endosperma pada saat berkecambah karena mengandung enzim (Raven *et al.*, 1992; Hidayat, 1995). Pada dikotil embrio pada biji tidak ditemukan *coleoptil*, *coleorhiza*, dan *scutelum*.



Gambar 2.16 (a) Bagian bunga dan buah kacang polong; (b) Struktur biji, (c) Struktur bakal biji.
(Sumber: Campbell *et al.*, 2003)

Berdasarkan cadangan makanan pada biji, biji ada dua tipe yaitu 1) Eksalbuminus yaitu biji yang tidak punya endosperma, menyimpan makanan cadangan pada kotiledon, misalnya *Areca catechu*, *Piper nigrum*, *Glycine max*, *Cucurbita sp.*; 2) Albuminus adalah biji yang memiliki endosperma, misalnya pada *Zea mays*, *Ricinus communis*. Pada tumbuhan

tertentu terdapat salut biji atau arilus adalah pertumbuhan funikulus kearah luar, dan menyelaputi permukaan luar biji, terdapat pada pala *Myristica fragrans* (Tjitrosoepomo, 2010). Arilus juga berperan sangat lazim pada tumbuhan tropis dan sub tropis, dan merupakan organ yang sangat sesuai untuk penyebaran biji oleh hewan. Hubungan bunga, buah, dan biji (**Gambar 2.16a**), bagian-bagian biji secara detail (**Gambar 2.16b**), bagian-bagian bakal biji (**Gambar 2.16c**).

Beberapa penulis membedakan *arial sejati dan arialoid*. Arial sejati merupakan tonjolan dari funikulus dekat puncaknya, sedangkan ariloid merupakan tonjolan dari bagian-bagian lain biji tersebut. Ariloid pada rafe disebut *strofiola* dan yang dekat dengan mikrofil dinamakan karunkel. Kulit biji berasal dari integumen terdiri atas satu atau dua lapis integumen. Integumen berperan dalam pembentukan kulit biji. Dalam biji terdapat endospermae. Endosperma adalah hasil pembelahan inti kutub (triploid) berkali-kali, sebagai cadangan makanan untuk menyediakan makanan embrio yang tumbuh. Embrio adalah pembelahan zigot sampai menjadi embrio biji. Embrio terdiri dari dua poros embrional, yang bertautan dengan dua kotiledon secara lateral pada dikotil yaitu dibagian atas dinamakan epikotil dan kutub yang dibagian bawah dinamakan hipokotil (Evert, 2006).

Bab 3

FOTOSINTESIS

3.1 Pengertian Fotosintesis

94 Semua makhluk hidup membutuhkan makanan dalam melakukan aktivitasnya dan untuk menjamin kelangsungan hidupnya. Manusia, hewan dan tumbuhan memerlukan energi dan nutrisi yang berbeda-beda yang didapatkan dari sumber makanan. Manusia dan hewan tidak mampu menghasilkan makanannya sendiri, berbeda dengan tumbuhan. Tumbuhan mampu memasak makanannya sendiri proses ini disebut dengan fotosintesis. Pada dasarnya, fotosintesis merupakan proses penyusunan karbohidrat atau zat gula dengan menggunakan energi matahari.

40 Fotosintesis adalah sumber energi bagi hampir semua kehidupan aerobik di Bumi, baik secara langsung (melalui produksi primer) maupun tidak langsung (melalui makanan mereka). Ini membuat fotosintesis sangat penting bagi semua kehidupan aerobik di Bumi. Fotosintesis menyerap sekitar 100 terawatt energi, hampir enam kali lebih banyak daripada yang dikonsumsi oleh manusia. Semua senyawa organik yang terkandung dalam tubuh organisme diperoleh melalui fotosintesis, selain sebagai sumber energi. Sekitar 100–115 petagram karbon diubah menjadi biomassa setiap tahun melalui fotosintesis (Maftukhah *et al.*, 2023).

112 Fotosintesis berasal dari kata “Foton” artinya cahaya, sintesis artinya penyusunan. Fotosintesis adalah peristiwa penyusunan zat organik (gula) dari zat anorganik (air, karbondioksida) dengan pertolongan energi cahaya matahari. Karena bahan baku yang dipergunakan adalah zat karbon (karbondioksida), maka dapat juga disebut asimilasi zat karbon. Dalam fotosintesis, tanaman menggunakan CO₂ dari udara bebas dan air dari dalam tanah untuk menghasilkan

karbohidrat dengan bantuan cahaya dan klorofil. (Salisbury dan Ross, 1992).

Fotosintesis adalah proses biologi yang memerlukan energi dan cahaya matahari yang dapat digunakan oleh klorofil yang terdapat di dalam kloroplas untuk membuat makanan untuk diri mereka sendiri dan membuat oksigen yang penting bagi kelangsungan hidup manusia dan makhluk hidup lainnya. Fotosintesis merupakan proses penting bagi tanaman karena (Hasnunidah & Suwandi, 2016):

1. Fotosintesis merupakan sumber energi bagi semua makhluk hidup.
2. Fotosintesis mampu mengubah tenaga cahaya matahari (tenaga fisik) menjadi tenaga kimia (ATP dan NADPH₂).
3. Dibutuhkan untuk mensintesis berbagai senyawa organik yang diperlukan manusia dan hewan.
4. Fotosintesis mengubah CO₂ yang dihasilkan dari respirasi menjadi karbohidrat. Karbohidrat ini menghasilkan rangka karbon, yang berfungsi sebagai dasar untuk pembentukan senyawa organik lainnya.
5. Sebagai penyedia oksigen (O₂) yang dibutuhkan oleh organisme aerob.
6. Pertumbuhan dan hasil tumbuhan dipengaruhi oleh kecepatan fotosintesis.

3.2 Tempat Terjadinya Fotosintesis

3.2.1 Daun

Fotosintesis adalah proses yang digunakan tumbuhan tingkat tinggi untuk menghasilkan makanan mereka sendiri. Dalam proses fotosintesis didukung oleh adanya kloroplas pada tumbuhan. Pada sel-sel batang yang masih muda biasanya memiliki kloroplas, buah-buah yang belum matang, dan pada bagian daun. Di daun inilah yang menjadi tempat utama terjadinya fotosintesis. Pada daun terdapat lapisan-lapisan jaringan yang berbeda-beda dan memiliki fungsinya masing-masing.

Epidermis atas tersusun atas lapisan sel tunggal yang terdapat di permukaan atas daun. Sel-sel ini agak transparan karena tidak memiliki

96 kloroplas sehingga cahaya bisa melewati sel-sel di bawahnya. Sel-sel ini pula menghasilkan zat yang mirip dengan lilin yang disebut kutin dan membentuk kutikula, yang mengurangi kehilangan air dari permukaan daun. Jaringan palisade dibangun oleh satu atau lebih barisan sel yang berbentuk tabung dan terletak di bawah sel epidermis atas. Barisan sel ini membentuk sumbu panjangnya tegak lurus dengan bidang daunnya. Setiap sel memiliki kloroplas, dan kloroplas adalah sel yang paling sering melakukan fotosintesis di dalam daun. Lapisan bunga karang terletak di bawah lapisan palisade memiliki bentuk dan susunan sel yang tidak beraturan. Meskipun kloroplas yang dimiliki sedikit, namun sel ini tetap mampu menyimpan molekul-molekul secara sementara, membantu pertukaran gas yang terletak di antara daun dan sekitarnya. Pada siang hari, sel-sel ini mengeluarkan oksigen dan uap air diambil dari ruang udara berkoneksi dan akhirnya ke bagian luar daun melalui pori-pori tertentu yang disebut sebagai stomata (**Gambar 3.1**).

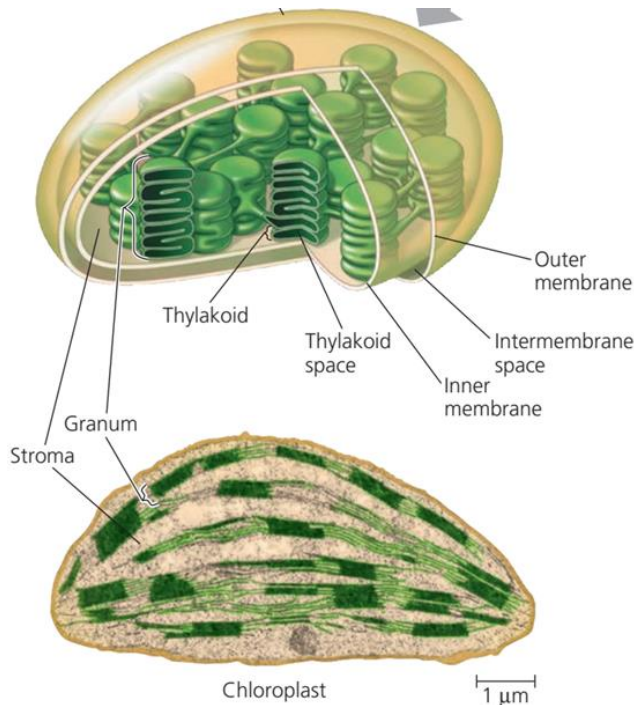


Gambar 3.1 Struktur anatomi daun
(Sumber: Garden Center, 2024)

3.2.2 Kloroplas

Tempat fotosintesis tumbuhan adalah kloroplas, yang terdiri dari stroma, kantong membran yang berbentuk pipih yang disebut (tilakoid)

dan tumpukan tilakoid yang disebut grana. Kloroplas mengandung pigmen klorofil yang warnanya hijau dan berfungsi menangkap cahaya dan akan diubah menjadi energi kimia. Membran rangkap kloroplas terdiri dari membran luar dan membran dalam (**Gambar 3.2**).



Gambar 3.2 Struktur Kloroplas
(Sumber: Prasetya, 2022)

Kloroplast merupakan anggota terspesialisasi dari famili organel-organel tumbuhan yang berkerabat dekat, yang disebut plastida. Amiloplas merupakan plastida tidak memiliki warna yang menimbun pati (amilosa). Sebagian besar terdapat pada umbi dan akar, serta pada kromoplas, yang mempunyai pigmen yang menciptakan warna jingga dan kuning pada bunga dan buah. Beberapa jenis klorofil dan pigmen hijau yang disebut klorofil terdapat dalam kloroplast. Enzim dan molekul lain yang bekerja dengan gula secara fotolisis. Lensa ini terbuat dari organel, yang ukurannya sekitar 2 μm - 5 μm, ditemukan di daun dan organ hijau lainnya pada alga dan tumbuhan (Campbell, 2008).

Kloroplas dan semua plastid lainnya diperkirakan berasal dari proplastid, sebuah organel yang tidak memiliki warna yang ditemukan pada sel tumbuhan. Proplastid lebih kecil dan dapat tumbuh baik di tempat terang maupun gelap. dari kloroplas yang memiliki membrane internal yang sedikit atau tidak ada. Proplastid melakukan pembelahan diri selama perkembangan embrio biji. Ketika batang dan daun terbentuk, maka kloroplas muda (yang belum terbentuk) akan berkembang dari proplast juga membelah diri secara aktif, terutama dalam keadaan cukup cahaya.

Kloroplas terdapat pada tumbuhan dan hanya terdapat di dalam sel mesofil, penutup stomata daun, epidermis batang muda, sel subepidermal kelopak bunga dan buah muda. Kloroplas mengandung klorofil, yang berwarna hijau. Membran ganda membungkus kloroplas, yang terdiri dari sebelah dalam atau internal, tidak memiliki lipatan seperti membran internal mitokondrianya dan dipisahkan oleh ruang antar membran.

Bagian dalam kloroplas memiliki bahan amorf, lir gel, mengandung banyak enzim yang disebut stroma. Di dalam stroma memiliki banyak enzim yang berperan dalam pengubahan CO₂ menjadi karbohidrat. Dalam stroma pula ada **tilakoid** yaitu kantung yang memiliki pigmen, dibagian inilah energi cahaya akan dipergunakan dalam mengoksidasi H₂O dan pembentukan ATP dan NADPH₂ yang mengandung energi yang digunakan stroma dalam mengubah CO₂ menjadi karbohidrat. Tumpukan bebrapa tilakoid disebut **grana**. Bagian selanjutnya adalah **Tilakoid stroma** yaitu tilakoid yang memanjang ke stroma (Hasnunidah & Suwandi, 2016). Struktur lengkap kloroplas terdapat pada gambar

Pigmen yang terdapat di membran tilakoid sebagian besar terdiri atas dua jenis klorofil yaitu klorofil a dan klorofil b. Selain itu juga terdapat pigmen kuning hingga jingga (karotenoid). Karotenoid terdiri dari dua jenis yaitu karoten dan xantofil. Klorofil bersifat polar, artinya bagian porfirin bersifat hidrofob dan bagian ekornya lipofil. Pada membran tilakoid klorofil tersusun dalam deretan berseling dengan karotenoid serta fosfolipid dan terapat oleh lapisan protein. Pigmen yang ada dalam kloroplas berkelompok membentuk satuan-satuan yang disebut fotosistem. Tiap kloroplas mempunyai dua macam fotosistem yang

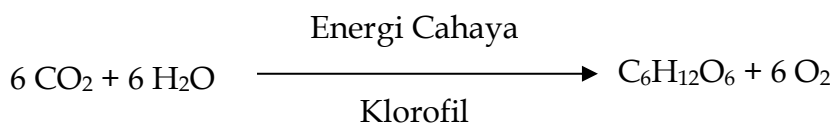
bekerjasama dalam penangkapan energi cahaya. Satuan terkecil kelompok molekul pigmen yang bekerja sama dalam penangkapan energi cahaya sehingga dihasilkan efek fitokima disebut **unit fotosintetik** atau **fotosistem** (Hasnunidah & Suwandi. 2016).

3.3 Proses Terjadinya Fotosintesis

Semua sel yang mengandung zat hijau daun (klorofil) mampu melakukan fotosintesis, biasanya terjadi di stroma. Hasilnya akan ditransfer ke jaringan yang berada dekat dan didistribusikan ke seluruh bagian tumbuhan. Reaksi fotosintesis memecah menjadi dua yaitu reaksi terang dan reaksi gelap (Campbell, 2000). Fotosintesis umumnya dibagi menjadi dua fase yang rumit. Ini dikenal sebagai reaksi terang dan reaksi gelap. Reaksi terang merubah energi matahari menjadi energi kimia (Campbell *et al.*, 2017). Pada titik ini, molekul air berpisah yang dijadikan sumber proton dan elektron (ion H⁺) dan menghasilkan oksigen sebagai hasil akhir.

Proses penting tumbuhan yang dikenal sebagai fotosintesis melibatkan cahaya matahari yang ditransformasikan menjadi energi kimia yang tersimpan dalam senyawa organik. Untuk melakukan kedua tahap reaksi fotosintesis, tanaman membutuhkan cahaya matahari sebagai sumber energi. Reaksi yang bergantung pada cahaya yaitu *Light Dependent Reaction* (LDR) atau reaksi terang yang terjadi di tilakoid dan merupakan reaksi tahap pertama. Tahap kedua adalah siklus Calvin, yang dikenal sebagai reaksi yang tidak bergantung pada cahaya yaitu *Light Independent Reaction* (LIR) atau reaksi gelap yang terjadi di dalam stroma (Yustiningsih, 2019).

Menurut Hasnunidah & Suwandi (2016) fotosintesis adalah proses pembentukan bahan organik dari bahan anorganik (CO₂, H₂O, H₂S) dengan bantuan cahaya matahari dan klorofil. Adapun reaksi fotosintesis sebagai berikut:



81 Setelah karbon dioksida (CO_2) masuk ke dalam daun, oksigen (O_2) keluar lewat pori-pori kecil yaitu stomata (dari bahasa Yunani "stoma", yang berarti "mulut"). Sementara akar menyerap air dan melalui batang didistribusikan ke daun. Energi diambil oleh klorofil saat sinar matahari jatuh ke permukaan daun. Setelah melalui lapisan epidermis yang tidak berwarna atau transparan, cahaya akan menuju mesofil, tempat sebagian besar proses fotosintesis terjadi. Energi kemudian digunakan untuk mengubah air menjadi gula/glukosa ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) dan oksigen (O_2). Setelah itu, fotosintesis akan menghasilkan makanan untuk tumbuhan. Selain itu, tumbuhan mengeluarkan oksigen melalui stomatanya. Selanjutnya, oksigen ini berada di udara bebas untuk dihirup oleh manusia dan hewan.

3.4 Reaksi Terang dan Reaksi Gelap

3.4.1 Reaksi Terang

Reaksi terang membutuhkan energi cahaya matahari langsung, dan tidak dapat digunakan untuk proses berikutnya. Meskipun energi cahaya dapat dimanfaatkan, perubahan diperlukan menjadi energi kimia yang diaktifkan oleh klorofil. Temuan dari Reaksi terang ini akan digunakan untuk proses berikutnya, reaksi gelap. Membran tilakoid merupakan tempat terjadinya reaksi terang, menurut (Richmond 2004).

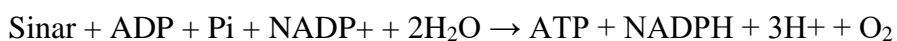
Untuk proses asimilasi karbon anorganik, reaksi terang menghasilkan energi kimia NADPH_2 dan ATP. Selama proses pencahayaan, dua elektron air akan dipecahkan menjadi O_2 , dan elektron ini kemudian ditransmisikan melalui sistem pembawa proton yang menghasilkan NADPH_2 (Utomo, 2007). Dua pusat pigmen yang berperan membawa proton dalam proses terang yaitu Photosystem I (PS I) dan Photosystem II (PS II). Foton (energi cahaya) dengan maksimal panjang gelombang 700 nm akan diserap oleh Photosystem I (PS I) dan panjang gelombang cahaya 680 nm diserap oleh Photosystem II (PS II). Fotofosforilasi adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan proton yang dihasilkan oleh PS I dan PS II. Tahapan terjadinya reaksi terang adalah (**Gambar 3.3**):

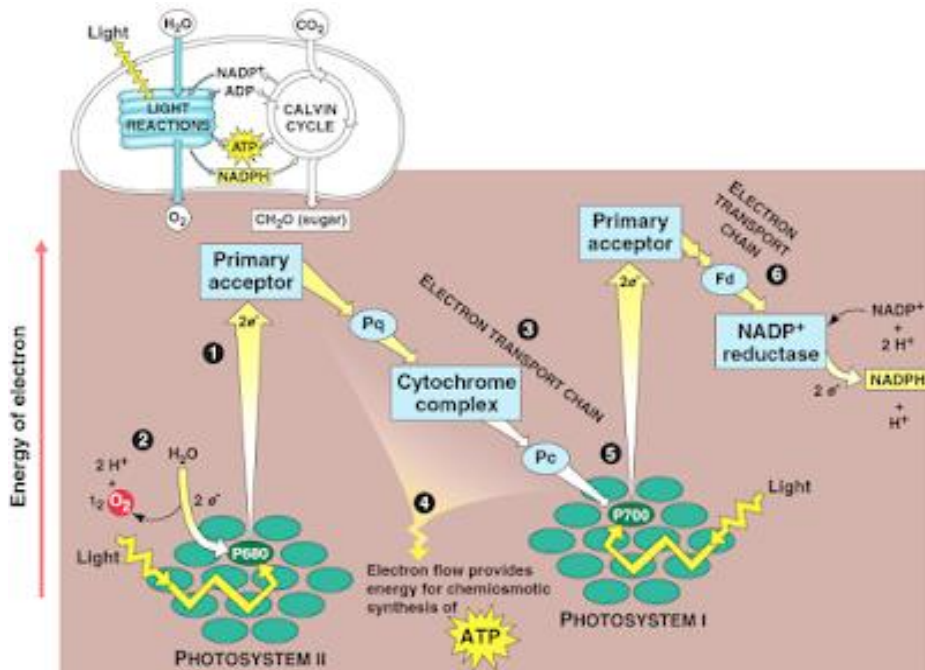
1. Dalam fotosistem II, klorofil menangkap cahaya matahari yang menyebabkan naiknya elektron di pusat fotosistem menuju tingkat

energi yang lebih tinggi kemudian akseptor primer akan menangkap elektron tersebut. Elektron ini kemudian mengalir turun ke tingkat energi awalnya, tetapi hanya melalui beberapa molekul sebagai akseptor (penerima elektron).

2. Pusat fotosistem II kekurangan elektron karena elektron yang naik. Pada tahapan ini, H₂O dipecah menjadi 2 molekul H⁺ dan 1 molekul O⁻ oleh enzim. Kemudian, dua molekul O⁻ akan menyatu menjadi O₂. Tumbuhan akan melepaskan O₂ ini ke udarah melalui stomata.
3. Setelah elektron diambil dari fotosistem II yang meningkat, mereka dialirkan ke sejumlah protein, seperti Pc (plastosianin), Pq (plastoquinon), dan kompleks sitokrom, yang akan mengembalikan elektron ke tingkat energi sebelumnya. Saat elektron ditangkap oleh protein, energinya dilepaskan, sehingga dapat digunakan untuk dalam pembentukan ATP.
4. Elektron dari fotosistem II turun dari kompleks protein untuk mengisi kekosongan di fotosistem I karena mereka menangkap energi dari matahari.
5. Akseptor primer akan mengambil elektron dari fotosistem I yang naik dan kemudian meneruskan elektron tersebut ke Fd, atau ferredoksin. Selanjutnya, elektron tersebut akan pergi ke enzim NADP⁺ reduktase, yang kemudian menggunakan elektron tersebut untuk membentuk NADPH dalam reaksi reduksi.

Berikut ini adalah reaksi umum yang terjadi pada reaksi terang:

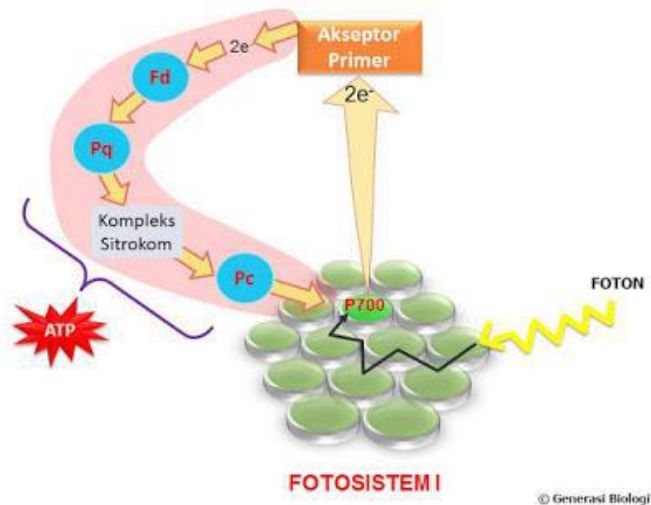




Gambar 3.3 Aliran elektron non siklik

(Sumber: Tok, 2015)

Aliran elektron siklik terjadi ketika produksi ATP pada aliran elektron non siklik tidak mencukupi untuk terjadinya reaksi gelap. Aliran elektron siklik ini hanya menghasilkan ATP, dan alurnya adalah sebagai berikut. Elektron di fotosistem I akan digerakkan oleh energi cahaya, meningkatkan tingkat energi. Setelah akseptor primer menangkap elektron, maka akan terjadi penyaluran ke Fd, Pq, dan Pc, sebelum kembali ke fotosistem I. Saat pergerakan dari Fd, Pq, dan Pc, energi yang dibutuhkan untuk membuat ATP dan NADPH akan dilepaskan ke stroma untuk selanjutnya masuk pada tahap reaksi gelap melalui *chemiosmosis*. Pelepasan oksigen (O_2) sebagai hasil reaksi ke lingkungan melalui stomata (**Gambar 3.4**).

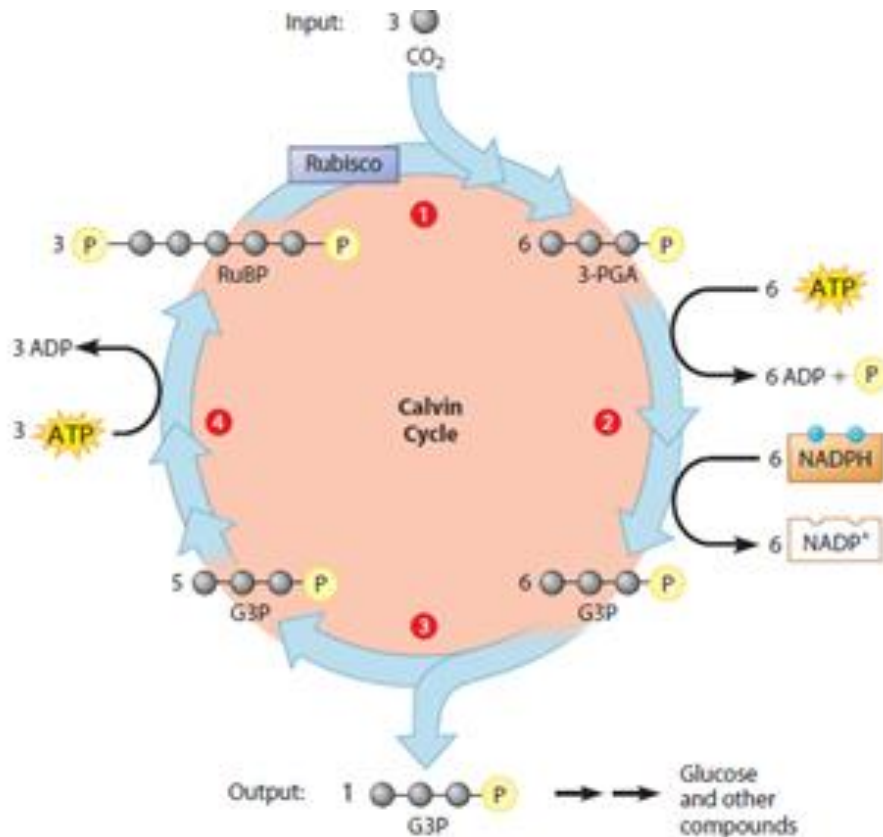


Gambar 3.4 Aliran elektron siklik
(Sumber: Handoko & Rizki, 2020)

Dalam proses kemiosmosis, reaksi terang juga menghasilkan ATP. Proses yang disebut fotofosforilasi menambah gugus fosfat ke ADP. Oleh karena itu, energi cahaya pertama-tama diubah menjadi energi kimia menjadi ATP (energi sel) dan NADPH (sumber elektron yang dapat memberikan elektron kepada penerima elektron). Gula tidak dihasilkan dari reaksi terang. Tahap kedua fotosintesis, atau siklus Calvin, melibatkan pembentukan gula.

3.4.2 Reaksi Gelap

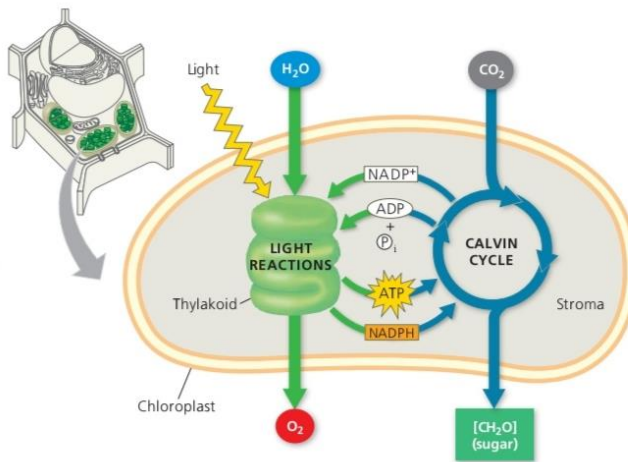
Reaksi gelap, juga dikenal sebagai "siklus Calvin". Stroma menjadi tempat terjadinya dan karbohidrat merupakan hasil dari reaksi gelap ini. Karbondioksida ditangkap dan diproses bersama NADPH sehingga dihasilkanlah karbohidrat. Proses ini membutuhkan energi dari ATP yang dihasilkan pada reaksi terang. Siklus calvin melalui tiga tahapan yaitu fiksasi, reduksi, dan regenerasi (**Gambar 3.5**).



Gambar 3.5 Siklus Calvin
(Sumber: Manggabarani, 2018)

Siklus Calvin dimulai dengan menggabungkan CO₂ dengan RuBP-ribulosa bifosfat, sebuah senyawa gula berantai karbon 5. Penggabungan ini menghasilkan dua senyawa 3-PGA (forfogliserat), masing-masing berantai karbon 3 (1). Enam senyawa 3-PGA dikonversi menjadi 6 senyawa G3P (gliseraldehid 3 fosfat) dengan adanya 6 ATP dan 6 NADPH (2). Lima senyawa G3P akan mengalami pengulangan siklus membentuk RuBP dan berubah kembali menjadi 3-PGA dan seterusnya (4), sedangkan 1 senyawa G3P akan berubah menjadi glukosa (C₆H₁₂O₆) dan senyawa lainnya. Tumbuhan akan menggunakan glukosa dan senyawa lainnya sebagai sumber energi.

16



Gambar 3.6 Dua tahapan kerjasama reaksi terang dan reaksi gelap
(Sumber: Campbell, 2017)

3.5 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Fotosintesis

Faktor pertumbuhan tanaman dipengaruhi oleh baik faktor internal maupun eksternal. Komponen tubuh tanaman seperti genetik dan hormon adalah faktor internal, sedangkan nutrisi, cahaya, air, kelembaban, dan suhu adalah faktor luar yang mempengaruhi pertumbuhan (Mustika & Ningsih, 2019).

Hal senada diungkapkan oleh Lakitan (2007) mengatakan bahwa fotosintesis dipengaruhi oleh genetik yaitu umur daun, keberagaman spesies dan laju translokasi fotosintat. Selanjutnya faktor lingkungan yaitu ketersediaan CO_2 , ketersediaan air, cahaya, dan suhu. Pembentukan klorofil dipengaruhi oleh sejumlah variabel, seperti faktor genetik tanaman, intensitas cahaya, karbohidrat, oksigen, air, unsur hara, dan suhu (Dwijoseputro, 1992). Sering digunakan sebagai parameter pertumbuhan, daun adalah organ tanaman tempat fotosintesa terjadi (Loveless, 1991). Luas total daun per tanaman atau per satuan luas tanah dapat menentukan fotosintesis dan luas daun (Mas'ud, 1993). Faktor internal yang mempengaruhi laju fotosintesis adalah:

1. Perbedaan antara spesies

Laju fotosintesis pada tanaman berbeda-beda menurut spesies tanaman. Ada tanaman C_3 , C_4 dan CAM. Pada umumnya, tumbuhan

C4 memiliki laju fotosintesis yang paling tinggi, sedangkan laju fotosintesis yang paling rendah dimiliki oleh tumbuhan CAM. Untuk tumbuhan C3 berada diantara kedua kondisi C4 dan CAM.

2. Umur daun

Laju fotosintesis juga dipengaruhi oleh umur daun, atau stadia perkembangan daun. Pada awal perkembangan daun, kemampuan daun untuk berfotosintesis meningkat, tetapi kemudian berkurang setelah perkembangan bahkan sebelum daun berkembang penuh. Setelah senescence (penuaan daun), daun menjadi kuning dan tidak dapat berfotosintesis lagi karena perubahan klorofil dan penurunan kinerja kloroplas.

3. Laju Translokasi Fotosintat

Laju fotosintesis dapat dipengaruhi oleh berapa lama hasil fotosintesis (sukrosa) ditransfer dari daun ke limbung organ penampung. Organ yang dipotong seperti biji, umbi, atau buah yang mengalami pembesaran dapat mengurangi laju fotosintesis selama beberapa hari, khususnya untuk daun yang terletak di dekat bagian yang telah dibuang. Laju translokasi fotosintat yang lebih tinggi ditunjukkan oleh tumbuhan dengan fotosintesis yang cepat. Translokasi fotosintat yang cepat meningkatkan laju fiksasi karbon dioksida, sedangkan penimbunan fotosintat di bagian daun akan menghentikan proses fotosintesis.

Faktor lingkungan yang mempengaruhi laju fotosintesis sebagai berikut:

1. Sinar matahari

Sumber utama energi yang digunakan pada proses fotosintesis pada daun adalah sinar matahari. Selama proses fotosintesis, daun hanya menyerap sekitar 1-5 persen energi matahari. Energi sisa disalurkan melalui transpirasi atau dipantulkan. Sebagai hasil dari pemantulan gelombang cahaya ke udara ini, warna vegetasi alami dapat diterima oleh mata (Yustiningsih, 2019). Selain itu, intensitas cahaya matahari dapat memengaruhi proses fotosintesis secara langsung dan aspek morfologi secara tidak langsung. Efek cahaya yang lebih rendah akan lebih berfokus pada pengaruh morfologi (Fitter & Hay, 1991).

Meskipun jumlah cahaya yang dibutuhkan tanaman berbeda-beda, kekurangan cahaya dapat mengganggu proses fotosintesis dan

4

pertumbuhan tanaman. Tanaman yang kekurangan cahaya matahari cenderung tumbuh panjang, ramping, dan pucat. Selain mempengaruhi pertumbuhannya, cahaya juga diperlukan untuk proses fotosintesis. Daun tanaman akan pucat jika tidak terkena cahaya karena tidak dapat menghasilkan klorofil. Tanaman yang terkena terlalu banyak cahaya dapat mengalami kerusakan klorofil (Pramadana *et al.*, 2021).

Tanaman memiliki kemampuan adaptasi dengan perubahan intensitas cahaya untuk peningkatan efisiensi fotosintesis. Kemampuan ini memungkinkan tanaman untuk bertahan hidup dan tetap produktif (Zahara dan Fuadiyah, 2021). Pengaruh intensitas cahaya matahari pada proses fotosintesis juga berkaitan dengan laju fotosintesis. Apabila intensitas cahaya terlalu rendah, maka fotosintesis akan berjalan lebih lambat sebagai akibat dari kekurangan energi, tetapi jika intensitas cahaya terlalu tinggi terlalu banyak energi yang diterima juga dapat mengganggu fotosintesis.

Jika klorofil didistribusikan secara tidak merata ke semua sel tumbuhan dan hanya terkonsentrasi pada kloroplas, ini dapat menghasilkan efek penyaringan yang efektif. Klorofil pembungkus, yang dilakukan oleh tanaman yang tumbuh di daerah naungan dan di bawah kanopi, memberikan jarak yang lebih lebar di stroma daripada tanaman yang terpapar cahaya langsung (Taiz & Zeiger, 2010). Jika dibandingkan dengan jumlah total klorofil, efek penyaringan akan menghasilkan jumlah penyerapan cahaya yang lebih rendah.

Untuk memastikan bahwa proses fotosintesis tetap efisien, tanaman harus melakukan perubahan agar LDR dan LIR berubah ketika intensitas cahaya berubah. Diantara tiga jenis reaksi yang terjadi di kloroplas, efisiensi penyerapan foton, pengaturan reaksi fotosistem II (PS II) dan fotosistem I (PS I), dan fiksasi karbon adalah bagian penting dari penyesuaian tanaman terhadap perubahan intensitas cahaya. Penyerapan foton bertanggung jawab atas pembentukan ATP (Yustiningsih, 2019).

1. Ketersediaan Air

Air merupakan kebutuhan utama bagi semua makhluk hidup. Salah satu bahan baku utama fotosintesis adalah ketersediaan air. Air pada tumbuhan tingkat tinggi diserap melalui akar kemudian dibawa atau diangkut ke daun melalui berbagai sel dan jaringan yang ada pada tumbuhan. Kekurangan air dapat menghambat fotosintesis untuk

87

tumbuhan tingkat tinggi, terutama karena dampaknya terhadap turgiditas sel penjaga stomata. Jika air kurang, turgiditas sel penjaga stomata akan menurun, yang menyebabkan stomata menutup yang akan menghambat penyerapan karbon dioksida yang diperlukan untuk sintesis karbohidrat kompleks.

2. Ketersediaan CO₂ dan O₂

Karbon dioksida merupakan bahan dasar yang dibutuhkan dalam proses fotosintesis. Apabila konsentrasi CO₂ tinggi, maka laju fotosintesis akan meningkat. Lain halnya dengan konsentrasi O₂. Oksigen (O₂) merupakan hasil sampingan dari fotosintesis. Intensitas fotosintesis akan menurun apabila konsentrasi O₂ meningkat.

3. Suhu

Pengaruh suhu terhadap laju fotosintesis ditentukan oleh spesies dan kondisi lingkungan tempat tumbuh tanaman tersebut. Tumbuhan C₄ biasanya memiliki suhu optimum yang lebih tinggi dibandingkan dengan tumbuhan C₃, sebagian besar karena fotorespirasi yang lebih rendah pada tumbuhan C₄.

Bab 4

RESPIRASI TUMBUHAN

4.1. Pendahuluan

23 Setiap makhluk hidup pasti melakukan proses metabolisme salah satunya tumbuhan. Metabolisme merupakan serangkaian proses kimiawi dalam tubuh makhluk hidup yang berperan untuk menghasilkan energi yang digunakan untuk melakukan aktivitas kehidupan. Tumbuhan memiliki ciri makhluk hidup sebagai proses kehidupan yaitu bernafas atau disebut respirasi. Respirasi pada tumbuhan berlangsung siang dan malam karena cahaya bukan merupakan syarat. Jadi proses respirasi selalu berlangsung sepanjang waktu selama tumbuhan hidup (Novitasari, 2017).

86 Respirasi tumbuhan adalah proses metabolisme yang melibatkan oksidasi senyawa organik untuk menghasilkan energi dalam bentuk adenosin trifosfat (ATP). Proses ini penting untuk mendukung berbagai fungsi seluler, termasuk pertumbuhan, perbaikan, dan pemeliharaan struktur sel. Respirasi terjadi di semua sel hidup dan merupakan bagian integral dari metabolisme tumbuhan (Taiz & Zeiger, 2010). Proses respirasi tumbuhan melibatkan beberapa tahap, termasuk glikolisis, siklus asam sitrat (siklus Krebs), dan rantai transport elektron. Glikolisis terjadi di sitoplasma, di mana glukosa dipecah menjadi piruvat, menghasilkan ATP dan NADH. Selanjutnya, piruvat dioksidasi dalam siklus Krebs yang berlangsung di mitokondria, menghasilkan lebih banyak NADH dan FADH₂, serta sejumlah ATP. Tahap terakhir, rantai transport elektron, memanfaatkan NADH dan FADH₂ untuk menghasilkan gradien proton yang mendorong sintesis ATP melalui fosforilasi oksidatif (Buchanan *et al.*, 2015).

Respirasi tidak hanya penting untuk menyediakan energi, tetapi juga berperan dalam metabolisme karbon dan nitrogen, serta membantu

mengatur keseimbangan redoks dalam sel. Selain itu, respirasi menghasilkan CO₂ sebagai produk sampingan, yang penting untuk proses fotosintesis. Dengan demikian, respirasi dan fotosintesis adalah dua proses yang saling terkait dan bersama-sama mendukung siklus energi dan materi dalam ekosistem tumbuhan (Hopkins & Hüner, 2008).

Meskipun respirasi sering kali dikaitkan dengan oksigen (respirasi aerobik), tumbuhan juga dapat melakukan respirasi anaerobik di mana oksigen terbatas. Dalam kondisi anaerobik, glukosa dipecah menjadi etanol atau asam laktat, menghasilkan energi meskipun dalam jumlah yang lebih kecil dibandingkan dengan respirasi aerobik. Adaptasi ini penting bagi tumbuhan yang hidup dalam kondisi lingkungan yang bervariasi, seperti daerah tergenang air (Heldt & Piechulla, 2011).

Secara keseluruhan, respirasi adalah proses vital yang memungkinkan tumbuhan untuk memanfaatkan sumber daya energi internal mereka secara efisien. Energi yang dihasilkan melalui respirasi memungkinkan tumbuhan untuk melakukan berbagai aktivitas biologis yang esensial, termasuk biosintesis, transport zat, dan gerakan seluler. Proses ini memastikan bahwa tumbuhan dapat bertahan, tumbuh, dan bereproduksi dalam berbagai kondisi lingkungan (Lambers *et al.*, 2008).

Di Indonesia, studi tentang respirasi tumbuhan menjadi penting karena negara ini memiliki keanekaragaman hayati yang sangat tinggi. Banyak spesies tumbuhan endemik yang membutuhkan pemahaman mendalam mengenai proses metabolisme mereka untuk konservasi dan pengelolaan yang efektif (Soerawidjaja, 2008).

Penelitian mengenai respirasi tumbuhan di Indonesia juga memberikan wawasan penting tentang adaptasi tumbuhan lokal terhadap kondisi lingkungan yang ekstrem, seperti tanah tergenang air di hutan bakau atau tanah berpasir di daerah pesisir. Hal ini menunjukkan bagaimana respirasi anaerobik memainkan peran kunci dalam kelangsungan hidup spesies tumbuhan di ekosistem tersebut (Harjadi, 2009). Selain itu, pemahaman tentang respirasi tumbuhan berperan penting dalam pertanian Indonesia. Misalnya, pengelolaan lahan sawah yang baik dapat meminimalkan respirasi anaerobik yang tidak efisien dan meningkatkan produktivitas padi. Praktik-praktik seperti pengelolaan air dan pemupukan yang tepat dapat mempengaruhi proses respirasi dan hasil panen (Sutanto, 2002).

Pemanfaatan teknologi bioteknologi di Indonesia juga semakin meningkat dalam penelitian respirasi tumbuhan. Teknik molekuler digunakan untuk mempelajari gen-gen yang terlibat dalam respirasi, memungkinkan pengembangan varietas tanaman yang lebih efisien dalam penggunaan energi dan lebih tahan terhadap stres lingkungan (Mulyani & Sudarsono, 2010). Dalam konteks konservasi, memahami respirasi tumbuhan membantu dalam upaya reboisasi dan restorasi ekosistem. Pengetahuan ini digunakan untuk memilih spesies yang paling cocok untuk ditanam di daerah yang terdegradasi, memastikan bahwa tanaman tersebut dapat bertahan dan tumbuh dengan baik melalui proses respirasi yang optimal (Barus, 2006).

4.1.1. Peranan Respirasi dalam Kehidupan Tanaman

Respirasi merupakan salah satu proses metabolisme utama dalam kehidupan tanaman yang memainkan peran krusial dalam memenuhi kebutuhan energi mereka. Sebagaimana dalam organisme lainnya, tanaman mengandalkan respirasi untuk mengubah senyawa organik menjadi energi yang diperlukan untuk pertumbuhan, perkembangan, dan berbagai aktivitas seluler. Proses ini tidak hanya mendukung ketersediaan energi, tetapi juga memungkinkan tanaman untuk menjaga keseimbangan internal dan bereaksi terhadap perubahan lingkungan dengan efisien. Dalam konteks ini, respirasi tidak hanya berperan sebagai generator energi, tetapi juga sebagai penjaga stabilitas fisiologis yang memungkinkan tanaman beradaptasi dan bertahan hidup di berbagai kondisi eksternal yang bervariasi (Hopkins & Hüner, 2008).

Peran utama respirasi dalam produksi energi bagi tanaman tidak bisa dilebih-lebihkan. ATP yang dihasilkan melalui proses respirasi menjadi sumber daya utama yang mendukung semua aspek kehidupan tanaman, mulai dari metabolisme dasar hingga respon terhadap stres lingkungan. Dengan memecah senyawa organik seperti glukosa, respirasi menghasilkan energi yang digunakan untuk menggerakkan berbagai proses biokimia, seperti sintesis protein, transport zat, dan aktivitas enzimatik (Heldt & Piechulla, 2011). Tanpa ATP yang cukup dari respirasi, tanaman akan kesulitan dalam menjalankan fungsi-fungsinya yang vital,

seperti pembelahan sel, perluasan jaringan, dan adaptasi terhadap perubahan musiman atau cuaca.

Selain menjadi mesin penghasil energi, respirasi juga berperan penting dalam interaksi tanaman dengan lingkungannya. Laju respirasi dapat disesuaikan oleh tanaman sebagai respons terhadap keadaan lingkungan yang berubah. Misalnya, saat tanaman mengalami stres akibat kekurangan air atau suhu ekstrem, mereka dapat meningkatkan laju respirasi untuk memproduksi lebih banyak energi yang digunakan untuk melindungi diri mereka sendiri dan mengaktifkan mekanisme adaptasi. Dengan demikian, respirasi tidak hanya memenuhi kebutuhan energi tanaman, tetapi juga memungkinkan mereka untuk beradaptasi dan bertahan di berbagai ekosistem yang berbeda di seluruh dunia (Lambers *et al.*, 2008).

Secara umum peranan respirasi bagi tumbuhan, meliputi (Simanungkalit, 2009, Sunarti, 2015):

1. Untuk memproduksi energi

Respirasi menghasilkan ATP sebagai sumber utama energi untuk semua proses metabolisme seluler tanaman,

2. Pertumbuhan dan Perkembangan

ATP yang dihasilkan dari respirasi mendukung pembelahan sel, perpanjangan akar, dan perkembangan jaringan baru,

3. Pengaturan Respons Terhadap Lingkungan

Laju respirasi dapat beradaptasi terhadap perubahan suhu, kelembaban, dan ketersediaan nutrisi, memungkinkan tanaman untuk bertahan dalam kondisi lingkungan yang bervariasi,

4. Produksi Metabolit Sekunder

Respirasi menyediakan prekursor untuk biosintesis metabolit sekunder yang penting untuk perlindungan terhadap patogen dan adaptasi terhadap stres lingkungan,

5. Keseimbangan Energi

Melalui proses respirasi, tanaman menjaga keseimbangan antara penggunaan energi untuk pertumbuhan dan perbaikan dengan kebutuhan sehari-hari selama siklus hidupnya,

6. Respon Terhadap Stres Abiotik dan Biotik

Respirasi memainkan peran penting dalam respons tanaman terhadap stres seperti kekeringan, banjir, dan serangan hama yang dapat mengganggu proses fisiologis normal.

4.1.2. Jenis-Jenis Respirasi

Respirasi dapat dibedakan berdasarkan kebutuhan terhadap oksigen menjadi dua jenis, yaitu respirasi aerob dan respirasi anaerob. Respirasi aerob memerlukan oksigen untuk menguraikan senyawa organik secara lengkap sehingga menghasilkan energi, karbon dioksida, dan uap air (Lilisari, 2012).

1. Respirasi aerob

Respirasi aerob adalah jenis respirasi yang memerlukan oksigen untuk berlangsung. Proses ini melibatkan penguraian lengkap senyawa organik seperti glukosa menjadi energi, karbon dioksida, dan air. Respirasi aerob terjadi melalui beberapa tahapan, yaitu glikolisis, siklus Krebs, dan rantai transport elektron, yang semuanya berperan dalam produksi energi dalam bentuk ATP. Respirasi aerob dianggap lebih efisien karena menghasilkan jumlah ATP yang lebih besar dibandingkan respirasi anaerob (Lilisari, 2012).

2. Respirasi anaerob

Respirasi anaerob adalah jenis respirasi yang berlangsung tanpa memerlukan oksigen. Dalam kondisi kekurangan oksigen, tumbuhan melakukan respirasi anaerob untuk tetap menghasilkan energi meskipun dengan efisiensi yang lebih rendah. Proses ini melibatkan fermentasi yang menghasilkan produk sampingan seperti asam laktat atau etanol, tergantung pada jenis organisme dan kondisi lingkungan. Respirasi anaerob sangat penting bagi tumbuhan yang berada dalam kondisi lingkungan yang kurang oksigen, seperti tanah tergenang (Sunarti, 2015).

Peran Kedua Jenis Respirasi dalam Kehidupan Tumbuhan

1. Efisiensi Energi

Respirasi Aerob: Sangat efisien dalam menghasilkan energi dengan menghasilkan hingga 36-38 molekul ATP per molekul glukosa yang dioksidasi sepenuhnya.

Respirasi Anaerob: Kurang efisien, hanya menghasilkan 2 molekul ATP per molekul glukosa melalui fermentasi.

2. Adaptasi Terhadap Lingkungan

Respirasi Aerob: Lebih umum di lingkungan dengan ketersediaan oksigen yang cukup.

Respirasi Anaerob: Penting bagi tumbuhan yang hidup di lingkungan dengan oksigen terbatas atau selama kondisi stres seperti banjir.

3. Produk Akhir

Respirasi Aerob: Menghasilkan karbon dioksida dan air sebagai produk akhir.

Respirasi Anaerob: Menghasilkan etanol atau asam laktat, tergantung pada jalur fermentasi yang digunakan.

4.2. Proses Respirasi Tumbuhan

Respirasi merupakan salah satu proses metabolik yang krusial dalam kehidupan tanaman, di mana senyawa organik dioksidasi untuk menghasilkan energi yang diperlukan untuk semua aktivitas seluler. Proses ini tidak hanya penting dalam menghasilkan ATP sebagai sumber utama energi, tetapi juga berperan dalam mempertahankan homeostasis seluler dan mendukung berbagai fungsi biologis. Secara umum, respirasi tanaman melibatkan serangkaian tahapan kompleks yang terjadi di dalam sel-sel mereka, dimulai dari glikolisis hingga fosforilasi oksidatif di mitokondria (Simanungkalit, 2009).

Respirasi pada tumbuhan pada dasarnya mirip dengan respirasi pada hewan, tetapi ada kekhasan tertentu. Proses respirasi melibatkan pembongkaran zat makanan seperti glukosa untuk menghasilkan energi dalam bentuk ATP. Namun, tumbuhan sering menggunakan cadangan makanan seperti sukrosa atau amilum, yang harus dipecah terlebih dahulu melalui hidrolisis sebelum digunakan dalam respirasi. Lipida (lemak) dan protein juga dapat digunakan sebagai sumber energi, tetapi juga memerlukan proses pembongkaran spesifik sebelum dapat digunakan dalam respirasi (James *et al.*, 2003).

Tanaman memerlukan energi yang signifikan untuk mempertahankan pertumbuhan, perkembangan, dan respons terhadap lingkungan. Respirasi memberikan tanaman kemampuan untuk memanfaatkan energi yang tersimpan dalam glukosa dan senyawa organik lainnya, yang diperoleh melalui proses fotosintesis atau

penyerapan nutrisi dari tanah. Sebagai contoh, saat tanaman mengalami kondisi lingkungan yang mengancam seperti kekurangan air atau suhu ekstrem, respirasi memungkinkan mereka untuk menyesuaikan laju metabolisme mereka untuk mempertahankan kelangsungan hidup (Sunarti, 2015).

Proses respirasi tanaman terbagi menjadi beberapa tahap utama, yang masing-masing memiliki peran penting dalam produksi energi. Glikolisis, yang terjadi di sitoplasma, adalah tahap awal di mana glukosa dipecah menjadi piruvat. Tahap selanjutnya, yaitu siklus Krebs, berlangsung di dalam matriks mitokondria, di mana piruvat dioksidasi sepenuhnya menjadi karbon dioksida dan menghasilkan NADH dan FADH₂. Selanjutnya, rantai transport elektron terjadi di membran dalam mitokondria, dimana energi dari NADH dan FADH₂ digunakan untuk menghasilkan ATP melalui fosforilasi oksidatif (Widjaja & Setyowati, 2013).

4.2.1. Tahap- Tahap Respirasi

Glikolisis

Glikolisis merupakan tahap pertama dalam respirasi seluler yang terjadi di sitoplasma sel tanaman. Proses ini dimulai dengan pemecahan molekul glukosa menjadi dua molekul piruvat. Meskipun glikolisis tidak memerlukan oksigen, ia menghasilkan sedikit ATP dan NADH yang kemudian digunakan dalam tahap-tahap respirasi yang memerlukan oksigen (Berg *et al.*, 2002).

Glikolisis pada tanaman dapat disesuaikan dengan kondisi lingkungan yang berubah. Misalnya, tanaman dapat meningkatkan laju glikolisisnya sebagai respons terhadap stres lingkungan seperti kekurangan air atau suhu yang ekstrem. Dalam kondisi stres, meningkatnya glikolisis membantu tanaman untuk memproduksi energi tambahan yang diperlukan untuk mempertahankan metabolisme dasar dan respons adaptif terhadap kondisi lingkungan yang tidak menguntungkan (Sunarti, 2015). Tahapan proses glikolisis pada tumbuhan, meliputi:

1. Pemecahan Glukosa

Glikolisis dimulai dengan pemecahan molekul glukosa menjadi dua molekul piruvat. Setiap molekul glukosa yang dipecah menghasilkan dua molekul piruvat, serta ATP dan NADH sebagai produk sampingan (Hopkins & Hüner, 2008).

2. Investasi Energi dan Penghasilan Energi

Proses glikolisis dimulai dengan investasi energi satu molekul ATP untuk mengaktifkan glukosa menjadi glukosa-6-fosfat. Selanjutnya, glukosa-6-fosfat dipecah melalui serangkaian reaksi menjadi piruvat, menghasilkan energi dalam bentuk ATP dan NADH (Stryer *et al.*, 2015).

3. Peran Kofaktor NADH

NADH yang dihasilkan selama glikolisis berperan penting dalam respirasi seluler karena berfungsi sebagai donor elektron untuk rantai transport elektron di dalam mitokondria, yang kemudian menghasilkan lebih banyak ATP melalui fosforilasi oksidatif (Berg *et al.*, 2002).

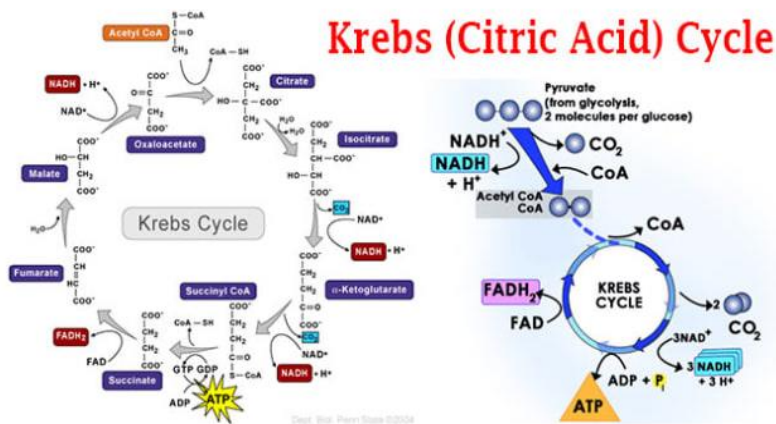
Glikolisis sebagai sumber utama produksi energi dalam bentuk ATP pada tanaman, terutama saat kondisi aerobik (dengan oksigen). Meskipun hanya menghasilkan sedikit ATP langsung (dua molekul ATP per molekul glukosa), glikolisis memberikan tanaman jalur cepat untuk memperoleh energi yang diperlukan untuk menjaga kehidupan seluler dasar (Simanungkalit, 2009). Selain sebagai sumber energi, glikolisis juga penting dalam menyediakan prekursor untuk biosintesis senyawa lain yang diperlukan dalam sel tanaman, seperti asam amino dan lipid. Proses ini memungkinkan tanaman untuk memanfaatkan glukosa sebagai sumber karbon yang dapat diarahkan ke berbagai jalur metabolisme, tergantung pada kebutuhan seluler pada waktu tertentu (Widjaja & Setyowati, 2013). Enzim-enzim yang terlibat dalam glikolisis diatur dengan ketat untuk memastikan proses berjalan dengan efisien sesuai kebutuhan seluler. Regulasi ini terutama melalui kontrol aktivitas enzim oleh berbagai faktor seperti konsentrasi substrat, produk, dan modifikasi pos-translasiional enzim (Nelson & Cox, 2008).

Glikolisis pada tanaman juga dapat beradaptasi dengan perubahan musiman atau fluktuasi lingkungan lainnya. Misalnya, di musim dingin atau saat kondisi pertumbuhan lambat, tanaman dapat menyesuaikan laju

glikolisisnya untuk mengoptimalkan penggunaan energi dalam menghadapi tantangan lingkungan yang berbeda-beda (Lambers *et al.*, 2008).

Siklus Krebs

Siklus Krebs, yang juga dikenal sebagai siklus asam sitrat atau siklus asam trikarboksilat, merupakan tahap kedua dalam respirasi seluler setelah glikolisis. Siklus ini berlangsung di matriks mitokondria dan berperan penting dalam produksi energi yang diperlukan untuk berbagai aktivitas seluler pada tanaman. Selain menghasilkan ATP, siklus Krebs juga menghasilkan molekul pengangkut elektron seperti NADH dan FADH₂, yang kemudian digunakan dalam rantai transpor elektron untuk menghasilkan lebih banyak ATP. Proses ini tidak hanya penting untuk energi, tetapi juga menyediakan intermediat untuk jalur metabolisme lainnya, seperti sintesis asam amino dan lipid, yang esensial bagi pertumbuhan dan perkembangan tanaman (Taiz & Zeiger, 2010) (**Gambar 4.1**).



Gambar 4.1 Siklus Krebs

(Sumber: Mikrobiologi.info.com)

Tahapan siklus krebs dimulai dengan penggabungan asetil-KoA dengan oksaloasetat untuk membentuk sitrat. Melalui serangkaian reaksi kimia, sitrat diubah kembali menjadi oksaloasetat, sambil melepaskan dua molekul karbon dioksida dan menghasilkan ATP, NADH, dan FADH₂. Berikut adalah tahapan utama dalam Siklus Krebs:

1. Pembentukan Sitrat
Asetil-KoA bergabung dengan oksaloasetat membentuk sitrat dengan bantuan enzim sitrat sintase.
2. Isomerisasi Sitrat
Sitrat diisomerisasi menjadi isositrat melalui enzim akonitase.
3. Dekarboksilasi Oksidatif I
Isositrat diubah menjadi α -ketoglutarat, menghasilkan NADH dan melepaskan CO_2 dengan bantuan enzim isositrat dehidrogenase.
4. Dekarboksilasi Oksidatif II
 α -Ketoglutarat diubah menjadi suksinil-KoA, menghasilkan NADH dan melepaskan CO_2 dengan bantuan enzim α -ketoglutarat dehidrogenase.
5. Pembentukan ATP
Suksinil-KoA diubah menjadi suksinat, menghasilkan ATP melalui fosforilasi tingkat substrat dengan bantuan enzim suksinil-KoA sintetase.
6. Oksidasi Suksinat
Suksinat diubah menjadi fumarat, menghasilkan FADH_2 dengan bantuan enzim suksinat dehidrogenase.
7. Hidratasi Fumarat
8. Fumarat diubah menjadi malat melalui penambahan satu molekul air dengan bantuan enzim fumarase.
9. Oksidasi Malat
Malat dioksidasi menjadi oksaloasetat, menghasilkan NADH dengan bantuan enzim malat dehidrogenase.

Siklus Krebs memiliki beberapa fungsi utama dalam respirasi seluler tanaman:

1. Produksi Energi: Menghasilkan ATP, yang merupakan sumber energi utama bagi sel tanaman untuk melakukan berbagai aktivitas metabolik.
2. Pembentukan Reduktor: Menghasilkan NADH dan FADH_2 , yang esensial dalam rantai transpor elektron untuk memproduksi lebih banyak ATP melalui fosforilasi oksidatif (Nelson & Cox, 2008).
3. Intermediat Biosintetik: Menyediakan intermediat yang digunakan dalam berbagai jalur biosintesis, termasuk sintesis asam amino dan lipid (Taiz & Zeiger, 2010).

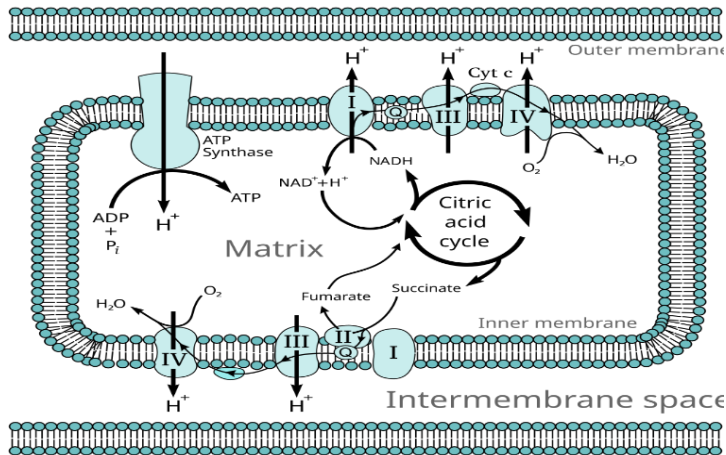
Regulasi Siklus Krebs pada tanaman dilakukan melalui beberapa mekanisme, termasuk kontrol alosterik oleh konsentrasi ATP, ADP, NADH, dan NAD⁺, serta regulasi oleh hormon dan kondisi lingkungan seperti cahaya dan suhu (Hopkins & Hüner, 2008). Tanaman dapat mengubah laju Siklus Krebs sebagai respons terhadap perubahan lingkungan, seperti stres oksidatif, kekurangan nutrisi, atau fluktuasi suhu. Adaptasi ini memungkinkan tanaman untuk mempertahankan produksi energi dan metabolisme dasar dalam kondisi yang tidak menguntungkan (Widjaja & Setyowati, 2013).

Rantai Transport Elektron

Rantai transport elektron terjadi di membran dalam mitokondria tanaman. Pada tahap ini, NADH dan FADH₂ mentransfer elektron melalui serangkaian kompleks protein di membran mitokondria. Proses ini menghasilkan gradien elektrokimia yang digunakan untuk menghasilkan ATP melalui proses fosforilasi oksidatif (Stryer *et al.*, 2015). Rantai transport elektron (RTE) merupakan tahap akhir dari respirasi seluler yang terjadi di dalam membran dalam mitokondria. Proses ini memainkan peran kunci dalam produksi energi melalui fosforilasi oksidatif. Dalam tahap ini, elektron yang dibawa oleh NADH dan FADH₂ dari tahapan sebelumnya (glikolisis dan siklus Krebs) dilepaskan dan bergerak melalui serangkaian kompleks protein yang tertanam di dalam membran mitokondria. Pergerakan elektron ini menciptakan gradien proton yang pada akhirnya digunakan untuk mensintesis ATP (Nelson, & Cox, 2008). Rantai transport elektron di mitokondria merupakan tempat berlangsungnya fosforilasi oksidatif pada eukariot (**Gambar 4.2**). NADH dan suksinat, yang diproduksi selama siklus asam sitrat, akan mengalami oksidasi, menghasilkan energi yang digunakan untuk menggerakkan ATP sintase.

Elektron bergerak melalui rantai transport elektron, di mana reaksi redoks yang bersifat eksergonik melepaskan energi. Energi yang dihasilkan digunakan untuk menciptakan gradien elektrokimia yang penting dalam sintesis adenosin trifosfat (ATP). Pada akhir proses, oksigen berfungsi sebagai akseptor elektron terakhir, membentuk air (H₂O). Dalam kondisi anaerobik, saat oksigen tidak tersedia, molekul lain seperti sulfat, nitrat, atau sulfur dapat menggantikan peran oksigen sebagai akseptor

elektron alternatif, menghasilkan produk seperti hidrogen sulfida (H_2S). Adaptasi ini memungkinkan organisme untuk bertahan dalam berbagai kondisi lingkungan yang berbeda.

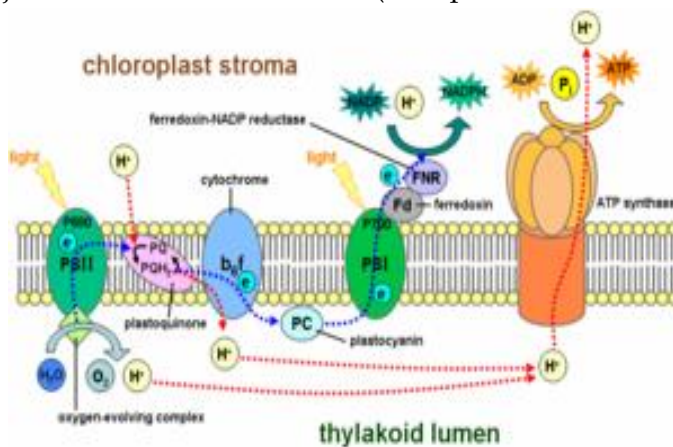


Gambar 4.2 Rantai transpor elektron pada mitokondria
(Sumber: Vasconcellos, 2007)

Reaksi redoks dalam rantai transpor elektron dipengaruhi oleh energi bebas Gibbs dari komponen-komponen rantai tersebut. Energi bebas Gibbs berkaitan dengan potensial redoks, yang menunjukkan kecenderungan suatu senyawa untuk menangkap elektron atau tereduksi, diukur dalam satuan Volt. Elektron bergerak dari potensial redoks yang lebih rendah ke yang lebih tinggi, melepaskan energi dalam prosesnya. Energi yang dihasilkan ini kemudian ditangkap oleh kompleks protein dalam rantai transpor elektron, yang memanfaatkan energi tersebut untuk memompa proton ke lumen, menciptakan gradien proton di kedua sisi membran. Gradien ini tidak stabil, sehingga proton yang telah dipompa akan kembali melalui ATP sintase (Gerasimovskaya *et al.*, 2010). ATP sintase menggunakan pergerakan proton ini untuk mensintesis ATP melalui fosforilasi oksidatif (Anraku, 1988).

Rantai transpor elektron dan fosforilasi oksidatif terjadi di membran dalam mitokondria, atau cristae, dimana elektron yang berasal dari molekul tereduksi seperti NADH dan FADH_2 bergerak melalui serangkaian kompleks protein (Gambar 4.3). Pergerakan elektron ini melepaskan energi yang digunakan untuk memompa proton melintasi membran, menciptakan gradien proton yang signifikan di sepanjang

membran. Gradien ini menciptakan potensi elektrokimia yang kemudian dimanfaatkan oleh ATP sintase untuk memfasilitasi sintesis ATP dari ADP dan fosfat anorganik. Proses ini menghubungkan pemindahan energi dari elektron dengan pembentukan ATP, yang merupakan sumber energi utama bagi berbagai fungsi seluler. Pada organisme fotosintetik seperti tumbuhan, energi cahaya matahari menggerakkan elektron melalui fotosistem di membran tilakoid kloroplas, menghasilkan ATP melalui mekanisme serupa. Sementara itu, bakteri memiliki konfigurasi rantai transpor elektron yang bervariasi, memungkinkan mereka untuk hidup dalam berbagai kondisi lingkungan dan menggunakan berbagai donor serta akseptor elektron. Pengetahuan tentang mekanisme ini penting dalam pertanian dan biologi medis, membantu meningkatkan efisiensi energi dan memahami gangguan metabolik. Meski begitu, prinsip utamanya tetap serupa di semua organisme: serangkaian reaksi redoks menghasilkan gradien elektrokimia, yang kemudian digunakan untuk sintesis ATP melalui fosforilasi oksidatif dengan bantuan ATP sintase (Krackw *et al.*, 2015). Menurut Taiz dan Zeiger (2006), reaksi-reaksi yang bergantung pada cahaya dari fotosintesis terjadi di membran tilakoid. Ini menunjukkan fosforilasi non-siklik (transpor elektron non-siklik).



Gambar 4.3 Rantai transpor elektron
(Sumber: Taiz & Zeiger, 2010)

1. Kompleks I (NADH dehidrogenase)

NADH yang dihasilkan dari glikolisis dan siklus Krebs melepaskan elektronnya ke Kompleks I. Elektron ini kemudian dipindahkan ke

ubiquinone (koenzim Q). Proses ini memindahkan proton dari matriks mitokondria ke ruang antarmembran, menciptakan gradien proton.

2. Kompleks II (Suksinat dehidrogenase)

Elektron yang dibawa oleh FADH_2 (dari siklus Krebs) dimasukkan ke dalam rantai transpor elektron melalui Kompleks II. Elektron ini juga dipindahkan ke ubiquinone. Kompleks II tidak memompa proton, tetapi berkontribusi dalam transfer elektron.

3. Kompleks III (Sitosom b-c1 kompleks)

Ubiquinone mengangkut elektron dari Kompleks I dan II ke Kompleks III. Di Kompleks III, elektron dipindahkan ke sitokrom c, dan proton dipompa dari matriks mitokondria ke ruang antarmembran.

4. Kompleks IV (Sitosom c oksidase)

Elektron dari sitokrom c dipindahkan ke oksigen, yang bertindak sebagai akseptor elektron akhir. Proses ini menghasilkan air. Kompleks IV juga memompa proton dari matriks mitokondria ke ruang antarmembran.

5. ATP Sintase

Gradien proton yang diciptakan oleh Kompleks I, III, dan IV menciptakan potensi elektro-kimia yang disebut proton motive force (PMF). Proton kemudian bergerak kembali ke matriks mitokondria melalui ATP sintase, menggerakkan sintesis ATP dari ADP dan fosfat anorganik.

Rantai transpor elektron sangat efisien dalam menghasilkan ATP, yang merupakan sumber energi utama bagi sel tanaman. Setiap NADH yang memasuki rantai transpor elektron dapat menghasilkan hingga 3 molekul ATP, sementara FADH_2 dapat menghasilkan 2 molekul ATP. Energi yang dihasilkan digunakan untuk berbagai proses metabolisme dalam sel, termasuk sintesis biomolekul, transpor aktif, dan pergerakan sel (Taiz & Zeiger, 2010). Aktivitas rantai transpor elektron diatur oleh beberapa faktor, termasuk ketersediaan substrat (NADH dan FADH_2), oksigen, dan ADP. Selain itu, kondisi lingkungan seperti suhu dan tingkat stres oksidatif juga mempengaruhi efisiensi rantai transpor elektron (Sunarti, 2015). Tanaman yang tumbuh dalam kondisi stres, seperti kekeringan atau suhu ekstrem, dapat mengalami perubahan dalam

efisiensi rantai transpor elektron. Penyesuaian ini memungkinkan tanaman untuk mengelola produksi energi dan mengurangi kerusakan oksidatif yang disebabkan oleh spesies oksigen reaktif (Widjaja & Setyowati, 2013).

4.3 Dampak Terganggunya Proses Respirasi

Respirasi adalah proses penting yang memungkinkan tumbuhan untuk menghasilkan energi yang dibutuhkan untuk berbagai aktivitas seluler. Terganggunya respirasi pada tumbuhan dapat memiliki berbagai akibat negatif yang memengaruhi pertumbuhan, perkembangan, dan kelangsungan hidup tumbuhan. Pada tumbuhan, respirasi terjadi di dalam mitokondria, organel yang sering disebut sebagai "pembangkit tenaga" sel. Selama proses ini, glukosa dan oksigen digunakan untuk menghasilkan ATP, karbon dioksida, dan air melalui tiga tahap utama: glikolisis, siklus Krebs, dan rantai transpor elektron (Sunarti, 2011).

Namun, ketika proses respirasi terganggu, berbagai akibat negatif dapat terjadi yang mempengaruhi pertumbuhan, perkembangan, dan kelangsungan hidup tumbuhan. Gangguan ini dapat disebabkan oleh berbagai faktor termasuk kondisi lingkungan yang ekstrem, kekurangan nutrisi, atau serangan patogen. Penurunan efisiensi respirasi dapat menghambat produksi ATP, mengganggu keseimbangan metabolik, dan menyebabkan akumulasi produk-produk antara yang beracun bagi sel (Widjaja, 2005; Soetopo, 2003). Selain itu, tumbuhan yang mengalami gangguan respirasi sering kali kurang mampu merespons stres lingkungan dengan efektif. Hal ini karena energi yang diperlukan untuk mekanisme pertahanan dan adaptasi tidak mencukupi. Misalnya, selama kondisi kekeringan atau suhu ekstrem, tumbuhan memerlukan energi ekstra untuk menyesuaikan diri, dan gangguan dalam respirasi dapat membuat mereka lebih rentan terhadap kerusakan (Sumarni, 2004).

Respirasi tidak hanya penting untuk energi, tetapi juga untuk pengaturan metabolisme dan pemeliharaan keseimbangan ion dalam sel. Berikut ini adalah beberapa dampak yang mungkin terjadi jika respirasi pada tumbuhan terganggu:

- 1) Penurunan Produksi Energi (ATP)
Tumbuhan mengandalkan ATP untuk berbagai proses metabolisme. Ketika respirasi terganggu, produksi ATP menurun, yang dapat mengakibatkan penurunan energi untuk aktivitas seperti sintesis protein, transportasi aktif, dan pembelahan sel (Taiz & Zeiger, 2010; Simanungkalit, 2007).
- 2) Akumulasi Produk Antara
Jika rantai respirasi terganggu, produk antara seperti piruvat, NADH, atau FADH₂ dapat menumpuk dalam sel. Akumulasi ini dapat menghambat jalur metabolisme lainnya dan menyebabkan ketidakseimbangan metabolik (Sunarti, 2011).
- 3) Kerusakan Sel dan Jaringan
Penurunan produksi ATP dapat mengganggu fungsi membran sel, termasuk transportasi ion dan osmoregulasi. Hal ini dapat menyebabkan kerusakan sel dan jaringan, yang pada akhirnya mempengaruhi pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan (Widjaja, 2005).
- 4) Penurunan Pertumbuhan dan Produktivitas
Respirasi yang tidak optimal dapat mengakibatkan penurunan pertumbuhan vegetatif dan reproduktif. Hal ini bisa terlihat dari lambatnya pertumbuhan akar, batang, dan daun, serta berkurangnya produksi bunga dan buah (Soetopo, 2003).
- 5) Respon Terhadap Stres
Tumbuhan yang mengalami gangguan respirasi sering kali kurang mampu merespons stres lingkungan seperti kekeringan, suhu ekstrem, dan serangan patogen. Hal ini dikarenakan energi yang diperlukan untuk respon adaptif tidak mencukupi (Sumarni, 2004).
- 6) Fermentasi dan Pembentukan Senyawa Toksik
Jika respirasi aerob terganggu dan oksigen tidak tersedia, tumbuhan dapat beralih ke respirasi anaerob yang menghasilkan produk sampingan seperti etanol dan asam laktat. Akumulasi senyawa ini dapat bersifat toksik bagi sel dan menyebabkan kerusakan lebih lanjut (Nelson & Cox, 2008).
- 7) Pengaruh terhadap Proses Fotosintesis
Respirasi yang terganggu dapat mengurangi jumlah ATP dan NADPH yang tersedia untuk fotosintesis, mengakibatkan penurunan efisiensi

fotosintesis dan produksi biomassa (Decreased sucrose content triggers starch breakdown and respiration in stored potato tubers, 2020).

8) Efek pada Pembelahan dan Diferensiasi Sel

Energi yang dihasilkan dari respirasi sangat penting untuk proses pembelahan dan diferensiasi sel. Gangguan dalam respirasi dapat menyebabkan kelainan pada perkembangan jaringan dan organ tanaman (Taiz & Zeiger, 2010).

4.4 Respirasi pada Organ dan Jaringan Tumbuhan Tertentu

Respirasi adalah proses penting yang terjadi di seluruh bagian tumbuhan, termasuk akar, batang, daun, dan biji. Meskipun proses dasarnya sama, masing-masing organ memiliki karakteristik dan fungsi khusus dalam proses respirasi.

4.4.1. Respirasi pada Akar

Akar berfungsi untuk menyerap air dan nutrisi dari tanah, dan respirasi di akar penting untuk menghasilkan energi yang dibutuhkan dalam proses ini.

a. Proses Respirasi di Akar

Respirasi akar terjadi di mitokondria sel-sel akar, menggunakan oksigen yang tersedia di tanah untuk mengoksidasi glukosa menjadi karbon dioksida dan air, sambil menghasilkan ATP. Proses ini mencakup glikolisis, siklus Krebs, dan rantai transpor elektron.

b. Faktor Pengaruh

Kondisi tanah, termasuk ketersediaan oksigen, kelembaban, dan suhu, sangat mempengaruhi laju respirasi akar. Tanah yang tergenang atau kurang aerasi dapat menyebabkan respirasi anaerob yang kurang efisien dan menghasilkan produk sampingan yang dapat beracun bagi tumbuhan (Soetopo, 2003; Taiz & Zeiger, 2010).

4.4.2. Respirasi pada Batang

Batang berfungsi sebagai penopang struktural dan jalur transportasi untuk air, nutrisi, dan fotosintat antara akar dan daun.

a. Proses Respirasi di Batang

Respirasi pada batang terjadi di sel-sel parenkim yang terdapat di jaringan floem dan xilem. Batang yang lebih muda umumnya memiliki laju respirasi lebih tinggi karena aktivitas metaboliknya yang lebih besar dibandingkan dengan batang yang sudah berkayu (Simanungkalit, 2007; Gardner *et al.*, 2003).

b. **Peran dalam Transportasi**

Energi yang dihasilkan dari respirasi batang digunakan untuk transportasi aktif ion dan molekul melalui membran sel, serta untuk pertumbuhan dan perbaikan jaringan (Sunarti, 2011; Campbell & Reece, 2005).

4.4.3. Respirasi pada Daun

Daun adalah organ utama untuk fotosintesis, tetapi juga melakukan respirasi untuk memenuhi kebutuhan energi dan metabolisme lainnya.

a. **Proses Respirasi di Daun**

Respirasi daun terjadi di mesofil dan sel-sel epidermis. Pada malam hari, ketika fotosintesis berhenti, respirasi menjadi satu-satunya sumber energi bagi sel-sel daun. Proses ini juga penting untuk mendaur ulang produk antara fotosintesis dan menjaga keseimbangan metabolik (Widjaja, 2005; Jones, 1992).

b. **Interaksi dengan Fotosintesis**

Selama siang hari, respirasi dan fotosintesis terjadi secara bersamaan. Respirasi menghasilkan CO₂ yang dapat digunakan dalam fotosintesis, sementara ATP dan NADPH dari fotosintesis dapat digunakan dalam respirasi (Sumarni, 2004; Raven *et al.*, 1999).

4.4.4. Respirasi pada Biji

Biji adalah organ reproduksi yang menyimpan nutrisi untuk mendukung perkecambahan dan pertumbuhan awal tanaman.

a. **Proses Respirasi di Biji**

Selama penyimpanan, biji berrespirasi pada tingkat rendah untuk menjaga kelangsungan hidup. Namun, selama perkecambahan, laju

respirasi meningkat drastis untuk menyediakan energi yang dibutuhkan untuk pertumbuhan embrio (Soetopo, 2003; Taiz & Zeiger, 2010).

b. Faktor Pengaruh

Kandungan air dalam biji dan suhu lingkungan sangat mempengaruhi laju respirasi. Biji yang terlalu kering atau terpapar suhu ekstrem mungkin mengalami dormansi atau kerusakan akibat respirasi yang terganggu (Simanungkalit, 2007; Bewley & Black, 1994).

4.5 Teknik Pengukuran Respirasi

Mengukur respirasi tumbuhan merupakan langkah dasar dalam memahami proses produksi energi dan adaptasi tanaman terhadap lingkungan mereka (Taiz & Zeiger, 2010). Respirasi tumbuhan melibatkan konversi energi kimia dari glukosa menjadi ATP (adenosin trifosfat), yang digunakan dalam berbagai fungsi biologis. Proses ini terjadi dalam mitokondria sel dan melibatkan tiga tahap utama: glikolisis, siklus Krebs, dan rantai transportasi elektron. Memahami bagaimana respirasi berlangsung dapat memberikan wawasan tentang bagaimana tanaman memproduksi energi yang diperlukan untuk pertumbuhan, perkembangan, dan respons terhadap kondisi lingkungan (Buchanan *et al.*, 2015).

Ada berbagai metode yang dapat digunakan untuk mengukur respirasi tumbuhan, baik secara *in vivo* maupun *in vitro* (Sachs, 2012). Metode *in vivo* mengukur respirasi langsung pada tanaman hidup dengan menggunakan alat seperti respirometer yang dapat menangkap gas yang dikeluarkan oleh tanaman dalam kondisi alami. Di sisi lain, metode *in vitro* melibatkan pengukuran respirasi pada bagian-bagian tanaman yang telah diisolasi, seperti daun atau akar, di luar konteks organisme hidup. Kedua pendekatan ini memiliki kelebihan dan keterbatasan yang perlu dipertimbangkan tergantung pada tujuan penelitian dan jenis data yang diinginkan SSS

Teknologi dan alat yang digunakan untuk mengukur respirasi tumbuhan semakin berkembang, menawarkan akurasi dan kemudahan yang lebih baik (McDonald *et al.*, 2016). Alat seperti gas analyzer dan sensor CO₂ canggih dapat memberikan data yang lebih detail tentang laju

respirasi dan komposisi gas yang terlibat. Selain itu, teknologi berbasis komputer dan perangkat lunak analisis memungkinkan peneliti untuk mengumpulkan dan menganalisis data respirasi secara real-time, serta membuat model prediktif tentang bagaimana respirasi tanaman mungkin berubah di bawah berbagai kondisi lingkungan (Villar & Merino, 2001).

Dengan kemajuan dalam alat dan teknologi ini, peneliti dapat lebih memahami dinamika respirasi tumbuhan dan bagaimana tanaman beradaptasi terhadap tantangan lingkungan seperti perubahan iklim dan stres abiotik (Flexas *et al.*, 2004). Penelitian ini sangat penting dalam konteks pertanian dan ekologi, karena informasi tentang respirasi tanaman dapat membantu dalam pengembangan praktik pertanian yang lebih berkelanjutan dan strategi konservasi yang efektif (Wang *et al.*, 2020).

4.5.1 Metode Pengukuran Respirasi In Vivo dan In Vitro (Soetopo, 2003).

1. Pengukuran In Vivo:

- **Respirometer:** Alat ini digunakan untuk mengukur laju respirasi dengan mendeteksi perubahan dalam volume gas. Prinsip kerjanya didasarkan pada pengukuran konsumsi oksigen atau produksi karbon dioksida.
- **Gas Analyzer:** Digunakan untuk mengukur konsentrasi gas seperti oksigen dan karbon dioksida di sekitar tanaman. Contoh alat ini adalah IRGA (Infrared Gas Analyzer) yang mengukur konsentrasi CO₂ dengan menggunakan prinsip absorpsi infra merah.
- **Chlorophyll Fluorescence:** Teknik ini mengukur perubahan fluoresensi klorofil yang berkaitan dengan respirasi dan fotosintesis. Fluoresensi klorofil dapat memberikan informasi tentang efisiensi penggunaan energi dalam sel tanaman

2. Pengukuran In Vitro:

- Oxygen Electrode (Taiz dan Zeiger, 2010):
Kegunaan: Mengukur konsumsi oksigen dalam sel atau ekstrak mitokondria.

Prinsip Kerja: Mengukur perubahan konsentrasi oksigen dalam larutan dengan menggunakan elektroda oksigen yang sensitif terhadap perubahan parsial tekanan oksigen.

- Oxygen Electrode: Digunakan untuk mengukur konsumsi oksigen dalam suspensi sel atau ekstrak mitokondria. Alat ini mengukur perubahan konsentrasi oksigen dalam larutan.
- Enzyme Assays: Pengukuran aktivitas enzim-enzim kunci dalam respirasi seperti dehidrogenase, yang dapat memberikan informasi tentang laju reaksi respirasi.
- Spectrophotometry: Digunakan untuk mengukur perubahan konsentrasi molekul yang terlibat dalam respirasi, seperti NADH atau FADH₂, dengan memantau absorpsi cahaya pada panjang gelombang tertentu.

4.6 Aplikasi Pengetahuan Respirasi dalam Pertanian

Pengetahuan tentang respirasi tanaman memiliki aplikasi yang signifikan dalam bidang pertanian, terutama dalam meningkatkan efisiensi produksi dan pengelolaan tanaman. Respirasi tanaman adalah proses metabolisme dasar yang mempengaruhi berbagai aspek pertumbuhan dan produktivitas tanaman, termasuk kesehatan akar, respons terhadap stres, dan pemanfaatan sumber daya. Dengan memahami mekanisme respirasi, petani dapat mengoptimalkan kondisi lingkungan dan praktik budidaya untuk mendukung pertumbuhan tanaman yang lebih baik dan hasil yang lebih tinggi (Lambers *et al.*, 2008).

Salah satu aplikasi utama pengetahuan respirasi dalam pertanian adalah pengelolaan stres abiotik seperti kekeringan dan suhu ekstrem. Tanaman yang mengalami stres abiotik sering kali menunjukkan perubahan dalam laju respirasi, yang dapat memengaruhi efisiensi fotosintesis dan kesehatan tanaman secara keseluruhan. Penelitian oleh Chaves *et al.*, (2003) menunjukkan bahwa pemantauan respirasi dapat membantu dalam mengidentifikasi tanaman yang lebih toleran terhadap stres, sehingga memungkinkan pemilihan varietas yang lebih resilient dan pengembangan strategi pemulihan yang lebih efektif.

Selain itu, informasi tentang respirasi juga dapat diterapkan dalam manajemen nutrisi tanaman. Respirasi yang efisien berhubungan dengan

penggunaan nutrisi yang lebih baik dan pengurangan limbah metabolik. Menurut Goudriaan & van Laar (1994), pemahaman tentang hubungan antara respirasi dan kebutuhan nutrisi tanaman memungkinkan pengaturan pemupukan yang lebih tepat, yang dapat meningkatkan pertumbuhan tanaman dan hasil panen. Ini termasuk penyesuaian dosis pupuk dan waktu aplikasi untuk memaksimalkan efektivitasnya.

Teknologi berbasis respirasi juga memiliki potensi besar dalam meningkatkan manajemen irigasi. Metode pengukuran respirasi seperti sensor CO₂ dan alat gas analyzer dapat memberikan informasi real-time tentang kebutuhan air tanaman. Berdasarkan penelitian oleh Jones *et al.*, (2006), pemantauan respirasi dapat membantu dalam menentukan kapan dan seberapa banyak tanaman membutuhkan air, sehingga mengurangi pemborosan dan meningkatkan efisiensi penggunaan air di lahan pertanian. Akhirnya, pengetahuan tentang respirasi dapat diterapkan dalam pengembangan teknik pascapanen yang lebih baik. Respirasi berperan dalam perubahan kualitas produk pascapanen, seperti penyimpanan buah dan sayuran. Menurut Kader (2002), kontrol terhadap laju respirasi selama penyimpanan dapat membantu memperpanjang umur simpan produk dan menjaga kualitasnya. Oleh karena itu, penggunaan teknik yang memantau dan mengatur respirasi selama penyimpanan menjadi krusial dalam memastikan bahwa produk pertanian sampai ke konsumen dalam kondisi terbaik.

Bab 5

TRANSPORTASI AIR DAN NUTRISI DALAM TUMBUHAN

5.1 Proses-Proses Penting

103 Difusi. Pergerakan molekul air dan zat-zat terlarut di dalam sel selalu bergerak, menyebabkan terjadi perpindahan molekul-molekul air dari satu bagian ke bagian lain terus menerus. Pada kondisi sel dalam keadaan seimbang maka pergerakan molekul-molekul di dalam suatu medium tidak akan menimbulkan efek apapun. Sebaliknya pada keadaan tidak seimbang, maka akan lebih banyak molekul bergerak ke satu arah sehingga terjadilah difusi. Difusi didefinisikan sebagai gerakan molekul sejenis dari daerah dengan konsentrasi tinggi ke daerah yang berkonsentrasi rendah.

3 Contoh: peristiwa mengalirnya atau berpindahnya suatu zat dalam pelarut dari bagian berkonsentrasi tinggi ke bagian yang berkonsentrasi rendah. Perbedaan konsentrasi yang ada pada dua larutan disebut gradien konsentrasi. Difusi akan terus terjadi hingga seluruh partikel tersebar luas secara merata atau mencapai keadaan kesetimbangan. Difusi air dalam cairan di dalam ruangan tertutup terjadi apabila banyaknya molekul air yang meninggalkan ruang lebih besar dari pada yang kembali ke dalam ruang. Difusi berhenti apabila keseimbangan tercapai, yaitu apabila jumlah molekul yang meninggalkan ruang sama dengan yang kembali ke dalam ruang.

3 Proses pengambilan zat-zat nutrisi penting dan pengeluaran zat-zat yang tidak diperlukan dilakukan oleh sel dalam berbagai jenis aktivitas, dan salah satunya adalah difusi. Terdapat dua jenis difusi sel, yaitu difusi biasa dan difusi khusus. Difusi biasa terjadi ketika sel pengambilan nutrisi atau molekul yang hydrophobic (tidak berpolar/berkutub). Molekul dapat

langsung berdifusi ke dalam membran plasma yang terbuat dari phospholipids. Difusi jenis ini tidak memerlukan energi ATP (Adenosine Tri-Phosphate).

Difusi khusus terjadi ketika sel akan mengambil nutrisi dalam bentuk molekul hydrophilic atau berpolar dan ion. Difusi ini memerlukan protein khusus yang memberikan jalur kepada partikel-partikel tersebut ataupun membantu dalam perpindahan partikel. Hal ini disebabkan karena partikel-partikel tersebut tidak dapat melewati membran plasma dengan mudah (Jain, 2002). Protein-protein yang turut campur dalam difusi khusus ini biasanya berfungsi untuk partikel spesifik. Menurut Darmawan dan Baharsjah (1983), jumlah relative molekul yang bergerak menentukan arah difusi. Kecepatan difusi ditentukan oleh empat faktor yaitu:

1. Ukuran molekul. Makin besar molekul makin lambat difusi terjadi. Laju difusi berbanding terbalik dengan akar dari berat molekul.
2. Konsentrasi molekul. Laju difusi didasarkan pada besar gradien konsentrasi yang ada pada dua zat. Makin besar gradien konsentrasi, makin cepai difusi terjadi.
3. Temperatur. Makin tinggi temperatur makin cepat difusi akibat gerakan molekul yang makin cepat.
4. Jenis medium dimana molekul bergerak. Proses difusi pada zat padat biasanya akan lebih lambat dibandingkan dengan zat cair dan zat gas.

Imbibisi adalah difusi dimana zat tertentu yang ditempatkan dalam partikel cairan, menyerap cairan tersebut dan membengkak, sehingga meningkatkan volumenya. Proses imbibisi melibatkan penyerapan air. Sebagian besar membrane, selaput, terutama plasmalema, dan tonoplas pada sel-sel tanaman memperlihatkan sifat permeabilitas dengan hanya melalukan molekul-molekul air, dan sulit melalukan molekul-molekul zat terlarut (solute). Membran yang sama sekali tidak dapat ditembus oleh zat terlarut disebut membran semi permeable ((Jain, 2002; Darmawan dan Baharsjah, 1983).

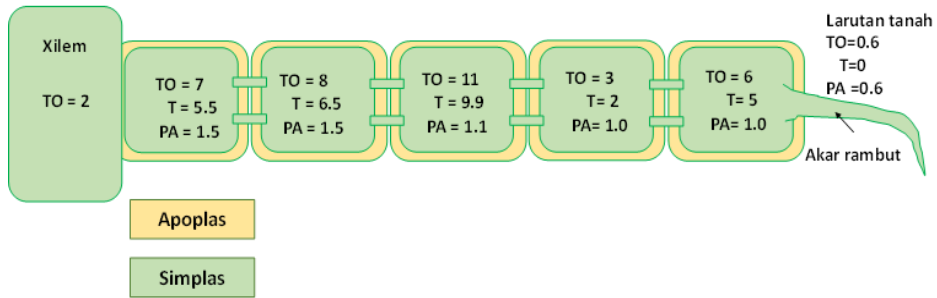
Osmosis adalah bagian aktivitas dalam sel berupa perpindahan molekul terlarut melalui selaput semipermeabel dari bagian yang lebih encer ke bagian yang lebih pekat. Peristiwa osmosis ditandai masuknya air ke dalam sel-sel akar, setelah menembus dinding dan membran sel.

Dengan demikian, osmosis adalah difusi air menembus membran sel, yang juga suatu bentuk difusi dimana terdapat keterlibatan massa air yang bergerak lebih cepat apabila melalui selaput semi permeabel dari pada difusi biasa, sebab diringi gerakan massa (Darmawan dan Baharsjah, 1983).

69 Tekanan osmotik dibutuhkan untuk mempertahankan kesetimbangan osmotik antara suatu larutan dan pelarut murninya, dipisahkan oleh suatu membran semipermeabel yang dapat ditembus hanya oleh pelarut tersebut. Tekanan osmotik adalah tekanan minimum pada larutan untuk mencegah aliran molekul pelarut melalui membran semipermeabel. Membran semipermeabel memiliki pori-pori kecil sehingga memungkinkan pergerakan pelarut antara dua larutan yang berbeda.

97 Pergerakan air dari satu sel ke sel lain dalam akar terjadi karena adanya gradien PA antar sel (**Gambar 5.1**). Walaupun dari satu sel ke sel lain tidak terdapat gradien yang teratur pada TO maupun T. PA dinyatakan dalam nilai absolutnya, jadi tanpa menghiraukan arahnya atau tanda negatifnya, sehingga $[PA=TO-T]$. Air merembes ke dalam sel secara osmosis hingga sel membengkak dan tegang. Pada kondisi tersebut terjadi tiga jenis tekanan yaitu, tekanan osmotik (TO), Turgor (T), dan Potensi Air (PA). TO adalah lekukan maksimum yang dapat terjadi akibat proses osmosis didalam larutan TO bukan merupakan tekanan sesungguhnya, akan tetapi tekanan yang dapat terjadi (potensial) bila keadaan ideal. T adalah tekanan di dalam sel tumbuh-tumbuhan yang timbul akibat adanya gerakan air ke dalam sel dengan cara osmosis, sedangkan dinding sel tidak memungkinkan pengembangan sel. Jadi turgor merupakan tekanan yang diberikan pada larutan oleh dinding sel yang kenyal disebut juga tekanan dinding. PA adalah selisih tekanan antara TO dengan T, Jadi, PA merupakan tekanan sesungguhnya di dalam sel (Salisbury dan Ross, 1995a; Darmawan dan Baharsjah, 1983).

24



Gambar 5.1 Pergerakan air dari dalam tanah melalui sel-sel sampai di pembuluh xilem (semua angka dalam satuan atm)
(Sumber: Darmawan dan Baharsjah, 1983)

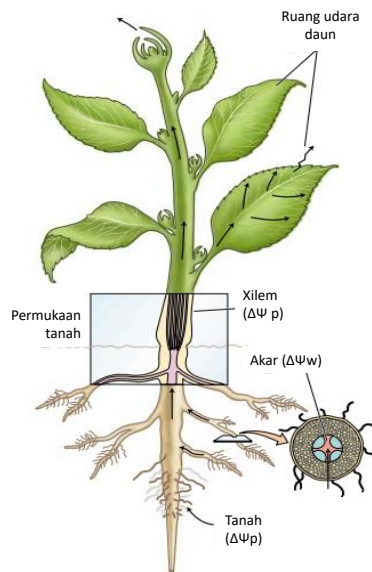
5.2 Transportasi Air

Transportasi air di dalam tanaman serta antara tanaman dan lingkungannya berkorelasi dengan hilangnya air dari daun didorong oleh suatu gradien konsentrasi uap air yang dikenal dengan peristiwa transpirasi (Lakitan, 2018). Pengangkutan air dan hara di xilem didorong oleh gradien tekanan, seperti pergerakan air di dalam tanah. Transportasi air melalui lapisan sel seperti korteks akar bersifat kompleks, sebagai respon gradien potensial air di seluruh jaringan. Sepanjang jalur ini transportasi air bersifat pasif dalam artian energi bebas air berkurang seiring dengan pergerakannya. Meskipun bersifat pasif, pengangkutan ini diatur dengan baik oleh tanaman untuk meminimalkan dehidrasi dengan mengatur transpirasi ke atmosfer (Wiraatmaja, 2016; Darmawan dan Baharsjah, 1983).

Air di dalam pohon naik melalui bagian kayu (xilem) dan tidak didalam kulit. Hal ini telah terbukti dengan cara pengupasan kulit (ring) yang ternyata sama sekali tidak mengganggu aliran air dalam tanaman. Elemen xilem terbentuk dari sel kambium yang membelah menjadi 1 sel kambium dan 1 sel xilem atau 1 sel kambium dan 1 sel floem. Xilem terdiri dari 3 jenis sel, yaitu sel-sel pembuluh (vessel), sel-sel parenkima dan trakeida. Sel-sel pembuluh berbentuk lonjong yang terbentuk dari bagian ujung sel yang pecah, mati dan dindingnya menebal, kemudian terbentuklah pembuluh yang dapat mengalirkan air dari akar ke seluruh bagian tanaman (Darmawan dan Baharsjah, 1983).

Xilem adalah jenis jaringan pembuluh yang bertanggung jawab untuk pengangkutan air dan mineral. Selain sel-sel pembuluh yang mengalirkan air adalah trakeida yaitu sel-sel berbentuk panjang. Transportasi air di dalam tanaman dapat terjadi walaupun seluruh sel akar telah mati. Apabila di dalam pembuluh xilem terjadi gelembung-gelembung gas atau udara, maka air akan tetap mengalir ke atas melalui pembuluh-pembuluh di sebelahnya, menghindari gelembung-gelembung udara dan gas tersebut (Darmawan dan Baharsjah, 1983).

Mekanisme transportasi air. Taiz and Zeiger (2002) menyebutkan, pengangkutan air pada tumbuhan melibatkan dua proses berbeda. Dari berbagai teori mengenai mekanisme transportasi air, terdapat dua teori yang dapat diterima dan dibuktikan kebenarannya melalui berbagai percobaan. Teori yang pertama adalah tekanan akar dan kedua adalah teori kohesi antar molekul air. Pergerakan air ke atas dari akar sampai ke ujung pucuk, daun dan dahan disebut ascent of sap, disebabkan oleh tekanan akar (**Gambar 5.2**).



Gambar 5.2 Kekuatan pendorong utama aliran air dari tanah melalui tumbuhan ke atmosfer: perbedaan konsentrasi uap air (ΔC_{wv}), tekanan hidrostatik ($\Delta \Psi_p$), dan potensi air ($\Delta \Psi_w$) (Sumber: Taiz and Zeiger, 2002)

31 Dua faktor mengatur gerakan ini yaitu, 1) Tekanan akar, adalah tekanan yang dihasilkan ketika akar menyerap kelebihan air melalui proses aktif. Oleh karena itu, air yang sudah ada sebelumnya didorong ke atas sepanjang batang hingga ketinggian (ingat sifat fisika air). Tekanan akar kemungkinan besar terjadi ketika tanah berair potensinya tinggi dan laju transpirasinya rendah. Kapan laju transpirasi tinggi, air diserap dengan cepat ke dalam dedaunan dan hilang ke atmosfer. 2) Tarikan transpirasi, yaitu hilangnya air dalam bentuk uap air. Transpirasi terus menerus yang terjadi pada seluruh daun tumbuhan menimbulkan tekanan negatif pada kolom air (xilem). Hal ini menimbulkan tarikan ke atas pada kolom air, yang disebut tarikan transpirasi (teori kohesi antar molekul air). Dengan demikian, air yang ada di kolom xilem terangkut sampai ke ujung batang, daun, dan bagian-bagian tanaman lainnya (Taiz and Zieger, 2002; Darmawan dan Baharsjah, 1993).

Jalur Pergerakan Air. Air dapat bergerak melalui akar melalui tiga jalur terpisah yaitu apoplast, simplas, dan transmembran (transeluler). Pada jalur apoplast (jalur apoplastik), air bergerak melalui ruang antar sel dan di dalam dinding sel itu sendiri. Pada jalur simplas (jalur simplas), air berpindah dari sitoplasma ke sitoplasma melalui plasmodesmata. Pada jalur transmembran, air melintasi membran plasma, masuk dan keluar setiap sel. Air bergerak melalui jalur transmembran sehingga bergerak melalui simplas (sitoplasma yang saling berhubungan) dan apoplast (dinding sel dan ruang antar sel). Air juga dapat melintasi tonoplas, memasuki vakuola sentral sebagai bagian dari jalur transmembran. Air dari tanah diserap oleh rambut akar epidermis dan kemudian bergerak melalui korteks melalui salah satu dari tiga jalur. Namun, batas dalam korteks, endodermis, tahan terhadap air karena adanya jalur Casparian. Terlepas dari bagaimana air berpindah ke titik ini (apoplast, simplas, transmembran), air harus masuk ke sitoplasma sel endodermal. Dari sini air dapat melewati plasmodesmata ke dalam sel-sel silinder (stele). Begitu masuk, air kembali bebas bergerak melalui apoplast, simplas, atau keduanya (transmembran) (Hamim, 2019; Taiz and Zieger, 2002; Darmawan dan Baharsjah, 1993)..

Pergerakan air dan mineral melalui akar. Air bergerak melalui rambut akar sel epidermis melalui korteks, termasuk endodermis, sebelum memasuki lapisan terluar silinder pembuluh darah, yaitu pericycle.

silinder pembuluh darah (stele). Air akhirnya memasuki sel-sel penghantar xilem. Air dapat berpindah antar sel dan melalui dinding sel serta ruang antar sel pada jalur apoplas (jalur apoplastik) atau antar sitoplasma yang berdekatan melalui plasmodesmata pada jalur simplas (jalur simplas). Pada kedua jalur tersebut, semua air harus bergerak melalui sitoplasma sel endodermal karena jalur Casparian menghalangi pergerakan apoplastik melintasi jalur Casparian. Langkah-langkah jalur apoplastik adalah sebagai berikut: 1) Air dan mineral diserap oleh dinding hidrofilik epidermis akar. Mereka berdifusi sepanjang dinding sel permeabel ke dalam korteks akar. 2) Air dan mineral mengenai pita Kaspari, sebuah penghalang lilin di apoplast yang memaksa apa pun di apoplast melintasi membran sel untuk penyaringan sebelum memasuki stele (silinder pembuluh vascular). 3) Larutan yang disaring dilepaskan kembali ke dalam apoplast di sisi lain jalur kasparia oleh sel endodermal dan sel stele hidup. 4) Air dan mineral dalam stele apoplast masuk ke xilem (yang sudah mati dan merupakan bagian dari apoplast), kemudian mengalir secara massal ke atas akar. Langkah-langkah jalur simplastik adalah sebagai berikut: 1) Air dan mineral segera disaring saat melintasi membran sel sel rambut akar, memasuki simplas. 2) Air dan mineral berpindah dari sel ke sel melalui plasmodesmata menuju silinder stele. 3) Karena mineral dan air ini sudah berada di dalam simplas (dan sudah disaring oleh membran), maka mineral dan air tersebut dapat melewati jalur Casparian. Sel endodermal dan sel stele hidup melepaskan air dan mineral ke dalam stele apoplast (xilem) (Darmawan dan Baharsjah, 1993).

5.3 Transpirasi

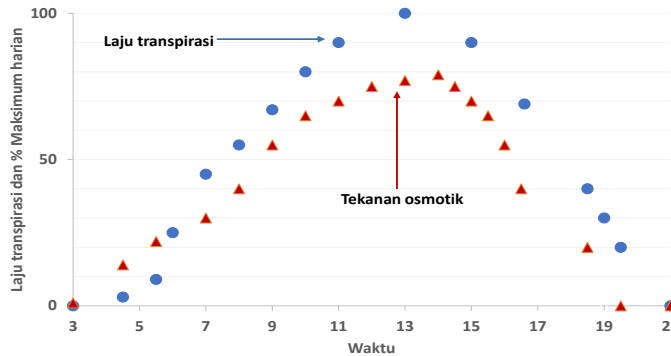
Transpirasi pada tumbuhan tingkat tinggi menyumbang sekitar tiga perempat dari air yang menguap di seluruh permukaan tanah dan seperdelapannya menguap di seluruh bumi. Ketersediaan air merupakan salah satu faktor utama yang membatasi produksi tanaman terestrial dalam skala global. Karena tumbuhan tidak memiliki membran yang permeabel terhadap CO₂ dan kedap air, transpirasi merupakan konsekuensi fotosintesis yang tidak dapat dihindari. Transpirasi berhubungan dengan kehilangan air. Hilangnya air transpirasi dari daun didorong oleh gradien konsentrasi uap air. Transportasi jarak jauh di xilem

didorong oleh gradien tekanan, seperti pergerakan air di dalam tanah. Transportasi air melalui lapisan sel seperti korteks akar bersifat kompleks, tetapi transpirasi merespons gradien potensial air di seluruh jaringan (Harahap 2012; Darmawan dan Baharsjah, 1993).

22 Mekanisme transpirasi terjadi akibat adanya gradien dalam tekanan uap antara rongga daun dan udara sekitarnya. Transpirasi terjadi dari udara yang lembab ke udara yang lebih kering, melalui stomata. 22 Difusi melalui stomata adalah 50–100 kali lebih besar dari pada melalui sistem terbuka dengan luas yang sama. Hal ini disebabkan karena transpirasi melibatkan aliran massa. Transpirasi dipengaruhi oleh faktor-faktor, 1) Sinar matahari, 2) Konduksi, 3) Konveksi, 4) Struktur daun, 5) Kadar air tanah, dan 6) Kadar uap air di udara.

Fluktuasi transpirasi. Pada hari cerah suhu harian tertinggi terjadi sekitar pukul 15.00. pada waktu matahari terbit, stomata mulai terbuka, dan gradien tekanan uap kecil sehingga transpirasi pun kecil. Bila hari makin siang maka suhu meningkat dan gradien tekanan uap meningkat yang mengakibatkan meningkatnya transpirasi. Setelah pukul 12.00 siang sel-sel sekitar stomata mulai kekurangan air karena besarnya transpirasi. Air dan sel juga mengalir ke daerah sekitarnya dan menyebabkan stomata tertutup dan transpirasi menurun. Fluktuasi transpirasi umumnya disertai fluktuasi tekanan osmotik daun yang sejalan. Bila transpirasi meningkat pada siang hari, maka tekanan osmotik sel-sel daun juga meningkat (Darmawan dan Baharsjah, 1983).

Pada waktu stomata tertutup, turgor dalam sel juga meningkat lagi akibat air yang naik dari akar dan masuk kembali ke dalam sel. Hal ini menyebabkan stomata kembali terbuka dan transpirasi meningkat sekitar pukul 14.00. sebelum stomata tertutup kembali sampai pagi. Apabila keadaan air tanah rendah maka transpirasi mencapai puncaknya sekitar pukul 11.00-12.00 lebih awal dari pada transpirasi pada keadaan normal. Peningkatan suhu udara baru terjadi 2–3 jam setelah peningkatan radiasi matahari (**Gambar 5.3**).



Gambar 5.3 Fluktuasi transpirasi dan tekanan osmotik sel-sel daun selama 18 jam

(Sumber: Darmawan dan Baharsjah, 1983)

5.4 Daun dan Atmosfir

Fungsi utama daun adalah sebagai tempat terjadinya fotosintesis kemudian mengekspor fotosintat hasil fotosintesis ke seluruh bagian tanaman. Fotosintesis memerlukan CO₂ yang masuk ke dalam daun, sebagian besar melalui stomata. Daun menyerap karbon dioksida dari udara, menggabungkannya dengan air yang berasal dari akar tanaman untuk membuat molekul gula yang dikenal sebagai glukosa, dan melepaskan oksigen ke udara. Darmawan dan Baharsjah (1983), mengemukakan, pada saat akar mulai kekurangan air di dalam tanah maka tanaman akan melepaskan asam absisat (ABA). Peran ABA berikatan dengan protein reseptor di membran plasma sel penjaga dan sitosol, terutama untuk meningkatkan pH sitosol sel dan konsentrasi Ca²⁺ bebas. Hal ini terjadi karena masuknya dari luar sel dan pelepasan Ca²⁺ dari simpanan internal seperti retikulum endoplasma dan vakuola. Peningkatan tersebut mengakibatkan klorida (Cl⁻) dan ion organik keluar dari sel. Pada kondisi demikian, penyerapan K⁺ ke dalam sel terhenti menyebabkan hilangnya K⁺. Hilangnya zat terlarut ini meningkatkan potensial air, mengakibatkan difusi air kembali keluar sel melalui proses osmosis, dimana sel mengalami plasmolysis, tertutupnya pori-pori stomata. Sel penjaga memiliki lebih banyak kloroplas dibandingkan sel epidermis lain yang menjadi asal sel penjaga.

Uap air, kelembaban atmosfer dan suhu. Laju transpirasi dipengaruhi oleh perbedaan tekanan uap diantara ruangan-ruangan

interselular dan atmosfer. Kelembaban atmosfer berubah-ubah dari waktu ke waktu dan dari satu tempat ke tempat lain. Kelembaban atmosfer di daerah kering seperti di gurun biasanya rendah, sedangkan di daerah dimana banyak terjadi penguapan air atau tanah basah terdapat kelembaban yang tinggi. Kelembaban atmosfer berubah juga dari musim ke musim, hari ke hari, bahkan dari jam ke jam. Dalam hubungannya dengan transpirasi yang penting bukan hanya kelembaban atmosfer yang dinyatakan dalam kelembaban nisbi, akan tetapi juga faktor suhu perlu diperhatikan. Suhu dan kelembaban nisbi menentukan besarnya tekanan uap.

Kelembaban nisbi (*Relative Humidity*) adalah banyaknya uap air yang benar-benar ada di udara dibandingkan dengan banyaknya uap air dalam keadaan jenuh, pada suhu yang sama dinyatakan dalam persen. Kelembaban mutlak (absolut) adalah banyaknya uap air yang nyata berada di udara pada hari cerah. Hampir selalu konstan dan tidak naik turun dengan naik turunnya suhu udara, kecuali bila hujan. Tekanan uap jenuh adalah tekanan uap air bila udara jenuh dengan uap air. Tekanan uap jenuh meningkat dengan meningkatnya suhu. Peningkatan suhu menyebabkan penurunan dari kelembaban nisbi walaupun tekanan uap tidak berubah. Kelembaban nisbi dari udara dalam rongga daun dekat stomata biasanya mendekati 100%. Pada kelembaban nisbi udara 40% dengan suhu 20°C tekanan uap sebesar 7.02 mm Hg dan tekanan uap dirongga daun sebesar 17.54 mm Hg sehingga selisih tekanan menjadi 10.52 mm Hg. Apabila suhu udara naik menjadi 30°C dan kelembaban nisbi udara tetap 40% maka tekanan uap menjadi 12.73 mm Hg dan tekanan uap di ruang interselular daun menjadi 31.82 mm Hg sehingga selisih menjadi 19.09 mm Hg. Artinya bahwa kenaikan suhu dari 20°C menjadi 30°C meningkatkan transpirasi sebesar 1.8 atau hampir dua kali lipat (Jain, 2002 Darmawan dan Baharsjah, 1983).

5.5 Mekanisme Penyerapan Air

8 Air masuk ke dalam tanaman melalui penyerapan pasif dan penyerapan aktif. Penyerapan pasif adalah penyerapan air sebagai akibat dari adanya gradien PA dari sel-sel akar. Adanya transpirasi pada bagian atas tanaman menyebabkan terjadinya perbedaan PA antara sel-sel mesofil

8 pada daun dengan sel-sel pada akar. Apabila PA dari sel-sel akar lebih besar dari pada PA dalam larutan tanah maka air dari tanah akan meresap ke dalam sel-sel akar. Jadi proses penyerapan air ini adalah proses osmotik. Bila sel-sel akar mati karena genangan air, penyerapan pasif dapat tetap terjadi dan keadaan daun dapat tetap segar. Tetapi bila kemudian kadar air tanah kurang dari kapasitas lapang, kelayuan terjadi karena sebenarnya perakaran sudah mati dan tidak dapat tumbuh untuk mencari air. Selain penyerapan pasif terdapat pula penyerapan aktif yaitu penyerapan yang melibatkan energi dan pernafasan. Penyerapan aktif inilah yang sangat penting bagi tanaman dan memungkinkan tanaman hidup (Darmawan dan Baharsjah, 1983).

5.6 Pengangkutan Air dan Nutrisi di dalam Tanaman

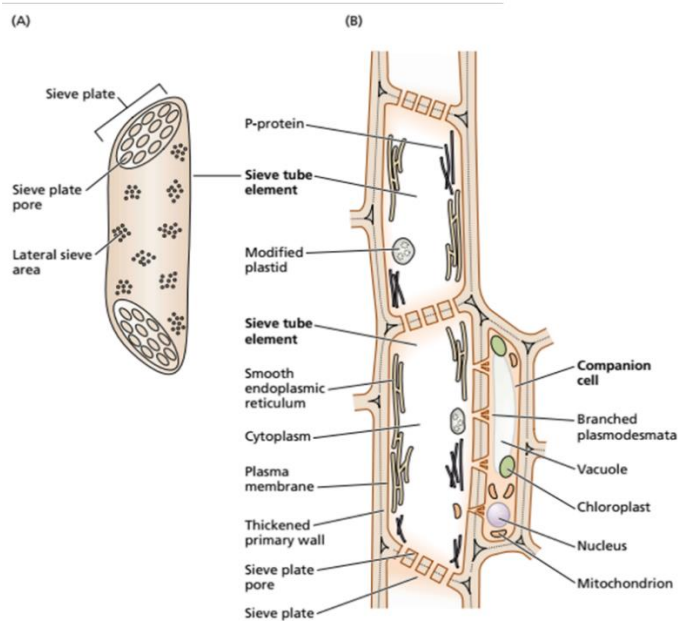
26 Berdasarkan jenis nutrisi, maka proses pengangkutan nutrisi pada tumbuhan terbagi menjadi dua. Air dan nutrisi dari dalam tanah di angkut dari bawah ke atas (dari akar ke seluruh tubuh tanaman). Sedangkan, nutrisi hasil fotosintesis (makanan) diangkut dari daun ke seluruh bagian tanaman. Kedua proses pengangkutan nutrisi tersebut menggunakan jaringan yang berbeda. Pengangkutan air dan nutrisi dari dalam tanah menggunakan xilem. Sedangkan, pengangkutan nutrisi hasil fotosintesis menggunakan floem. Fotosintat berupa gula dan zat organik lain yang diproduksi tumbuhan seperti asam amino, hormon tumbuhan, dan mRNA masuk ke dalam elemen saringan melalui plasmodesmata. Nutrisi dalam elemen saringan tersebut kemudian dibawa oleh jaringan pengangkut floem untuk didistribusikan ke atas, ke bawah, dan ke semua bagian tumbuhan yang memerlukan (Fageria, 2017; Marschner, 1986; Darmawan dan Baharsjah, 1983; Salisbury and Ross, 1995b).

6 Pengangkutan air dan nutrisi mineral dalam tanaman melalui serangkaian jaringan, mulai dari rambut akar yang menyerap air, melalui trakeid, dan masuk ke dalam jaringan pembuluh xilem. Oleh xilem, air, senyawa nitrogen, dan nutrisi mineral lainnya yang diserap juga disintesis oleh akar di angkut. Xilem mengangkut nutrisi dari bawah (akar) ke atas dan ke jaringan parenkim di mana air dilepaskan ke dalam sel daun. Xilem dapat mengangkut nutrisi karena adanya tegangan atau tarikan air akibat transpirasi tumbuhan. Tekanan tersebut membuat air dari akar secara

alami tertarik ke arah daun. Hal ini juga menyebabkan meningkatnya transpirasi turut meningkatkan jumlah penyerapan air oleh tumbuhan. Dua jalur transportasi jarak jauh–floem dan xilem–menyebarkan ke seluruh tubuh tumbuhan. Floem umumnya ditemukan di bagian luar jaringan pembuluh vaskular primer dan sekunder. Pada tumbuhan dengan pertumbuhan sekunder, floem merupakan kulit bagian dalam (Hamim, 2019; Harahap, 2012; Lakitan, 2018).

Sel-sel floem menghantarkan gula dan bahan organik lainnya di seluruh tanaman disebut sieve elements. Sieve elements adalah istilah komprehensif yang mencakup elemen sieve elements angiospermae yang sangat terdiferensiasi dan sieve elements yang relatif tidak terspesialisasi sel Gymnospermae (Campbell *et al.*, 2004; Salisbury and Ross, 1995b). Selain sieve elements, jaringan floem mengandung sel pendamping dan sel parenkim (yang menyimpan dan melepaskan molekul fotosintat). Dalam beberapa kasus jaringan floem juga termasuk serat dan sklereid (untuk perlindungan dan penguatan jaringan) dan latisifer (sel yang mengandung lateks). Namun hanya sieve elements terlibat langsung dalam translokasi. Selanjutnya urat-urat daun yang kecil dan ikatan pembuluh primer pada batang sering kali dikelilingi oleh selubung berkas (Gambar 5.4), terdiri dari satu atau lebih lapisan sel yang tersusun rapat. Jaringan vaskular daun, dikelilingi oleh selubung berkas urat-urat kecil sampai ke ujungnya, mengisolasi urat-urat tersebut dari ruang antar sel daun (Darmawan dan Baharsjah, 1983).

Penjelasan **Gambar 5.4** yaitu (A) Tampilan luar, menunjukkan pelat sieve elements dan area tabung saringan lateral. (B) Bagian memanjang, memperlihatkan dua tabung saringan yang disambung membentuk tabung ayakan. Pori-pori pada pelat ayakan di antara elemen tabung merupakan saluran terbuka untuk pengangkutan. Membran plasma dari tabung saringan terkoneksi dengan elemen saringan tetangganya. Setiap tabung elemen saringan dikaitkan dengan satu atau lebih sel pendamping, mengambil alih beberapa fungsi metabolisme penting yang berkurang atau hilang selama diferensiasi tabung elemen saringan. Perhatikan bahwa sel pendamping memiliki banyak organel sitoplasma, sedangkan unsur tabung saringan memiliki organel yang relatif sedikit (Wiraatmaja, 2016; Taiz and Zieger, 2002).



Gambar 5.4 Skema penampang memanjang dan melintang dari pembuluh saring dan sel pelengkap (tabung sieve elements) (Sumber: Taiz and Zeiger, 2003)

49 Pengangkutan makanan didalam tanaman sangat kompleks. Setelah berkecambah, makanan mengalir dari biji ke daun dari ke akar. Setelah daun dapat membuat makanan, aliran ini berubah arah menjadi dari daun ke akar dan ke meristem pucuk. Kemudian setelah berbuah, makanan mengalir dan daun ke akar serta ke buah (Darmawan dan Baharsjah, 1983).

5.7 Mekanisme Pengangkutan

Mekanisme pengangkutan zat organik dan anorganik di dalam tanaman belum diketahui dengan jelas, walaupun arah dan banyaknya dapat diketahui. Oleh karena itu maka dalam pembahasan mengenai gerakan zat organik di dalam tanaman harus mempertimbangkan kenyataan bahwa, (a) Gerakan ini terjadi di dalam sel-sel hidup (tidak demikian halnya dengan gerakan air). (b) Gerakan dapat terjadi ke atas maupun ke bawah. Jadi merupakan gerakan berarah ganda (akropetal=gerakan menuju daun, basepetal, (c) Bahan yang harus diangkut relatif sangat besar, (d) Pengangkutan terjadi dalam waktu yang

sangat singkat, dan (e) Pengangkutan lebih cepat pada siang hari, dan lebih lambat pada malam hari (Wiraatmaja, 2016; Marschner, 1986).

Para ahli fisiologi mencoba menjelaskan mekanisme pengangkutan makanan ini. Beberapa teori diantaranya adalah:

- a. Teori difusi. Teori ini sulit diterima karena kenyataan menunjukkan bahwa pengangkutan makanan adalah 40.000 kali dari gerakan oleh difusi.
- b. Gerakan sitoplasma. Di dalam sel saringan, makanan mungkin diangkut dalam gerakan sitoplasma mengitari dinding sel, kemudian diteruskan ke sel berikutnya melalui elemen saringan (sieve element). Setelah diteliti, gerakan sitoplasma masih jauh terlampaui lambat untuk dapat mengangkut bahan yang demikian banyak dalam waktu yang relatif singkat.
- c. Aliran karena tekanan turgor. Dalam sel-sel daun, gula senantiasa terbentuk sehingga tercipta tekanan osmotik yang tinggi. Tekanan osmotik tinggi ini menyebabkan air mengalir ke dalam sel hingga turgor meningkat dan menekan larutan gula ke sel berikutnya, dan seterusnya. Dengan demikian maka gerakan terjadi akibat adanya gradien konsentrasi gula yang mengakibatkan gradien dari tekanan turgor (Wiraatmaja, 2016; Salisbury and Ross, 1995b; Sitompul dan Guritno, 1995; Darmawan dan Baharsjah, 1983).

Darmawan dan Baharsjah (1983) menjelaskan tentang teori aliran karena tekanan turgor ini banyak kelemahannya antara lain, (1) Berdasarkan teori ini, aliran gula terjadi satu arah saja yaitu basipetal. Akan tetapi kenyataannya pada tanaman dapat terjadi aliran dua arah, dan (2) Pada tanaman tebu, gula mengalir dari daun ke batang walaupun konsentrasi gula lebih tinggi di batang.

Bab 6

PERKEMBANGBIAKAN TANAMAN

6.1 Pengantar

Perkembangbiakan tanaman merupakan serangkaian peristiwa pewarisan sifat genetika dari induk ke keturunannya. Ide dasar genetika dikembangkan dari serangkaian eksperimen yang dilakukan oleh George Mendel pada tahun 1866. Mendel membuktikan adanya pewarisan sifat dan ide genetik tersebut kini diakui sebagai dasar genetika melalui studi pada kacang polong (*Pisum sativum*). Gagasan bahwa gen adalah unit pewarisan yang bervariasi dari orang ke orang adalah bagaimana hereditasi dapat terjadi (Pierce, 2016). Dalam teori hereditas, gen berfungsi sebagai faktor pembawa untuk menentukan suatu ciri (Artadana & Savitri, 2018). Lokus gen pada kromosom adalah lokasinya. Setiap gen memiliki dua homolog, yang dikenal sebagai alel, yang berasosiasi dengannya. Gen yang mengandung kromosom ditransmisikan ke keturunannya dan mengendalikan sifat-sifat yang berkembang.

Memahami genetika tanaman dan bagaimana gen mempengaruhi karakteristik tanaman sangatlah penting. Mendel (1860) mendemonstrasikan gen yang merupakan unit informasi genetik yang terpisah berperan mentransfer informasi tentang pewarisan sifat genetik dari induk ke anak. Ciri-ciri individu yang bersifat hereditas, seperti morfologi yang meliputi karakteristik bagian bunga, batang, dan tinggi tanaman yang dipengaruhi oleh gen. penampakan tanaman dipengaruhi oleh senyawa RNA fungsional tertentu yakni RNA (tRNA), RNA ribosom (rRNA), dan inti kecil (snRNA), yang merupakan protein penyusun sebagian besar senyawa produk gen (Fauziah *et al.*, 2023).

Protein tertentu penyusun gen terdiri dari beberapa polipeptida atau subunit. Selain itu, tidak semua gen secara aktif mentranskrip mRNA

selamanya. Tidak semua gen mengkode protein. Meskipun tidak semua protein adalah enzim walaupun sebagian besar enzim tersusun dari protein. Dengan mengekspresikan sebagian kecil gennya, suatu organisme dapat meningkatkan respons dengan sensitivitas tinggi terhadap lingkungan tertentu. Ekspresi gen dari sepotong DNA mungkin sangat bervariasi karena banyaknya potensi kombinasi. Ekspresi gen yang berbeda mengakibatkan munculnya beberapa karakter sel. Era bioteknologi muncul berkat semakin berkembangnya pemahaman ilmu pengetahuan tentang ekspresi gen yang menghasilkan varietas baru dengan ciri-ciri yang unggul pada bidang pertanian (Firmansyah & Rekan, 2023).

6.2 Perkembangbiakan Secara Generatif

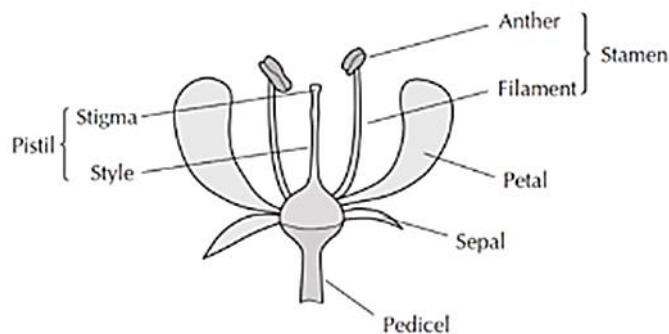
Banyak kemajuan dalam perbanyakan dan pemuliaan tanaman terjadi sebelum era pemuliaan tanaman saat ini. Potensi ekspansi sel yang akan terus berkembang menyebabkan akar dan tunas tanaman dapat terus tumbuh sepanjang hidup tanaman (Wareing dan Graham, 1976). Tumbuhan dapat berkembang biak dengan dua cara: secara generatif (secara seksual, melalui biji) dan secara vegetatif (secara aseksual, sering disebut kloning). Perbanyakan vegetatif sering digunakan ketika metode secara generatif tidak efektif (tidak ada benih yang dihasilkan, minimnya benih yang dihasilkan, atau benih telah kehilangan viabilitas).

Sel jantan dan sel betina terlibat dalam proses reproduksi yang dikenal sebagai reproduksi seksual pada tumbuhan. Gamet adalah hasil dari proses tersebut. Baik gamet atau alat reproduksi tumbuhan berupa putik dan benang sari terdapat pada bunga. Fertilisasi adalah proses peleburan gamet jantan dan betina. Penyerbukan merupakan langkah awal dalam proses reproduksi seksual pada tumbuhan. Jatuhnya serbuk sari pada kepala putik disebut penyerbukan. Hewan, air, dan udara semuanya dapat membantu proses jatuhnya serbuk sari. Ada dua kategori penyerbukan: penyerbukan silang dan penyerbukan sendiri. Suatu jenis penyerbukan yang dikenal sebagai penyerbukan sendiri terjadi ketika serbuk sari bermigrasi dari kepala sari bunga menuju kepala putiknya. Pada bunga biseksual metode penyerbukan seperti ini seringkali terjadi. Di sisi lain, serbuk sari berpindah dari kepala sari bunga ke kepala putik

bunga lain pada spesies yang sama melalui penyerbukan silang. Bergabungnya gamet jantan dan betina dikenal sebagai pembuahan pada angiospermae. Zigot yang tercipta melalui prosedur ini pada akhirnya akan tumbuh menjadi manusia baru (Anonim, 2020).

Fertilisasi, penyatuan gamet jantan dan betina, menghasilkan benih yang mengandung embrio yang digunakan untuk reproduksi seksual. Penyerbukan atau jatuhnya serbuk sari ke kepala putik merupakan langkah awal pembuahan. Selanjutnya tumbuhan diklasifikasikan sebagai autogam atau allogam tergantung pada cara penyerbukannya. Memahami variasi penyerbukan sangat penting dalam proses seleksi untuk menghasilkan varietas baru dalam program pemuliaan tanaman (Syukur *et al.*, 2015). Memahami komponen bunga sangat penting untuk upaya hibridisasi, karena beberapa varietas bunga memerlukan pengebirian atau pengebirian.

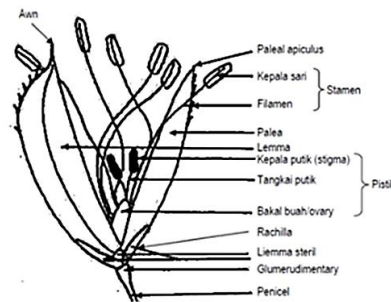
Bunga terdiri dari empat bagian utama: putik, benang sari, kelopak, dan sepal. Jenis tanaman dapat mempengaruhi warna, ukuran, jumlah, dan susunan bunga. Benang sari yang merupakan bagian jantan suatu bunga terdiri dari kepala sari (kotak anthera) dan filamen (anthera) sedangkan putik terdiri dari bakal buah, kepala putik, dan tangkai yang lebih tinggi—terletak di tengah-tengah bunga (Acquaah, 2007) (**Gambar 6.1**).



Gamba 6.1 Bagian-bagian bunga
(Sumber: Acquaah, 2007)

Padi merupakan tumbuhan autogami berdasarkan bentuk alat reproduksinya karena mempunyai putik dan benang sari, bulir. Bunga

tanaman padi merupakan contoh bunga yang lengkap. Rangkaian malai digunakan untuk mengumpulkan bulir. Setiap bunga padi mempunyai dua kepala putik, satu bakal biji, dan enam benang sari. Kepala sari dipenuhi serbuk sari dan putiknya tanggap saat bunga siap mekar. Proses pengurasan air dari ovarium menyebabkan lodikula membengkak. Selanjutnya lemma dan palea terpisah dan terbuka, dan akhirnya benang sari muncul dan kepala sari putus. Penyerbukan terjadi bila kepala sari terbelah bersamaan dengan matangnya putik (**Gambar 6.2**).



Gambar 6.2 Morfologi bunga padi
(Sumber: Puslitbangtan, 2006)

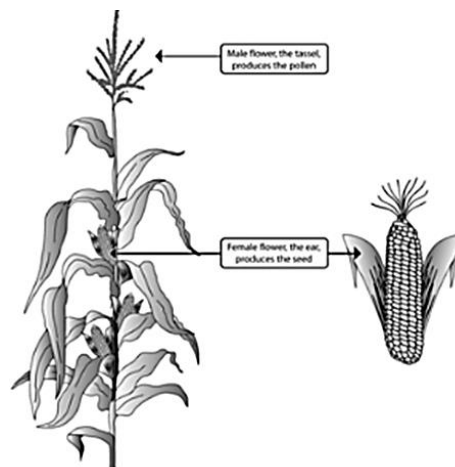
Morfologi penyerbukan sendiri terhambat akibat waktu pematangan serbuk sari dan sel telur berubah, adanya ketidakcocokan, dan rangkaian bunga monoceous dan dioceous merupakan ciri-ciri bunga tanaman persilangan. Dua jenis tumbuhan dibedakan berdasarkan susunan bunganya:

1. Tumbuhan berumah satu atau berumah satu, yang organ jantan dan betinanya terletak pada tumbuhan yang sama tetapi pada bunga yang berbeda.
2. Tumbuhan dioseus dan dioecious, artinya bagian bunga betina dan jantan terdapat pada tumbuhan terpisah

Tanaman jagung bersifat berumah satu, artinya walaupun bunga jantan dan bunga betina berada pada tanaman berbeda, namun tetap menyatu. Bunga betina terdapat di ketiak daun, sedangkan bunga jantan disebut jumbai, berada di bagian aksil. Setelah itu, bunga betina akan matang menjadi tongkol dan biji. Tergantung pada jenis tanaman jagungnya, mungkin terdapat satu, dua, atau bahkan tiga bunga betina di

atasnya. Pada bunga jantan, sumbu dan cabang malai tersusun atas sepasang bulir yang masing-masing bertangkai pendek dan bertangkai panjang. Benang sari yang berada di bagian atas akan patah terlebih dahulu karena adanya perbedaan pertumbuhan dan kematangan bulir antara yang berposisi di bagian atas dan bawah. Serbuk sari akan terurai dalam waktu seminggu atau lebih. Rambut jagung atau sutra adalah perpanjangan saluran ovarium styler yang terlihat pada tongkol jagung. Rambut jagung dapat muncul dari ujung kulitnya dan panjangnya dapat mencapai 30,5 cm atau lebih (Subekti *et al.*, 2007) (**Gambar 6.3**).

Serbuk sari bisa berasal dari tanaman itu sendiri (asal dari tanaman yang sama) atau silang (asal dari tanaman lain). Selama dua tahun tanaman melakukan penyerbukan sendiri atau "selfed". Mendel mencatat morfologi tanaman dan keturunannya dan menyimpulkan bahwa ciri-ciri luar tanaman yang dapat diukur tetap ada di setiap generasi. Mendel mencatat tujuh ciri yang berbeda pada tanaman kacang polong dimana masing-masing ciri tersebut mempunyai dua variasi. Ukuran (tinggi atau pendek), bentuk biji polong (menonjol atau sempit), bentuk biji (halus atau keriput), warna biji (hijau atau kuning), dan lain sebagainya merupakan contoh ciri-cirinya. Satu polipeptida dikodekan oleh setiap gen (Ashar *et al.*, 2023).



Gambar 6.3 Bagian bunga tanaman jagung
(Sumber: Setimela *et al.*, 2004)

Tanaman yang melakukan penyerbukan silang dicirikan oleh heterozigositas dan keragaman yang cukup besar, sedangkan tanaman yang melakukan penyerbukan sendiri secara alami bersifat homozigot dan konsisten secara genetik. Metode perbanyakan vegetatif yang paling umum melibatkan penggunaan tanaman atau komponennya tanpa mengalami perubahan genetik apa pun dari satu generasi ke generasi berikutnya. Tanaman yang melakukan penyerbukan sendiri, kadang-kadang disebut tanaman autogami, melakukan penyerbukan dalam satu bunga. Jika putik dan serbuk sari terdapat pada bunga yang sama, terjadi autogami. Tanaman yang subur sering kali melakukan penyerbukan sebelum bunganya mekar, suatu proses yang dikenal sebagai penyerbukan tertutup (kleistogami) (Ashar *et al.*, 2023).

Tanaman yang melakukan penyerbukan sendiri dapat diserbuki secara sengaja atau alami dengan mengumpulkan serbuk sari dari kotak serbuk sari dan menempelkannya pada kepala putik bunga yang tidak diserbuki. Untuk menghasilkan galur murni dengan susunan genetik baru pada varietas akhir, operasi pemuliaan digunakan untuk menghasilkan tanaman dengan ciri lebih baik dan populasi homozigot. (Ashar *et al.*, 2023)

6.3 Perkembangbiakan Secara Vegetatif

Karena heterozigositasnya yang ekstrem, perbanyakan generatif juga tidak memuaskan bila dihasilkan keturunan yang (sangat) beragam. Pertanian telah lama memperoleh manfaat dari perbanyakan vegetatif *in vivo*, yang mencakup stek, pemisahan atau pembelahan, pelapisan, penanaman tanah, okulasi, dan tunas. Contohnya termasuk keluarga kentang dan berbagai umbi tanaman umbi-umbian lainnya. Dalam kegiatan pemuliaan tanaman, perbanyakan vegetatif sangat penting karena:

1. Mutan padat yang hanya dapat diperoleh setelah induksi mutasi melalui pengembangan tunas tambahan;
2. Kloning terkadang diperlukan untuk membentuk bank gen;
3. Galur induk dipelihara dan diperbanyak secara vegetatif untuk menghasilkan benih. Teknik konvensional untuk perbanyakan vegetatif *in vivo* terkadang tidak memenuhi persyaratan (terlalu mahal, memakan waktu, atau rumit).

Manfaat Metode Pemuliaan Vegetatif: Dengan memanfaatkan potensi seluruh keragaman genetik, produktivitas dapat ditingkatkan, khususnya melalui pemanfaatan metode pemuliaan vegetatif berbasis kinerja. Genotipe yang baik dari induknya dapat direproduksi secara andal pada keturunannya. Teknik Perbanyak Vegetatif Memiliki Kekurangan

1. Tanaman yang diperoleh dari stek atau okulasi biasanya memiliki sistem perakaran yang lebih lemah.
2. Dimungkinkan untuk berkembang biak secara vegetatif dan memiliki jumlah anak yang sedikit. Oleh karena itu, cabang-cabang tanaman yang dihasilkan melalui reproduksi vegetatif dapat mengakibatkan pertumbuhan yang lebih sedikit.

Metode perkembangbiakan secara vegetatif terdiri dari:

a. Umbi Batang

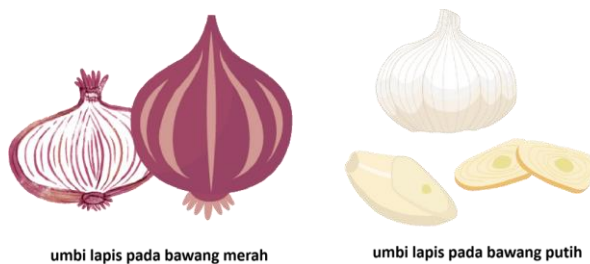
Bagian batang atau badan akar yang menggebung di dalam tanah disebut umbi. Bagian ini digunakan untuk mengembangbiakan dan menyimpan makanan tambahan. Batang dan tunas umbi jenis ini berukuran kecil. Batang kentang mengecil dan menusuk tanah. Kentang yang dimodifikasi batangnya secara alami untuk memungkinkan perkembangbiakan. Akarnya terkubur dan tumbuh, mengawetkan persediaan makanan dan menghasilkan keturunan (**Gambar 6.4**).



Gambar 6.4 Umbi batang kentang
(Sumber: Anonim, 2024e)

b. Umbi Lapis

Tumbuh-tumbuhan dapat memanfaatkan umbi lapis untuk berkembang biak. Jika jumlah air tidak berlebihan, kayu lapis akan tumbuh. Buah bawang merah berlapis-lapis, dengan tangkai yang sangat pendek dan lentur. Tunas baru untuk bawang bombay akan tumbuh dari siung tersebut. Bawang putih, bawang merah, lili, dan loncang merupakan tanaman yang berkembang biak melalui lapisan umbi, kecuali dari bawang merah (**Gambar 6.5**).



Gambar 6.5 Umbi lapis
(Sumber: Anonim, 2024f)

c. Umbi Akar

Perubahan bentuk akar saat tumbuh di dalam tanah dikenal sebagai umbi akar. Akar akan menyebarkan persediaan makanannya, sehingga jika kita mencabut tanaman yang berkembang biak dengan umbi akar, maka akar tersebut akan terus berkembang dan memperlihatkan akar yang panjang di bawah akar yang panjang. Yang berbuah dan mampu menjadi individu baru adalah akar ini. Tanaman lain yang dapat berkembang biak melalui umbi akar antara lain singkong dan lobak (**Gambar 6.6**).



Gambar 6.6 Umbi batang tanaman singkong
(Sumber: Anonim, 2024c)

d. Rhizome/Rimpang

Rimpang merupakan perubahan pada akar yang muncul dari dalam tanah dan berkembang menjadi batang dan daun. Selain sebagai tempat berkembang biak, akar juga menyimpan nutrisi. Berikut beberapa contoh tumbuhan yang tumbuh melalui rimpang: lengkuas, kencur, jahe, dan kunyit (**Gambar 6.7**).



Gambar 6.7 Rhizoma pada jahe
(Sumber: Anonim, 2024g)

e. Tunas

Anakan yang ditanam di dalam tanah, dan keturunan yang muncul dari permukaan tanah disebut tunas. Tunas yang sudah muncul tidak bergantung pada induknya. Bambu dan pisang adalah dua contoh tumbuhan yang berkembang biak melalui tunas (**Gambar 6.8**).



Gambar 6.8 Tunas pada tanaman pisang
(Sumber: Anonim, 2024d)

f. Tunas adventif

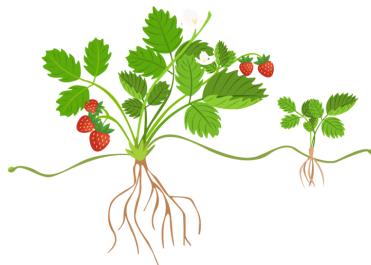
Tunas tanaman yang disebut tunas adventif muncul dari tepi daun dan kemudian berkembang menjadi akar. Daun ini pada akhirnya akan berubah menjadi individu yang unik. Cara perbanyak dengan mengambil daun dari tumbuhan yang berkembang biak secara tunas adventif. Yang lama hanya perlu ditaruh di tanah, sehingga tunas baru dapat muncul. Selain cocor bebek, tanaman seperti sukun dan kesemek juga diperbanyak dengan tunas tambahan (**Gambar 6.9**).



Gambar 6.9 Tunas adventif tanaman cocor bebek
(Sumber: Anonim, 2024a)

g. Stolon

Tumbuhan berkembang biak melalui stolon, yaitu batang kecil yang dapat menyebar ke seluruh permukaan. Di ujung tangkai terdapat buah dan tanah. Hasilnya digunakan untuk mengidentifikasi kemungkinan orang baru. Selain stroberi, rumput alang-alang, stroberi, dan gagang merupakan tanaman yang dapat berkembang biak melalui stolon (**Gambar 6.10**).



Gambar 6.10 Stolon pada strawberry
(Sumber: Anonim, 2024f)

h. Spora

Jenis reproduksi tumbuhan yang disebut spora menggunakan sel-sel tumbuhan yang ada untuk berkembang biak dan berfungsi sebagai alat untuk berkembang biak. Bentuknya yang halus, tumbuhan jenis ini mudah tersebar oleh angin, air, hewan, dan faktor lainnya. Tanaman ini banyak ditemukan di lingkungan lembab. Tumbuhan penghasil spora seperti lumut dan pakis merupakan contoh tumbuhan jenis ini (Zamzami *et al.*, 2021) (**Gambar 6.11**).



Gambar 6.11 Spora pada pakis
(Sumber: Anonim, 2024b)

Bab 7

GERAK PADA TUMBUHAN

Pergerakan merupakan salah satu mekanisme penting yang digunakan oleh organisme untuk berinteraksi dengan lingkungan sekitarnya. Respons terhadap rangsangan ini bisa berasal dari faktor eksternal, seperti cahaya matahari, suhu, kelembapan, dan gravitasi, atau faktor internal, seperti perubahan hormon atau tekanan air dalam sel. Pada makhluk primitif, seperti bakteri dan protista, kemampuan untuk merespons rangsangan masih sangat sederhana dan terbatas. Ini dikenal sebagai daya iritabilitas, yaitu kemampuan dasar untuk merasakan dan bereaksi terhadap rangsangan. Dalam organisme yang lebih kompleks, seperti tumbuhan, daya iritabilitas telah berkembang menjadi sistem yang lebih canggih. Tumbuhan, meskipun tidak memiliki sistem saraf seperti hewan, mampu merespons rangsangan dengan gerakan yang terkoordinasi pada bagian-bagian tertentu. Misalnya, daun tumbuhan yang dapat menutup atau membuka sebagai respons terhadap perubahan cahaya, atau akar yang tumbuh ke arah bawah sebagai respons terhadap gravitasi. Setiap respons ini menunjukkan bahwa meskipun tidak memiliki kesadaran, tumbuhan memiliki mekanisme yang memungkinkan mereka berinteraksi dengan lingkungan secara aktif (Darwin & Darwin, 1880; Raven & Eichhorn, 2005; Taiz *et al.*, 2015).

Beberapa jenis gerakan yang dilakukan oleh tumbuhan merupakan hasil dari respons terhadap berbagai rangsangan yang berasal dari lingkungan eksternal. Gerakan-gerakan ini sangat penting untuk kelangsungan hidup tumbuhan, karena memungkinkan mereka untuk menyesuaikan diri dengan kondisi lingkungan yang selalu berubah. Berdasarkan penyebabnya, gerakan pada tumbuhan dapat dibedakan

menjadi dua jenis utama, yaitu gerak tumbuh dan gerak turgor. Gerak tumbuh adalah gerakan yang terjadi akibat pertumbuhan sel yang menyebabkan perubahan bentuk atau posisi yang bersifat permanen, atau "*irreversible*". Contohnya adalah fototropisme, di mana batang tumbuhan tumbuh menuju sumber cahaya. Gerak ini terjadi karena adanya pembagian hormon auksin yang tidak merata, sehingga satu sisi batang tumbuh lebih cepat daripada sisi lainnya. Di sisi lain, gerak turgor adalah gerakan yang disebabkan oleh perubahan tekanan turgor di dalam sel-sel tertentu, yang bersifat elastis atau "*reversible*". Misalnya, gerakan menutup dan membuka daun pada tumbuhan *Mimosa pudica* sebagai respons terhadap sentuhan. Perubahan tekanan air dalam sel-sel tertentu memungkinkan daun tersebut bergerak dengan cepat. Kedua jenis gerakan ini menunjukkan bagaimana tumbuhan, meskipun tidak bergerak seperti hewan, tetap memiliki cara yang efektif untuk menyesuaikan diri dengan lingkungannya (Salisbury & Ross, 1992; Gilroy & Trewavas, 2001; Hopkins & Hüner, 2009).

Berdasarkan asal rangsangannya, gerakan pada tumbuhan dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu: 1) gerak endonom, dan 2) gerak etinom/esionom.

7.1 Gerak Endonom

Gerak endonom merupakan jenis gerakan pada tumbuhan yang dipicu oleh rangsangan atau faktor-faktor internal yang berasal dari dalam tubuh tumbuhan itu sendiri. Faktor-faktor ini dapat meliputi perubahan hormon, tekanan turgor dalam sel, atau aktivitas metabolisme yang terjadi secara alami tanpa adanya rangsangan dari lingkungan eksternal. Karena gerakan ini terjadi secara mandiri dan berasal dari dalam tumbuhan, gerak endonom juga sering disebut sebagai gerak autonom. Contoh gerak endonom dapat terlihat pada gerakan yang terjadi selama proses pertumbuhan akar atau batang yang terus berlanjut meskipun tidak ada perubahan lingkungan yang signifikan. Gerakan ini menunjukkan bahwa tumbuhan memiliki mekanisme internal yang kompleks untuk mengatur pertumbuhan dan aktivitasnya, meskipun mereka tidak bergerak secara aktif seperti hewan. Gerak endonom ini penting bagi kelangsungan hidup tumbuhan, karena memungkinkan mereka untuk menyesuaikan diri

dengan kebutuhan fisiologisnya, seperti penyerapan air dan nutrisi, atau pembelahan sel dalam proses pertumbuhan (Hopkins & Hüner, 2009; Taiz *et al.*, 2015). Beberapa macam gerak endonom, seperti:

1) Nutasi

Nutasi adalah gerakan tumbuhan yang terjadi secara perlahan dan tidak teratur, umumnya terjadi pada daerah pertumbuhan seperti ujung akar atau pucuk tanaman. Gerakan ini bisa terjadi ke berbagai arah, baik searah jarum jam maupun berlawanan arah jarum jam. Fenomena ini sering terlihat pada bagian tanaman yang sedang tumbuh, di mana ujung-ujung tumbuhan tampak bergerak atau melengkung seiring dengan proses pertumbuhan. Gerakan nutasi ini merupakan bagian penting dari cara tumbuhan menavigasi lingkungannya, membantu mereka mengoptimalkan posisi untuk berbagai kebutuhan fisiologis seperti penyerapan cahaya atau mencari ruang yang lebih luas untuk pertumbuhan (Taiz *et al.*, 2015).

Endonom nutasi adalah istilah yang digunakan untuk mendeskripsikan gerakan nutasi yang dikendalikan oleh faktor-faktor internal tumbuhan, seperti hormon pertumbuhan atau perubahan seluler. Gerakan ini tidak dipicu oleh rangsangan eksternal, melainkan merupakan respons spontan dari dalam tanaman itu sendiri. Gerakan ini berperan penting dalam membantu tanaman beradaptasi dengan lingkungan sekitarnya, misalnya dengan menyesuaikan posisi daun untuk menangkap lebih banyak cahaya guna fotosintesis atau mengarahkan akar untuk menemukan sumber air dan nutrisi di dalam tanah. Salah satu contoh dari gerakan endonom adalah gerakan pertumbuhan daun, serta gerak rotasi sitoplasma (siklosis) pada sel-sel daun tumbuhan air seperti *Hydrilla verticillata*. Siklosis ini dapat diamati melalui gerakan sirkulasi klorofil di dalam sel, yang menunjukkan adanya aktivitas internal yang dinamis di dalam tumbuhan tersebut (Hopkins & Hüner, 2009).

2) Higroskopis

Pergerakan pada bagian tumbuhan yang disebabkan oleh perubahan kadar air yang terjadi secara terus menerus dapat mengakibatkan kondisi yang sangat kering pada kulit buah atau kotak spora. Akibatnya, kulit buah atau kotak spora tersebut akhirnya

mengalami retakan dan pecah. Fenomena ini sering terlihat pada buah polong-polongan seperti lamtoro, kembang merak, kacang buncis, dan kacang kedelai. Saat kadar air dalam kulit buah berkurang drastis, kulitnya menjadi kering dan mengerut, menciptakan tekanan internal yang menyebabkan kulit buah pecah secara tiba-tiba. Pecahnya kulit ini menghasilkan pelepasan biji-biji di dalamnya, yang terpelempar keluar untuk menyebar ke lingkungan sekitar. Proses ini adalah salah satu cara alami bagi tumbuhan untuk menyebarkan benihnya, memanfaatkan perubahan fisik yang terjadi di dalam struktur buah sebagai mekanisme penyebaran yang efektif (**Gambar 7.1**) (Elbaum *et al.*, 2007; Shtein *et al.*, 2016).



Gambar 7.1. Nutasi dan higroskopis

Sumber: <https://contohmu.github.io/pulp/post/gambar-gerak-higroskopis/>

7.2 Gerak Etinom

Gerak etinom adalah jenis gerakan pada tumbuhan yang terjadi sebagai respons terhadap rangsangan yang berasal dari luar tubuh tumbuhan. Gerakan ini juga dikenal sebagai gerak esionom. Rangsangan yang memicu gerakan pada tumbuhan dapat berasal dari berbagai sumber, termasuk cahaya, sentuhan, suhu, air, gravitasi bumi, atau zat kimia. Tumbuhan merespons rangsangan ini dengan berbagai jenis gerakan yang dapat dibedakan berdasarkan arah responsnya. Gerakan-gerakan ini termasuk gerak tropisme, dimana tumbuhan bergerak secara terarah mengikuti atau menjauhi rangsangan, seperti pertumbuhan akar ke bawah akibat gravitasi (geotropisme) atau batang menuju cahaya

(fototropisme). Selain itu, ada gerak nasti, yang terjadi secara cepat sebagai respons terhadap rangsangan namun arah gerakannya tidak tergantung pada arah datangnya rangsangan, seperti gerakan menutupnya daun putri malu saat disentuh. Jenis gerakan lainnya adalah gerak taksis, yang melibatkan perpindahan seluruh bagian organisme atau sel menuju atau menjauhi sumber rangsangan, seperti pergerakan spermatozoa tumbuhan lumut menuju sel telur yang menghasilkan sinyal kimia. Dengan kemampuan ini, tumbuhan dapat beradaptasi dengan lingkungannya secara efektif, memaksimalkan peluang untuk kelangsungan hidup dan reproduksi dalam kondisi yang terus berubah (Hopkins & Hüner, 2009; Taiz & Zeiger, 2010).

7.2.1 Gerak Tropisme

Tropisme adalah respons gerakan yang dilakukan tumbuhan secara spesifik dan terarah terhadap stimulus dari lingkungan, seperti cahaya, gravitasi, atau sentuhan. Gerakan tropisme ini terjadi sebagai reaksi terhadap arah atau sumber stimulus tertentu, dan selalu memiliki orientasi yang jelas. Misalnya, fototropisme adalah gerakan tumbuhan menuju sumber cahaya, sementara geotropisme adalah respons terhadap gravitasi. Tropisme berfungsi sebagai mekanisme penting yang memungkinkan tumbuhan untuk menyesuaikan diri dengan lingkungannya, baik dengan bergerak mendekati sumber yang mendukung pertumbuhannya maupun menjauhi kondisi yang dapat mengancam kelangsungan hidupnya (Hopkins & Hüner, 2009).

Selain sebagai respons gerakan, tropisme juga merupakan mekanisme adaptasi kritis yang membantu tumbuhan untuk berinteraksi secara efektif dengan lingkungan mereka. Istilah tropisme berasal dari bahasa Yunani "trope," yang berarti membelok, yang menggambarkan cara tumbuhan mengubah arah pertumbuhannya sebagai respons terhadap rangsangan eksternal. Tropisme dapat bersifat positif, di mana gerakan tumbuhan mendekati rangsangan, atau negatif, di mana tumbuhan justru menjauhi rangsangan tersebut. Misalnya, akar yang tumbuh ke bawah sebagai respon terhadap gravitasi adalah contoh geotropisme positif, sedangkan daun yang tumbuh menjauhi gravitasi adalah contoh geotropisme negatif. Melalui proses ini, tumbuhan dapat

mengoptimalkan posisi mereka untuk memperoleh cahaya, air, dan nutrisi yang dibutuhkan untuk bertahan hidup dan berkembang (Taiz et al., 2015). Berdasarkan jenis sumber rangsangannya, tropisme dibagi menjadi beberapa jenis, yaitu:

1) Fototropisme

Fototropisme adalah jenis gerakan tropisme yang terjadi sebagai respons terhadap rangsangan dari cahaya matahari. Menurut beberapa hipotesis, fototropisme disebabkan oleh perbedaan kecepatan pemanjangan sel-sel di batang, di mana sel-sel pada sisi yang lebih gelap memanjang lebih cepat dibandingkan dengan sel-sel pada sisi yang terkena cahaya lebih banyak. Hal ini disebabkan oleh distribusi hormon auksin yang tidak merata, dengan konsentrasi yang lebih tinggi pada sisi batang yang kurang terkena cahaya. Auksin, yang diproduksi di ujung tunas, menyebar ke bagian batang yang lebih gelap, merangsang pemanjangan sel di sisi tersebut, sehingga batang cenderung membengkok ke arah sumber cahaya. Proses ini memungkinkan tanaman untuk mengoptimalkan penyerapan cahaya matahari, yang sangat penting untuk proses fotosintesis, dan pada akhirnya mendukung pertumbuhan dan kelangsungan hidup tanaman (Liscum *et al.*, 2014; Christie & Murphy, 2020).

2) Geotropisme

Geotropisme merupakan jenis gerakan tropisme yang dapat dipicu karena adanya rangsangan oleh gaya gravitasi dari bumi, dan dikenal juga dengan istilah gravitropisme. Dalam konteks ini, geotropisme dapat dibedakan menjadi dua jenis: geotropisme positif dan geotropisme negatif. Geotropisme positif terjadi ketika respons gerakan tumbuhan mengarah ke bawah, menuju pusat bumi, seperti pada pertumbuhan akar yang menjalar ke dalam tanah. Sebaliknya, geotropisme negatif terjadi ketika respons gerakan tumbuhan menjauhi bumi, atau mengarah ke atas, seperti pada pertumbuhan batang yang bergerak ke arah langit. Istilah geotropisme merujuk pada fenomena di mana bagian-bagian tanaman multiseluler, seperti akar dan batang, mengatur orientasinya pada sudut tertentu yang berhubungan langsung dengan arah gravitasi. Ini memungkinkan tanaman untuk

menyesuaikan diri dengan medan gravitasi bumi dan memastikan bahwa mereka tumbuh dengan cara yang mendukung stabilitas dan akses optimal ke sumber daya penting, seperti air, nutrisi, dan cahaya (Morita, 2010; Kiss, 2000).

3) Hidrotropisme

Hidrotropisme adalah jenis gerakan tropisme yang terjadi sebagai respons terhadap rangsangan dari air. Gerakan ini umumnya terlihat pada akar tumbuhan yang cenderung tumbuh ke arah sumber air atau area yang lebih lembab. Misalnya, pada tanaman kaktus, akar-akar secara aktif akan bergerak dan memanjang menuju tanah yang mengandung air, bahkan di lingkungan yang kering sekalipun. Hidrotropisme merupakan mekanisme penting bagi tumbuhan, terutama di habitat dengan ketersediaan air yang terbatas, karena memungkinkan akar untuk mencari dan mencapai sumber air yang dibutuhkan untuk kelangsungan hidup dan pertumbuhan tanaman. Gerakan ini memastikan bahwa tumbuhan dapat mengoptimalkan penyerapan air, yang esensial untuk proses fisiologis seperti fotosintesis, transpirasi, dan pengangkutan nutrisi. Melalui hidrotropisme, tumbuhan menunjukkan kemampuan adaptasi yang luar biasa dalam merespons kondisi lingkungan yang berubah-ubah, memastikan mereka tetap bertahan di berbagai jenis ekosistem (Miyazawa *et al.*, 2011; Takahashi *et al.*, 2002).

4) Kemotropisme

Kemotropisme adalah jenis gerakan tropisme yang terjadi sebagai respons terhadap rangsangan dari zat-zat kimia tertentu. Gerakan ini memungkinkan tumbuhan untuk mendeteksi dan bergerak menuju sumber kimia yang bermanfaat bagi pertumbuhannya. Sebagai contoh, akar tumbuhan cenderung tumbuh ke arah konsentrasi unsur hara atau pupuk yang ada di dalam tanah. Proses ini memungkinkan tanaman untuk secara aktif mencari dan menyerap nutrisi penting, seperti nitrogen, fosfor, dan kalium, yang diperlukan untuk proses metabolisme dan pertumbuhan yang optimal. Kemotropisme merupakan mekanisme adaptasi yang krusial bagi tumbuhan, terutama di lingkungan di mana distribusi nutrisi tidak merata. Dengan kemampuan untuk

mendeteksi dan merespons keberadaan zat kimia tertentu, tumbuhan dapat memastikan bahwa akarnya tumbuh ke arah area yang kaya nutrisi, sehingga meningkatkan efisiensi penyerapan dan mendukung kesehatan serta produktivitas tanaman secara keseluruhan. Mekanisme ini juga memainkan peran penting dalam interaksi antara tumbuhan dan mikroorganisme tanah, yang sering kali menghasilkan zat kimia yang dapat merangsang pertumbuhan akar ke arah mereka (Nakamura & Matsumoto, 2008; Baluška *et al.*, 2010).

12 5) **Tigmotropisme**

Tigmotropisme adalah gerakan pertumbuhan pada sel-sel tanaman yang dipicu oleh rangsangan fisik berupa sentuhan. Istilah ini berasal dari kata Yunani "thigma," yang berarti "sentuhan." Tigmotropisme memungkinkan tanaman untuk merespons kontak fisik dengan objek di sekitarnya, yang sering kali berfungsi sebagai penopang atau pendukung bagi pertumbuhan tanaman. Contoh nyata dari fenomena ini adalah pada tanaman merambat seperti anggur dan sulur tanaman lainnya, di mana sulur-sulur tersebut akan membelit bagian penopangnya, seperti batang pohon atau tiang, saat mereka bersentuhan dengannya. Ini memungkinkan tanaman untuk mendapatkan dukungan struktural yang dibutuhkan untuk pertumbuhan ke arah yang lebih tinggi dan lebih luas. Salah satu contoh lain adalah pada tanaman *Brunnichia ovata*, yang juga menunjukkan respons pertumbuhan yang kuat terhadap sentuhan, dengan sulur-sulurnya yang membelit objek penopang. Tigmotropisme merupakan mekanisme penting yang memungkinkan tanaman memaksimalkan ruang dan sumber daya di lingkungan mereka, memberikan mereka keunggulan dalam mencari cahaya dan air yang diperlukan untuk kelangsungan hidup (Braam, 2005; Jaffe, 1973).

6) **Termotropisme**

Termotropisme adalah jenis gerakan pertumbuhan tanaman yang terjadi sebagai respons terhadap perubahan suhu atau panas di lingkungan sekitarnya. Ketika tanaman mengalami perubahan suhu, mereka dapat menyesuaikan arah pertumbuhan atau bentuk mereka untuk mengoptimalkan kelangsungan hidup. Contoh

nyata dari termotropisme dapat dilihat pada tanaman Rhododendron, di mana daunnya cenderung menggulung atau menunduk ke bawah ketika suhu lingkungan turun hingga sekitar -1°C . Gerakan ini membantu tanaman mengurangi kerusakan akibat suhu dingin dengan meminimalkan luas permukaan daun yang terkena udara dingin, sehingga mengurangi kehilangan panas dan risiko pembekuan. Fenomena ini menunjukkan bagaimana tanaman memiliki mekanisme adaptasi yang kompleks untuk merespons fluktuasi suhu, yang sangat penting bagi kelangsungan hidup mereka di lingkungan dengan kondisi iklim yang ekstrem (Hopkins & Hüner, 2009; Larcher, 2003).

7) Skototropisme

Skototropisme adalah gerakan pertumbuhan tanaman yang terjadi sebagai respons terhadap kegelapan atau kurangnya cahaya. Istilah ini berasal dari bahasa Yunani, "skotos," yang berarti kegelapan atau kegelapan. Berbeda dengan kebanyakan bentuk tropisme lainnya yang biasanya melibatkan pertumbuhan menuju sumber cahaya (fototropisme), skototropisme melibatkan pertumbuhan yang diarahkan menjauh dari cahaya dan menuju area yang lebih gelap. Fenomena ini sering diamati pada tanaman yang tumbuh di lingkungan dengan cahaya terbatas, di mana tanaman cenderung mencari tempat yang lebih teduh atau lebih terlindung untuk menghindari kondisi yang terlalu terang atau panas. Skototropisme merupakan salah satu mekanisme adaptasi yang memungkinkan tanaman untuk menemukan tempat yang lebih sesuai dengan kebutuhan fisiologisnya, terutama dalam kondisi di mana eksposur berlebihan terhadap cahaya dapat menyebabkan stres atau kerusakan pada tanaman (Smith & Whitelam, 1997; Briggs & Christie, 2002).

7.2.2 Gerak Nasti

Gerak nasti merupakan jenis gerakan pada tumbuhan yang dapat terjadi sebagai respons terhadap rangsangan eksternal, namun arah gerakan ini tidak tergantung pada arah datangnya rangsangan tersebut. Kata "nasti" berasal dari bahasa Yunani yaitu "nastos," yang memiliki arti "dipaksa

untuk mendekat". Dalam konteks ini, gerakan nasti tidak seperti tropisme yang arah gerakannya dipengaruhi oleh sumber rangsangan, melainkan tumbuhan sendiri yang menentukan arah gerakan tersebut. Gerak nasti biasanya bersifat cepat dan dapat terjadi akibat berbagai rangsangan, seperti perubahan cahaya, suhu, atau sentuhan. Contoh klasik dari gerak nasti adalah gerakan menutupnya daun pada tanaman *Mimosa pudica* ketika disentuh. Mekanisme ini memungkinkan tumbuhan untuk merespons lingkungannya dengan cara yang cepat dan efektif, meskipun tanpa arah yang spesifik terkait sumber rangsangan (Taiz & Zeiger, 2010; Sumarwoto 2011).

Contoh gerak nasti dapat dilihat pada fenomena seperti menutupnya daun putri malu dan tumbuhan *Venus* saat disentuh, serta menutupnya daun majemuk pada tanaman polong saat malam hari. Berdasarkan jenis rangsangan yang memicunya, gerak nasti dapat diklasifikasikan menjadi beberapa kategori, yaitu:

1) Fotonasti

Fotonasti merupakan jenis gerakan pada tumbuhan yang dapat dipicu oleh adanya rangsangan dari cahaya matahari. Dalam gerakan ini, tumbuhan merespons perubahan intensitas atau kualitas cahaya tanpa memperhatikan arah datangnya cahaya tersebut. Sebagai contoh, fenomena fotonasti dapat dilihat pada bunga pukul sembilan (*Turnera subulata*), yang dapat mekar pagi hari sekitar pukul sembilan sebagai respons terhadap peningkatan cahaya matahari pada waktu tersebut. Mekanisme ini memungkinkan tanaman untuk mengoptimalkan proses reproduksi dengan memanfaatkan kondisi cahaya yang paling mendukung, meskipun gerakan tersebut tidak ditentukan oleh arah sinar matahari. Fotonasti sering kali berperan penting dalam siklus harian tanaman, membantu mereka menyesuaikan waktu aktivitas tertentu, seperti pembukaan dan penutupan bunga, untuk memastikan keberhasilan reproduksi dan interaksi yang optimal dengan penyerbuk (Taiz & Zeiger, 2010; Hopkins & Hüner, 2009).

2) Niktinasti

Niktinasti adalah gerakan nasti yang terjadi sebagai respons terhadap kondisi gelap atau berkurangnya cahaya. Tanaman yang menunjukkan gerakan ini biasanya menyesuaikan diri dengan

siklus siang dan malam, dengan bagian-bagian tanaman seperti daun yang bereaksi terhadap perubahan dalam pencahayaan. Salah satu contoh niktinasti dapat dilihat pada pohon turi (*Sesbania grandiflora*), yang dikenal dengan gerakan "tidur" pada daunnya. Ketika malam tiba dan cahaya mulai berkurang, daun pohon turi secara otomatis mengatup sebagai respons terhadap kegelapan. Gerakan ini tidak hanya berfungsi sebagai adaptasi terhadap siklus harian, tetapi juga membantu mengurangi kehilangan air akibat transpirasi di malam hari, menjaga kelembapan tanaman, dan melindunginya dari suhu dingin malam hari. Dengan menutup daunnya saat malam, tanaman dapat menghemat energi dan mempertahankan keseimbangan fisiologisnya. Niktinasti menggambarkan kemampuan tanaman untuk merespons perubahan lingkungan secara teratur, yang sangat penting untuk kelangsungan hidup mereka (opkins & Hüner, 2009).

3) Tigmonasti

Tigmonasti adalah jenis gerakan nasti yang dipicu oleh rangsangan mekanis, seperti sentuhan atau tekanan fisik. Gerakan ini juga dikenal dengan istilah seismonasti. Tigmonasti dapat diamati pada tanaman seperti putri malu (*Mimosa pudica*), di mana daunnya secara cepat mengatup ketika disentuh. Respons mengatup ini terjadi hampir seketika, biasanya dalam waktu 1-2 detik setelah terkena rangsangan. Reaksi cepat ini berfungsi sebagai mekanisme pertahanan tanaman untuk melindungi diri dari potensi bahaya, seperti serangan serangga atau hewan lain. Ketika daunnya mengatup, tanaman mengurangi daya tarik bagi herbivora, karena bagian yang terlihat layu tidak menarik sebagai sumber makanan. Tigmonasti menunjukkan bagaimana tanaman dapat merespons rangsangan eksternal secara efisien dan cepat, memberikan mereka keuntungan evolusioner dalam bertahan hidup di lingkungan yang penuh dengan ancaman mekanis (Volkov, 2012; Taiz & Zeiger, 2010).

4) Termonasti

Termonasti adalah gerakan nasti yang terjadi sebagai respons terhadap perubahan suhu lingkungan. Dalam gerakan ini, bagian tanaman, seperti bunga atau daun, bereaksi terhadap perubahan

suhu tertentu tanpa memperhatikan arah datangnya rangsangan tersebut. Salah satu contoh termonasti dapat dilihat pada bunga tulip (*Tulipa* spp.), yang mekar ketika suhu udara mencapai tingkat yang sesuai. Mekanisme ini memungkinkan tanaman untuk membuka bunganya pada saat-saat yang paling menguntungkan, seperti ketika suhu cukup hangat untuk mendukung proses reproduksi yang optimal. Termonasti membantu tanaman menyesuaikan diri dengan kondisi lingkungan, memastikan bahwa mereka mekar pada waktu yang tepat untuk memaksimalkan peluang penyerbukan dan keberhasilan reproduksi (Hopkins & Hüner, 2009; Taiz & Zeiger, 2010).

5) Haptonasti

Haptonasti adalah jenis gerakan nasti yang terjadi pada tumbuhan insektivora sebagai respons terhadap sentuhan dari serangga atau hewan kecil lainnya. Gerakan ini merupakan mekanisme pertahanan dan penangkapan yang efisien, di mana bagian tanaman, seperti daun, bereaksi cepat terhadap kontak fisik. Contoh haptonasti dapat dilihat pada tanaman kantung semar (*Nepenthes* spp.) dan Venus flytrap (*Dionaea muscipula*). Ketika serangga kecil menyentuh bagian sensitif pada permukaan daun, tanaman ini dengan cepat menutup daun atau kantungnya, menjebak serangga tersebut di dalamnya. Proses penutupan yang cepat ini memungkinkan tumbuhan untuk menangkap dan mencerna serangga sebagai sumber nutrisi, terutama di lingkungan yang miskin akan nutrisi seperti nitrogen. Haptonasti adalah contoh adaptasi yang luar biasa di mana tumbuhan mengembangkan gerakan responsif yang kompleks untuk memenuhi kebutuhan nutrisi mereka, menunjukkan interaksi yang menarik antara tanaman dan lingkungan sekitarnya (Ellison & Gotelli, 2009; Volkov, 2012).

6) Nasti Kompleks

Nasti kompleks adalah jenis gerakan nasti pada tumbuhan yang dihasilkan dari respons terhadap beberapa rangsangan sekaligus. Gerakan ini terjadi ketika tumbuhan merespons berbagai faktor lingkungan seperti cahaya matahari, suhu, kelembapan, dan zat kimia secara bersamaan, yang semuanya berkontribusi pada

respons akhir tanaman. Contoh nyata dari nasti kompleks adalah mekanisme membuka dan menutupnya stomata pada daun. Stomata merupakan pori-pori kecil di permukaan daun yang berperan penting dalam pertukaran gas dan pengendalian kehilangan air melalui transpirasi. Pembukaan dan penutupan stomata dikendalikan oleh kombinasi berbagai faktor lingkungan tersebut. Misalnya, cahaya merangsang pembukaan stomata untuk memungkinkan fotosintesis, sementara penutupan stomata terjadi saat suhu atau tingkat kelembapan berubah, untuk mencegah kehilangan air yang berlebihan. Ini menunjukkan bagaimana tumbuhan dapat mengintegrasikan berbagai sinyal dari lingkungannya untuk mengatur proses fisiologis penting, memastikan efisiensi energi dan kelangsungan hidup.

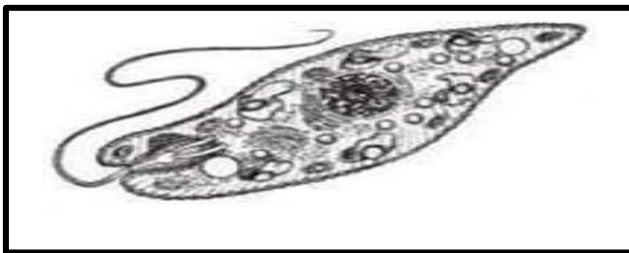
7.2.3 Gerak Taksis

Taksis adalah jenis gerakan pada seluruh atau sebagian tubuh organisme yang melibatkan perpindahan tempat, di mana arah gerakan tersebut ditentukan oleh arah datangnya rangsangan dari lingkungan. Taksis merupakan respons terarah yang biasanya terjadi sebagai reaksi terhadap stimulus tertentu, seperti sinyal kimia, cahaya, atau suara. Organisme yang menunjukkan taksis dapat bergerak mendekati atau menjauhi sumber rangsangan, tergantung pada kebutuhan fisiologis mereka. Misalnya, dalam fototaksis, organisme bergerak sebagai respons terhadap cahaya, sedangkan dalam kemotaksis, mereka merespons adanya zat kimia di sekitarnya. Pergerakan ini memungkinkan organisme untuk beradaptasi dengan lingkungannya secara dinamis, mencari kondisi yang paling mendukung kelangsungan hidup, seperti menemukan sumber makanan atau menghindari kondisi yang berbahaya. Dengan kemampuan ini, organisme dapat meningkatkan peluang kelangsungan hidup mereka melalui penyesuaian gerakan yang tepat terhadap berbagai rangsangan lingkungan (Alberts *et al.*, 2014; Berg, 2004). Ditinjau dari macam sumber rangsangannya, taksis dibedakan menjadi:

1. Fototaksis

Fototaksis merupakan gerakan taksis yang dapat terjadi sebagai respons terhadap rangsangan cahaya. Gerakan ini memungkinkan

organisme, termasuk tumbuhan, untuk bergerak menuju atau menjauh dari sumber cahaya, tergantung pada jenis fototaksis yang terjadi (Purwanto, 2010; Raven *et al.*, 2005). Fototaksis dapat dibedakan menjadi dua jenis yaitu 1) fototaksis positif dan 2) fototaksis negatif. Fototaksis positif merupakan gerakan di mana organisme atau sel, seperti klorofil dalam tumbuhan, bergerak mendekati sumber cahaya. Ini adalah mekanisme yang penting bagi proses fotosintesis, karena memungkinkan sel-sel yang mengandung klorofil untuk memaksimalkan penyerapan cahaya yang dibutuhkan untuk menghasilkan energi. Sebaliknya, fototaksis negatif adalah gerakan menjauhi sumber cahaya, yang mungkin terjadi untuk menghindari kondisi cahaya yang berlebihan yang dapat merusak sel atau mengeringkan organisme. Fenomena fototaksis ini tidak hanya penting bagi tumbuhan, tetapi juga bagi mikroorganisme seperti alga dan bakteri, yang mengandalkan gerakan ini untuk mencari lingkungan yang optimal untuk pertumbuhan dan reproduksi (Junus, 1981; Jékely, 2009).



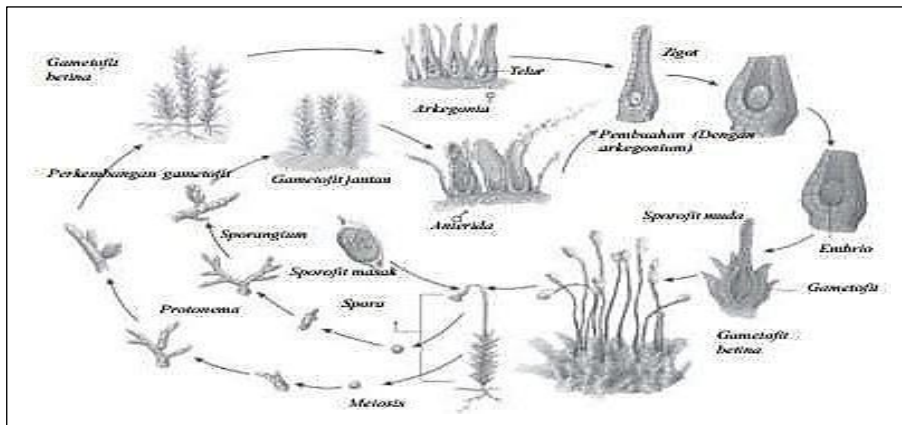
Gambar 7.2 Fototaksis

(Sumber : Evolusi, keanekaragaman dan lingkungan 2)

2. Kemotaksis

Kemotaksis merupakan gerakan taksis yang dapat dipicu oleh adanya rangsangan dari zat kimia yang ada di lingkungan. Dalam proses ini, organisme atau sel bergerak menuju atau menjauhi sumber kimia tertentu, tergantung pada apakah zat tersebut bermanfaat atau berbahaya bagi mereka. Contoh klasik dari kemotaksis dapat dilihat dalam proses pembuahan pada tumbuhan lumut (Bryophyta), di mana spermatozoa bergerak menuju sel telur yang memancarkan sinyal kimia selama metagenesis. Gerakan ini sangat penting untuk memastikan bahwa pembuahan terjadi dengan tepat, memungkinkan sperma mencapai sel

telur untuk membentuk zigot. Kemotaksis memainkan peran krusial dalam berbagai proses biologis, termasuk perkembangan, imunologi, dan reproduksi, karena memungkinkan organisme untuk secara efisien menemukan dan merespons sinyal kimia yang menentukan kelangsungan hidup dan kesuksesan reproduksi mereka (Campbell & Reece, 2008; Miller & Brody, 2012).



Gambar 7.3 Kemotaksis
(Sumber : Indonesian Heritage, Tetumbuhan)

7.3 Mekanisme Gerak pada Tumbuhan

Gerak pada tumbuhan terjadi melalui beberapa mekanisme berbeda yang melibatkan perubahan tekanan turgor, pertumbuhan diferensial, dan perubahan dalam komposisi seluler.

1. Perubahan Tekanan Turgor

Tekanan turgor adalah tekanan yang dihasilkan oleh air di dalam vakuola sel tumbuhan terhadap dinding sel. Perubahan tekanan turgor dalam sel-sel tertentu dapat menyebabkan gerakan cepat. Misalnya, dalam tanaman *Mimosa pudica*, perubahan tekanan turgor di sel-sel daun menyebabkan daun menutup saat disentuh.

2. Pertumbuhan Diferensial

Gerak yang disebabkan oleh pertumbuhan diferensial terjadi ketika satu sisi organ tumbuhan tumbuh lebih cepat dibandingkan sisi lainnya. Misalnya, pada fototropisme, hormon auksin akan

terkonsentrasi di sisi yang kurang terkena cahaya, menyebabkan sisi tersebut tumbuh lebih cepat dan batang tumbuhan membengkok ke arah cahaya.

3. **Perubahan Komposisi Seluler**

Beberapa gerak pada tumbuhan melibatkan perubahan dalam komposisi kimiawi sel-sel tertentu, seperti peningkatan atau penurunan konsentrasi ion tertentu yang mempengaruhi pengembangan dan kontraksi sel.

Bab 8

INTERAKSI TUMBUHAN DENGAN LINGKUNGAN

Tumbuhan merupakan makhluk hidup yang merupakan menjadi sebab dasar kelangsungan hidup dari makhluk hidup di bumi. Dari tumbuhan lalu menghasilkan oksigen yang menjadi unsur utama kehidupan di bumi. Evolusi tumbuhan yang diungkap ilmuwan *Therese Sallstedt* dari museum Sejarah Alam Swedia, mereka berhasil menemukan fosil tumbuhan yang mungkin telah hidup 1,6 milyar tahun yang lalu. Ini menunjukkan bahwa tumbuhan dari awal munculnya milyaran tahun lalu yang hanya berupa alga di lautan kemudian secara bertahap bisa hidup di darat dan terus berevolusi sampai sekarang pastilah telah melalui perjuangan hidup yang sulit dari kondisi ekstrim pada saat itu. Dari kondisi cekaman lingkungan yang ekstrim berjuta-juta tahun namun secara bertahap bisa dilewati dengan dengan perkembangannya saat ini.

Sebagaimana halnya dengan makhluk hidup lainnya tumbuhan tentu akan selalu berinteraksi dengan lingkungan sekitarnya mulai dari milyaran tahun yang lalu. Bagaimana bentuk interaksinya dan bagaimana respons tumbuhan terhadap lingkungannya akan dibahas bab ini. Beberapa proses pada tumbuhan yang merupakan hasil interaksi dengan lingkungan dijelaskan dibawah ini.

8.1 Difusi

Difusi didefinisikan sebagai suatu proses berpindahnya suatu zat atau molekul dari konsentrasi tinggi ke konsentrasi rendah. Perbedaan konsentrasi tersebut disebut gradien konsentrasi. Difusi akan terus terjadi hingga seluruh partikel tersebar secara luas dan merata. Difusi merupakan peristiwa awal khususnya di dalam tanah dimana tumbuhan menyerap air

untuk kelangsungan hidupnya. Prosesnya dapat dijelaskan sebagai berikut: awalnya kondisi air di dalam tanah disekitar perkaran lebih tinggi (banyak) konsentrasinya disbanding dengan air yang berada di dalam tumbuhan. Sehingga air yang jumlahnya lebih banyak akan mengalir atau berpindah ke tempat yang jumlah airnya lebih sedikit, dalam hal ini rambut akar pada tumbuhan .

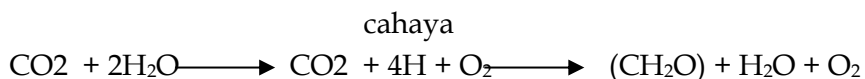
Terdapat faktor yang mempengaruhi proses difusi.

- Ukuran Zat (molekul). Jika zaszt (molekul) berukuran kecil maka zat (molekul) itu akan bergerak lebih cepat sehingga kecepatan difusi meningkat.
- Ukuran membran. Membran yang lebih tebal akan menurunkan kecepatan difusi
- Areal. Dengan arel yang lebih luas maka difusi akan lebih cepat
- Rentang. Jika rentang (jarak) antara konsentrasi besar maka difusi menjadi lambat
- Temperatur. Temperatur (suhu) yang tinggi akan menyebabkan kecepatan energi meningkat.

Laju fotosintesis yang terhambat kecepatannya terutama disebabkan karena pengaruhnya terhadap turgiditas sel penjaga pada stomata. Turgiditas sel penjaga akan menurun bila terjadi kekurangan air. Ini yang menyebabkan stomata menutup.

8.2 Respons Fotosintesis Terhadap Ligkungan

Tumbuhan dalam pertumbuhannya sangat tergantung pada kemampuannya untuk memproses karbon dari atosfer menjadi bahan organic melalui pemanfaatan radiasi matahari yang diserap dalam fotosintesis. Fotosintesis meyediakan sebagian besar input energi ke dalam biosfer. Rumus reaksi fotosintesis dapat ditulis seperti dibawah ini:

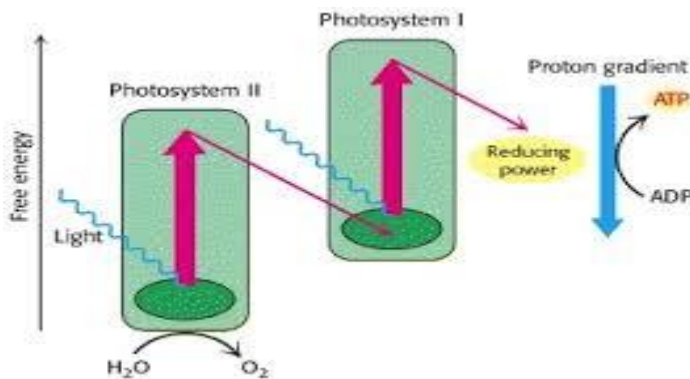


Fotosintesis merupakan perubahan satu mol air dan menghasilkan satu mol O_2 untuk setiap mol CO_2 lalu diproses menjadi pati. Kebanyakan reaksi terjadi pada tempat khusus yang disebut cloroplas di dalam sel mesofil daun. Laju fiksasi netto CO_2 dalam fotosintesis tanaman adalah

selisih antara laju fiksasi dengan laju respirasi. Karena itu antara fotosintesis dan respirasi tidak dapat dipisahkan karena saling berkaitan. Ada 3 proses yang saling berkaitan dalam fotosintesis yaitu:

1. Reaksi terang.

Reaksi terang membutuhkan Cahaya dan merupakan reaksi fotokimia awal. Dimana energi radiasi yang diserap sebagai bahan berenergi tinggi ATP (*adenosin triphosphate*) dan reduktan NADPH (*nicotinamide adenine dinucleotide phosphate*). Proses utama fotosintesis adalah penyerapan radiasi surya yang sampai di daun oleh pigmen yang terletak dalam grana dan stroma membrane lamella dari kloroplas. Pigmen utama klorofil adalah pigmen yang paling efektif dalam menyerap Panjang gelombang lain dalam PAR (*Photosynthetically active radiation 400-700 nm*). Pada tanaman berhijau daun klorofil melekat pada tiga klorofil protein kompleks yaitu LHC (*Light harvesting complex*). Fotosistem 1 antenna kompleks (PS I) dan fotosistem II antenna kompleks (PS II) (**Gambar 8.1**).

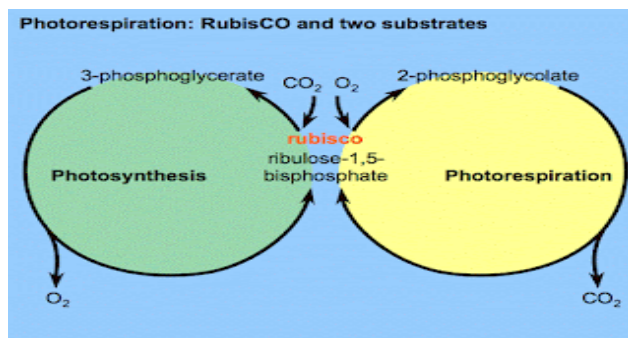


Gambar 8.1 Reaksi terang pada fotosintesis
(Sumber: <https://www.kompas.com/skola/read/2020>)

Radiasi surya yang diserap oleh klorofil lalu dipindahkan ke tempat reaksi utama. Dimana terjadi transpor electron sepanjang gradien energi. Energi yang dilepas dalam proses transpor electron dapat digunakan untuk fosforilasi ADP dan mereduksi NADP. Kedua molekul itu sangat penting untuk siklus reduksi biokimia pada reaksi gelap.

2. Reaksi Gelap.

Reaksi gelap tidak membutuhkan Cahaya dan merupakan reaksi biokimia Dimana terjadi reaksi CO_2 menjadi pati dengan menggunakan bahan dengan energi yang tinggi yang merupakan hasil dari reaksi terang. Reaksi awal CO_2 kebanyakan tumbuhan dalam fotosintesis tergantung pada aktivitas Rubisco (*Ribulosa biphosphate carboxy oxygenase*). Hal yang paling dasar dari kerja enzim ini yaitu CO_2 dan O_2 adalah subfat kompetitif pada Lokasi aktif fotosintesis. Pada reaksi karbosilasi CO_2 dari atmosfer digabungkan dengan R_uP_2 (*ribulase biphosphate*) untuk membentuk dua molekul 3PGA (*3-phosphoglycerate*), sedangkan pada reaksi oksigenase O_2 dan R_uP_2 dikombinasi untuk membentuk dua molekul karbon dan PGA. Glikolat yang dihasilkan kemudian diubah dalam satu urutan reaksi yang dikenal dengan fotorespirasi Dimana CO_2 dilepaskan Kembali. Hubungan antara fotosintesis dan fotorespirasi terlihat pada **Gambar 8.2**.



Gambar 8.2. Fotosintesis dan fotorespirasi
(Sumber: <https://www.edubio.info/2016>)

Pada tumbuhan ada beberapa proses biokimia yang kurang mendukung produktivitas tumbuhan, salah satunya yaitu proses fotorespirasi. Hal ini disebabkan karena fotorespirasi terjadi dengan menggunakan O_2 dan menghasilkan CO_2 , akan tetapi secara langsung tidak dapat menghasilkan ATP atau karbohidrat. Kata Fosforilasi sendiri berasal dari kata foto yang berarti Cahaya dan respirasi yang berarti menghasilkan O_2 dari CO_2 .

Stomata yang terbuka merupakan jalan masuk karbondioksida kedalam jaringan tumbuhan. Agar penguapan air berkurang maka

stomata akan menutup. Stomatayang menutup akan berakibat pada terganggunya suplai CO₂ menuju jaringan daun. Hal ini mengakibatkan terjadinya konsentrasi CO₂ yang menurun dalam ruang antar sel pada daun.

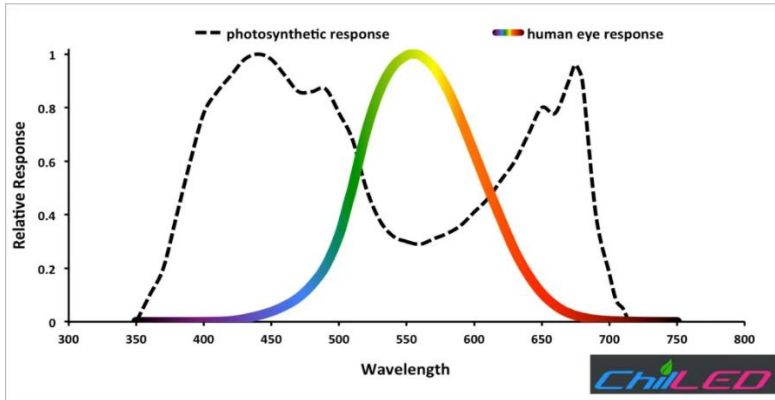
3. Proses penyerapan CO₂.

Diperkirakan terdapat 50% karbondioksida tertimbun diatmosfer yang menjadi penyebab utama *green house effect*. Proses fotosintesis yang berlangsung pada tumbuhan menunjukkan kemampuan tumbuhan dalam penyerapan CO₂ yang dimungkinkan dengan fungsi stomata yang merupakan jalan masuk CO₂ pada tumbuhan. CO₂ diperlukan dalam proses fotosintesis harus terjadi lewat difusi pada udara sekitar daun dengan rata-rata tekanan 34 Pa atau setara dengan volume 340 ppm melalui suatu urutan tahanan ked lam Lokasi karboksilasi. Terdapat 2 fase dalam proses penyerapan CO₂ yaitu: (1) fase gas, Ketika CO₂ dari lapisan perbatas masuk ke dalam stomata dan ruang antar sel kemudian menuju sel mesofil. (2) fase cair, Ketika CO₂ ditransfer melalui dinding sel ke Lokasi karboksilasi di kloroplas. Uraian singkat mengenai fotosintesis maka dapat dilakukan identifikasi factor-faktor lingkungan fisik yang mempengaruhi laju proses tersebut.

8.3 Cahaya

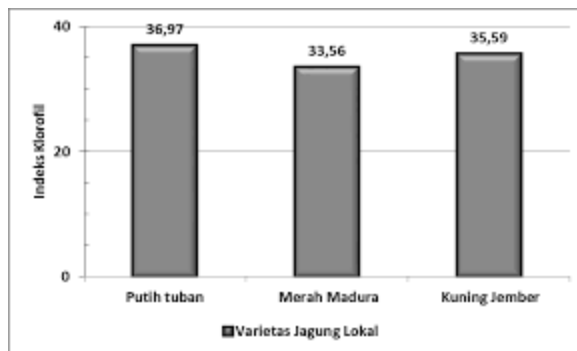
Sebagaimana uraian sebelumnya bahwa sekian banyak radiasi surya yang diterima daun, hanya fraksi dalam Panjang gelombang 400-700nm saja yang aktif dalam proses fotosintesis dan dikenal dengan PAR (**Gambar 8.3**).

Dengan meningkatnya reaksi fotokimia akan membuat intensitas PAR bertambah yang berakibat pada peningkatan laju fotosintesis. Pada kondisi intensitas yang tinggi maka laju fotosintesis maksimum yang dicapai sangat besar dipengaruhi oleh hantaran stomata terhadap CO₂. Hal sebaliknya, jika intensitas Cahaya rendah maka hamper tidak terjadi penyerapan CO₂. Hal ini disebabkan karena laju penyerapan CO₂ lewat proses fotosintesis lebih rendah dari pada kecepatan evolusi CO₂ dan respirasi pada mitokondria.



Gambar 8.3 Photosynthesis Active Radiation (PAR)
 (Sumber: <https://www.google.com/>)

Bagaimana fotosintesis merespons cahaya sangat tergantung pada spesies tumbuhan serta antar daun pada tumbuhan tersebut. Respon tanaman yang tenaungi dan yang terkena cahaya menunjukkan perbedaan seperti pada **Gambar 8.4**.



Gambar 8.4 Hubungan antar intensitas naungan pada beberapa varietas tanaman jagung
 (Sumber: Eko *et al*, 2016)

Tumbuhan yang tumbuh dibawah naungan sangat jelas terlihat dipengaruhi oleh naungan. Tumbuhan yang tumbuh dibawah naungan semakin terhambat jika tingkat naungan semakin tinggi. Hal ini terjadi karena radiasi matahari yang merupakan sumber utama Cahaya bagi pertumbuhan tanaman adalah syarat utama agar terjadinya kelangsungan proses fotosintesis. Selain itu hal ini terjadi juga karena

19 Cahaya pada perbedaan sistem pertanaman tanaman kehutanan yang sifatnya lebih kompleks (Ong *et al.*, 1996; Huxley, 1999; Sitompul, 2003) antara lain terjadinya irradiasi Cahaya yang berbeda antara tumbuhan dibawah pohon yang tidak konstan, sedangkan tanaman yang berada dibawah naungan buatan selalu konstan. Penyebab lain juga karena terjadi pada system agroferesti antara tanaman sela dan pohon dalam menyerap air dan unsur hara (Carlson *et al.*, 1994; Huxley, 1996; Hairiah, 2001; Hairiah dan Utami, 2003). Tanaman jagung yang merupakan tanaman semusim menyelesaikan siklus hidupnya dalam 80 sampai dengan 150 hari. Bagian awal dari siklus pertumbuhan merupakan tahapan pertumbuhan vegetative dan bagian kedua dari siklus pertumbuhan merupakan fase pertumbuhan generative. Tanaman jagung memiliki morfologi yaitu akar, batang, daun, bunga dan buah.

19 Tanaman jagung merupakan tanaman C4 juga memiliki kemampuan beradaptasi dengan baik pada factor pembatas baik pertumbuhan maupun produksi. Tanaman jagung sebagai tanaman C4 juga memiliki salah satu sifat antara lain laju fotosintesis pada daun lebih tinggi dibanding tanaman C3, rendahnya fotorespirasi dan transpirasi, serta penggunaan air yang efisien (Goldsworthy dan Fisher, 1980). Aktivitas (fotosintesis) mereka dapat dilakukan berdasarkan cahaya matahari alami (sistem PBR luar ruangan), atau pada sumber cahaya buatan (yaitu lampu fluoresensi, LED) dalam sistem dalam ruangan. Sumber cahaya yang menyimpang dari PAR biasa dapat memberikan kualitas spektrum cahaya yang lebih buruk untuk proses fotosintesis yang efisien, sehingga pengurangan produktivitas biomassa diharapkan. Misalnya, cahaya ultraviolet (yaitu 218–400 nm) dilaporkan berdampak negatif pada kinerja fotosintesis. Sinar matahari menyumbang sekitar 50% PAR; sisanya terbuang sebagai fluoresensi atau panas. Dalam sistem budidaya massal luar ruangan yang paling umum, cahaya matahari digunakan sebagai sumber energi yang murah untuk pertumbuhan mikroalga. Namun, iradiasi yang tidak dikelola atau meningkat pada permukaan PBR - diukur dengan kerapatan fluks foton (FDP, dalam $\mu\text{mol}_{\text{foton}} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), dapat menyebabkan tingkat fotoinhibisi yang tinggi, atau bahkan kerusakan foto.

Fenomena seperti itu mengurangi kemampuan fotosintesis sel dan menurunkan pertumbuhan bersihnya, terutama di dekat dinding

transparan PBR (atau di dekat sumber cahaya). Di sisi lain, sel-sel di dalam inti fotobioreaktor, yaitu wilayah tengah PBR tubular atau vertikal, rentan terhadap lingkungan cahaya redup, dan menunjukkan distribusi intensitas cahaya yang buruk; gradien cahaya (dengan kemiringan negatif) memang terbentuk ke arah pusat PBR. Peristiwa ini sangat bergantung pada geometri PBR (yaitu diameter) dan efek bayangan sel (terutama dalam kultur kepadatan tinggi). Di dalam reaktor, sel mikroalga menyerap, menyebarkan dan mendistribusikan kembali cahaya; oleh karena itu, sel menjadi terbatas cahayanya, yang dapat berdampak negatif pada produksi biomassa.

Rasio luas permukaan terhadap volume (rasio S/V) merupakan aspek penting yang memengaruhi kinerja PBR; distribusi/pengenceran cahaya di atas permukaan PBR berhubungan dengan total luas permukaan transparan yang tersedia. Secara umum, semakin tinggi rasio S/V , semakin tinggi porsi cahaya yang diizinkan melalui permukaan PBR, dengan peningkatan simultan dalam efisiensi fotosintesis, dan dengan demikian dalam produktivitas biomassa dan metabolit. Oleh karena itu, desain PBR jalur cahaya pendek lebih disukai (yaitu panel datar atau PBR alveolar), karena lebih kuat dan cenderung mencapai kepadatan sel yang lebih tinggi. Sebagian besar desain vertikal konvensional (yaitu PBR kolom) memiliki jalur cahaya yang meningkat karena rasio A/V yang lebih rendah (rasio area terhadap volume) yaitu rasio luas penampang terhadap volume PBR, yang karenanya mengganggu distribusi cahaya di inti. Namun, karena alasan struktural, diameter tidak dapat dikurangi secara berlebihan, jika tidak kolom dapat runtuh. Memaparkan sel pada siklus terang/gelap (misalnya dengan pengadukan) merupakan strategi yang baik untuk meminimalkan efek redaman cahaya di dalam PBR. Dengan cara ini, sel mikroalga dipaparkan pada periode terang dan gelap secara siklis (atau acak), sehingga distribusi cahaya dan efisiensi fotosintesis menjadi lebih seimbang dan seragam. Siklus terang/gelap tersebut tidak boleh diperpanjang terlalu lama (misalnya, < 10 detik), karena pertumbuhan sel dan pemanfaatan cahaya dapat terpengaruh secara negatif.

Menariknya, kultur sel mikroalga juga dapat memperoleh manfaat dari penggunaan bahan penggeser cahaya dalam komposisi PBR. Ini berarti bahwa kualitas cahaya dapat ditingkatkan dengan bahan-bahan

tertentu (yaitu semikonduktor, senyawa berpendar atau berpendar), yang mampu memberikan konversi spektral panjang gelombang yang menggeser panjang gelombang non-PAR ke PAR. Ada tiga prinsip utama yang mendasari konverter spektral: i) reduksi foton berenergi tinggi yang membagi energi ini menjadi dua atau lebih foton dengan energi lebih rendah (konversi turun); ii) pergeseran foton ke dalam wilayah panjang gelombang yang ditargetkan (fotoluminesensi); dan iii) lebih dari satu foton dengan energi lebih rendah diubah menjadi foton dengan energi lebih tinggi (konversi naik). Bahan-bahan tersebut dapat diterapkan untuk meningkatkan penggunaan energi matahari, dan diklaim memiliki koefisien penyerapan tinggi, efisiensi konversi kuantum tinggi, pita panjang gelombang emisi dan penyerapan yang berbeda, dan fotostabilitas yang diperluas yang terkait dengan biaya rendah.

8.4 Karbon Dioksida

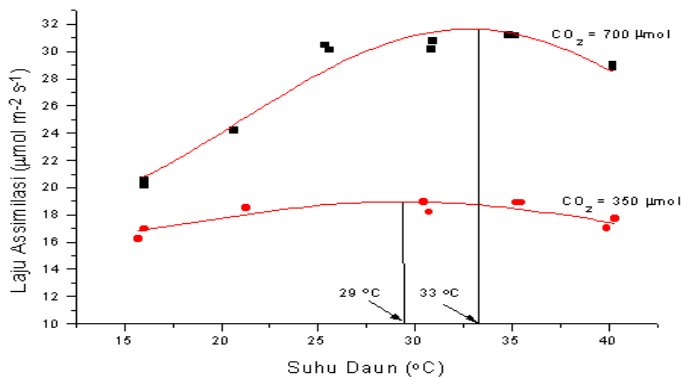
Perbedaan fisiologi anatara berbagai reaksi fotosintesis dikustrasikan sebagai respons CO_2 pada tanaman C_3 dan C_4 dalam keadaan udara normal atau keadaan oksigen rendah. CO_2 merupakan substrat utama dalam fotosintesis yang Bersama-sama rubisco menjadi factor pembatas proses tersebut. Laju fotosintesis umumnya mengalami peningkatan secara linier dengan bertambahnya konsentrasi CO_2 pada ruang antar sel dengan konsentrasi CO_2 inter seluler yang rendah karena RuP_2 tidak menjadi factor pembatas. Akan tetapi laju fotosintesis akan mulai menurun pada Tingkat konsentrasi CO_2 inter seluler yang tinggi sesuai dengan kemampuan produksi RuP_2 yang menurun yang tidak sebanding dengan meningkatnya ketersediaan CO_2 . Pembentukan RuP_2 tergantung pada aktivitas fotokimia yang berarti bahwa pembatasan proses fotosintesis pada keadaan intensitas Cahaya yang rendah dan konsentrasi CO_2 yang tinggi juga memiliki penyebab yang sama.

Kebanyakan daun memperlihatkan proses fotosintesis pada Tingkat konduksi stomata dapat mempertahankan keseimbangan pada keadaan "break point" antara ketersediaan rubisco dengan pembentukan RuP_2 . Hal ini berarti kapasitas karboksilasi dan transpor electron juga merupakan factor pembatas yang akhirnya mempengaruhi komponen biokimia dari fotosintesis. Pada keadaan stress air akan mendorong

penutupan stomata sehingga mengurangi difusi CO₂ dan konsentrasi ci yang pada gilirannya menurunkan laju fotosintesis. Pada saat ini di mana konsentrasi CO₂ pada atmosfer yang cenderung meningkat maka diduga akan menghasilkan dua keadaan yaitu peningkatan laju fotosintesis dan penurunan titik kompensasi fotosintesis.

8.5 Suhu Lingkungan

Fotosintesis akan meningkat dengan bertambahnya suhu lingkungan karena adanya kapasitas pemanfaatan CO₂ yang tinggi akibat adanya peningkatan aktivitas enzim (**Gambar 8.5**).



Gambar 8.5 Pengaruh peningkatan suhu terhadap laju fotosintesis
(Sumber: <https://thophick.blogspot.com/2013/>)

Respons fotosintesis tumbuhan terhadap suhu lingkungan sangat berbeda tergantung pada lingkungan tempat tumbuhnya. Tanaman yang berada digurun misalnya memiliki suhu optimum fotosintesis lebih dari 40°C, akan tetapi sebaliknya di daerah antartika yang suhu optimumnya mendekati titik beku. Tanaman yang tumbuh pada lingkungan radiasi yang berbeda juga memiliki respons fotosintesis terhadap suhu juga berbeda. Hal yang sama juga terlihat pada aklimatisasi tumbuhan terhadap perubahan suhu musiman seperti pada tumbuhan apricot.

Daerah dataran tinggi dan daerah subtropika merupakan hal yang paling dominan yang mempengaruhi pertumbuhan tanaman yaitu suhu. Suhu dan radiasi matahari akan sangat berpengaruh terhadap

25 pertumbuhan dan perkembangan tanaman serta efisiensi tanaman dalam memproduksi biomasa terhadap radiasi matahari tersebut. Umumnya sampai tanaman mencapai titik suhu tertentu pertumbuhan tanaman tidak akan dimulai, lalu seiring suhu yang meningkat sampai ,emcapai suhu optimum maka pertumbuhan tanaman akan meningkat. Kisaran suhu optimum yang berbeda pada setiap jenis tanaman akan bisa memproduksi biomasanya. Menurut Perry (1990), menyatakan bahwa secara umum apabila suhu udara meningkat diatas suhu dasar tetapi tidak lebih tinggi dari suhu optimum, maka akan dapat menurunkan hasil pada tanaman sereal serta meningkatkan hasil pada umbi dan rumput-rumputan. Peningkatan suhu selain itu juga dapat meningkatkan evapotranspirasi rata-rata dan dapat menurunkan kelembaban sehingga dapat juga berpengaruh terhadap hasil tanaman. Tanaman C3 dengan kebutuhan Cahaya berkisar 6000fc berpengaruh terhadap peningkatan suhu dan secara signifikan dapat menurunkan produktivitas tanaman, sebaliknya dengan kebutuhan Cahaya optimum berkisar pada intensitas 800 - 1000fc peningk atan suhu udara akan juga meningkatkan produksi biomasanya. Suhu daun yang meningkat dari 150 C menjadi 350 C berakibat laju asimilasi yang meningkat seiring dengan meningkatnya suhu merupakan fenomena yang umum terjadi sampai pada titik suhu optimum tercapai, kemudian akan terjadi penurunan. Suhu optimum tanaman akan berubah dengan adanya peningkatan CO₂ di atmosfer. Pada tanaman kedelai suhu optimum bisa mencapai 12%.

8.6 Interaksi Tumbuhan dengan Air

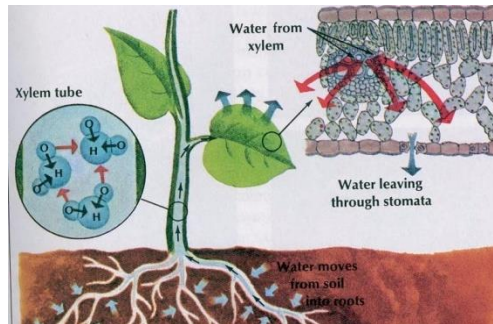
Tumbuhan dalam mempertahankan hidupnya sangat bergantung pada air, tanpa ada air tidak ada kehidupan. Air merupakan senyawa yang dibutuhkan dalam jumlah yang besar dibanding senyawa lainnya. Kandungan air bervariasi tergantung pada tipe sel dan jaringan juga bergantung pada kondisi fisiologis dan lingkungan. Akan tetapi lebih dari 80% berat basah sel dan jaringan tumbuhan terdiri dari air. Bahkan pada sel-sel meristematis kadar air dapat mencapai 90% atau lebih. Persentase kandungan air dari berat total beberapa tanaman misalnya umbi wortel mengandung air 88,2 %, barley 93% dan selada 94,8%. Kekurangan air akan mempengaruhi sebagian besar metabolisme seperti tekanan akar,

perkecambahan benih, pentupan stomata, aktivitas enzim, fotosintesis, transpirasi dan lainnya.

Sel tumbuhan yang jenuh dengan air menunjukkan bahwa Sebagian besar dari jumlah air tersebut dalam bentuk air bebas yang bergerak. Air bebas ini umumnya terdapat pada vakuola. Hanya Sebagian kecil dari air yang diikat oleh organela sel lainnya. Air yang terikat tersebut banyak terdapat pada membrane sel. Selain itu air juga terdapat pada protein dan lemak pembentuk membrane sel. Sebagian besar air yang bebas dapat bergerak dalam sel atau antar sel. Ada beberapa hal penting yang erat kaitannya dengan pergerakan air dalam tumbuhan. Terdapat pertikel-pertikel yang menyusun zat, unsur dan senyawa. Partikel-partikel ini memiliki sifat mampu tarik menarik dan bergerak bebas. Partikel dengan kemampuan bergerak bebas ini bisa memisahkan partikel penyusun suatu zat, sementara gaya tarik menarik mampu menyatakan partikel-partikel. Keadaan fisik suatu zat akan ditentukan oleh efek dari gerakan bebas dan gaya Tarik menarik. Bila gerakan bebas lebih unggul maka zat tersebut akan berada dalam bentuk gas, dan bila gaya tarik menarik lebih unggul maka zat tersebut akan berada dalam bentuk padat. Akan tetapi apabila keduanya sama kuat pengaruhnya maka zat tersebut akan berada dalam bentuk cair.

Pada tumbuhan tingkat tinggi ketersediaan air sangat mempengaruhi laju fotosintesis. Hal ini terlihat pada ekosistem gurun yang tandus dan kering, sebaliknya pada ekosistem hujan tropis terlihat produktif dengan hamparan hutan yang hijau. Dalam proses fiksasi karbondioksida tanaman harus kehilangan air karena uap air dan CO₂ tedifusi melalui lubang stomata yang sama. Saat stomata terbuka dan CO₂ akan terdifusi ke dalam Lokasi fiksasi maka pada saat yang sama uap air didifusikan ke atmosfer yang lebih kering. Kehilangan air ini secara proporsional berhubungan dengan perbedaan konsentrasi uap air antara daun dengan atmosfer yang ditunjukkan sebagai gradien fraksi mol uap air dikalikan dengan konduktan stomata dan lapisan pembatas.

Kehilangan air melalui stomata memiliki periode respons yang singkat terhadap perubahan diurnal dalam hal gradien uao air antara daun dengan amosfer. Stomata sebaliknya memiliki periode respons yang Panjang dalam hal perubahan Tingkat lembab air tersedia dalam tanah (**Gambar 8.6**).



Gambar 8.6 Proses kehilangan air melalui stomata (Sumberr: <https://www.anakagronomy.com/2014>)

8.7 Faktor Nutrient dan Polutan

Nutrient tumbuhan sangat penting dalam mempengaruhi fotosintesis karena nitrogen dan fosfor misalnya terlibat dalam reaksi fotosintesis. Nutrien tumbuhan juga memiliki efek tidak langsung terhadap fotosintesis melalui pengaruhnya terhadap lingkungan metabolic tumbuhan. Pengaruh langsung yang sangat dominan dari nutrient adalah nitrogen yang terkandung didalam daun yang Sebagian besar ada dalam enzim rubisco. Karena itu kandungan nitrogen daun memiliki korelasi positif dengan kapasitas fotosintesis.

Pencemaran lingkungan telah menjadi salah satu permasalahan utama di planet ini dalam beberapa dekade terakhir. Polutan organik lingkungan (OPs) khususnya memiliki pengaruh yang sangat signifikan terhadap pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Kelompok bahan kimia organik yang dibahas di sini meliputi pestisida, antibiotik, bisphenol A (BPA) dan hidrokarbon polisiklik aromatik (PAH). Mereka cukup bertahan di lingkungan dan mungkin memerlukan waktu beberapa dekade atau bahkan berabad-abad untuk terurai. OP telah ditemukan pada jaringan atau sampel lingkungan dari hampir seluruh belahan dunia. Karena karakteristik fisikokimianya yang unik, OP teradsorpsi pada partikel atmosfer atau berada dalam fase uap, yang memfasilitasi pengangkutannya dalam jarak yang jauh di atmosfer. OP beracun dapat diserap oleh tanaman melalui akar dan dedaunan. Dalam bab ini kami telah merangkum efek OP pada berbagai langkah fotosintesis. OP berpotensi mempengaruhi proses utama fotosintesis, khususnya

kompleks PSII. Klorofil fluoresensi digunakan sebagai indikator untuk menilai toksisitas OP pada tanaman dan alga. Teknik ini dan interpretasinya dapat diterapkan untuk memantau dampak polutan lingkungan pada berbagai sampel seperti tumbuhan tingkat tinggi, alga, dll. Berdasarkan literatur, kami menyimpulkan bahwa polutan ini mempunyai potensi risiko terhadap pertumbuhan tanaman dan hasil panen melalui penghambatan reaksi terang dan reaksi gelap fotosintesis. Dengan memahami faktor-faktor ini dengan baik dapat memungkinkan perencanaan strategi untuk mengurangi dampak berbahaya dari polutan.

Kapasitas fotosintesis daun terkait dengan kandungan nitrogen terutama karena protein siklus Calvin dan tilakoid mewakili sebagian besar nitrogen daun. Sebagai perkiraan pertama, nitrogen tilakoid sebanding dengan kandungan klorofil ($50 \text{ mol tilakoid N mol}^{-1} \text{ Chl}$). Dalam spesies ada hubungan linier yang kuat antara nitrogen dan karboksilase RuBP dan klorofil. Dengan meningkatnya nitrogen per satuan luas daun, proporsi total nitrogen daun dalam tilakoid tetap sama sementara proporsi dalam protein terlarut meningkat. Pada banyak spesies, pertumbuhan di bawah iradiasi yang lebih rendah sangat meningkatkan pembagian nitrogen ke dalam klorofil dan tilakoid, sementara kapasitas transpor elektron per unit klorofil menurun. Jika iradiasi pertumbuhan memengaruhi hubungan antara kapasitas fotosintesis dan kandungan nitrogen, memprediksi distribusi nitrogen antara daun dalam kanopi menjadi lebih rumit. Bila kapasitas fotosintesis dan kandungan nitrogen daun diekspresikan berdasarkan luas daun, variasi yang cukup besar dalam kapasitas fotosintesis untuk kandungan nitrogen daun tertentu ditemukan di antara spesies. Variasi tersebut mencerminkan strategi pembagian nitrogen yang berbeda, kapasitas transpor elektron per unit klorofil, dan aktivitas spesifik karboksilase RuBP. Kelangsungan hidup di lingkungan tertentu jelas tidak memerlukan pemaksimalan kapasitas fotosintesis untuk kandungan nitrogen daun tertentu. Spesies yang tumbuh subur di tempat teduh membagi nitrogen yang relatif lebih banyak ke dalam tilakoid, meskipun hal ini dikaitkan dengan kapasitas fotosintesis yang lebih rendah per unit nitrogen.

8.8 Pengaruh Perubahan Iklim

Apa yang terjadi pada fotosintesis dalam keadaan konsentrasi CO₂ yang berubah dan apa implikasi perubahan ekologis yang bakal terjadi di masa depan. Beberapa pola umum dapat diamati saat tanaman ditumbuhkan pada lingkungan dengan CO₂ yang ditingkatkan. Pertama, tanaman memiliki kandungan nitrogen daun yang rendah yang mempengaruhi fiksasi CO₂. Tetapi karena konsentrasi CO₂ cukup tinggi maka laju fotosintesis tetap meningkat. Kedua, peningkatan dalam efisiensi penggunaan air oleh tanaman karena Tingkat nutrient tidak diharapkan meningkat dalam keadaan CO₂ tinggi. Dalam hal ini belum jelas berapa besar laju peningkatan kanopi fotosintesis. Satu konsekuensi dari penurunan alokasi nitrogen ke daun adalah bahwa daun menjadi kurang disukai oleh serangga dan herbivora.

10 Tanaman yang ditanam di Amerika Serikat sangat penting bagi pasokan pangan di sini dan di seluruh dunia. Pertanian AS memasok hampir 25% dari semua biji-bijian (seperti gandum, jagung, dan beras) di pasar global. Perubahan suhu, karbon dioksida atmosfer, dan frekuensi serta intensitas cuaca ekstrem dapat berdampak signifikan pada hasil panen. Untuk tanaman tertentu, efek peningkatan suhu akan bergantung pada suhu optimal tanaman untuk pertumbuhan dan reproduksi. Di beberapa daerah, pemanasan dapat menguntungkan jenis tanaman yang biasanya ditanam di sana, atau memungkinkan petani beralih ke tanaman yang saat ini ditanam di daerah yang lebih hangat. Sebaliknya, jika suhu yang lebih tinggi melebihi suhu optimal tanaman, hasil panen akan menurun.

2 Konsentrasi CO₂ atmosfer telah diukur secara kontinyu sejak tahun 1950-an. Pada tahun 1960 rata-rata konsentrasi CO₂ atmosfer adalah 316 ppm. Pada tahun 1990 telah mencapai 354 ppm dan pasca tahun 2020 telah mencapai 600 ppm. Pada konsentrasi CO₂ yang berubah dan meningkat maka apa yang terjadi pada fotosintesis dan apa implikasi perubahan ekologis yang bakal terjadi dimasa yang akan datang. Beberapa pola umum dapat diamati Ketika tanaman ditumbuhkan pada lingkungan dengan CO₂ yang ditingkatkan. Pertama, tanaman memiliki kandungan nitrogen daun yang rendah yang mempengaruhi fiksasi CO₂. Tetapi karena konsentrasi CO₂ cukup tinggi, maka laju fotosintesis tetap

meningkat. Kedua, peningkatan dalam efisiensi penggunaan air oleh tanaman. Karena Tingkat nutrient tidak diharapkan meningkat dalam keadaan CO₂ tinggi. Satu konsekuensi dari penurunan alokasi nitrogen ke daun adalah bahwa daun menjadi kurang disukai oleh serangga dan herbivora. Karena itu hewan akan memakan lebih banyak jaringan daun untuk memenuhi kebutuhan nitrogen yang sesuai kondisi CO₂ di atmosfer yang terus meningkat.

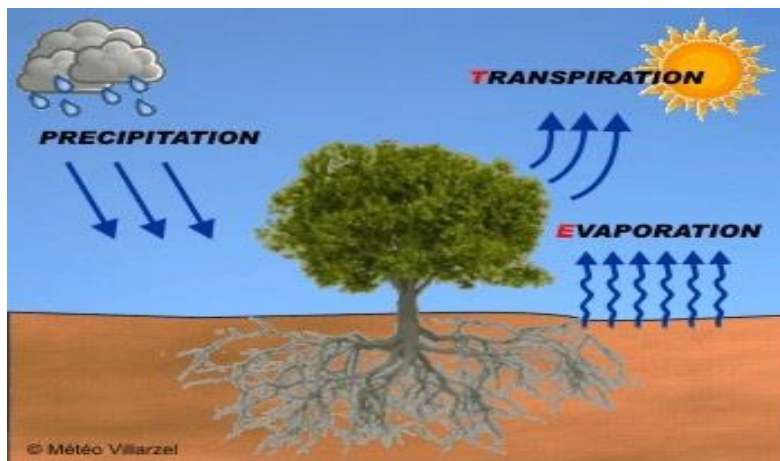
Kelompok tanaman memiliki tipe fotosintesis C₃ merupakan warisan leluhur secara alami, sedangkan C₃ dan CAM adalah hasil evolusi setelah manusia mengembangkan pertanian di lahan. Misalnya pada tanaman C₄ merupakan respons terhadap lingkungan yang memiliki kandungan CO₂ yang rendah, karena itu dengan makin meningkatnya CO₂ di atmosfer akibat aktivitas antropogenik maka konsentrasi CO₂ akan segera mencapai Tingkat Dimana tipe fotosintesis C₄ tidak lagi menguntungkan.

8.9 Respon Transpirasi Tumbuhan terhadap Lingkungan

Kebutuhan air pada tumbuhan ditentukan berdasarkan total kehilangan air melalui evatranspirasi. Konsep pengelolaan air ini dapat mengakibatkan tidak efisien pemanfaatan air oleh tumbuhan. Hubungan antara air dan tanaman, produksi biomasanya mempunyai kaitan yang lebih erat dengan transpirasi dibandingkan evaporasi. Sehingga dikenal istilah transpirasi produktif dan evaporasi non produktif (Atwell *et al*, 1998) yang menggambarkan bahwa segi fisiologi tumbuhan proses transpirasi mempunyai arti yang lebih penting. Transpirasi merupakan istilah untuk menerangkan evaporasi dari tumbuhan. Menurut Allen *et al* (1998) transpirasi adalah proses Dimana cairan air yang terkandung dalam jaringan tumbuhan menjadi menguap dan ditranfer permukaan daun tanaman ke atmosfer. Sebagian besar tumbuhan kehilangan air melalui stomata yang ada di daun. Stomata berfungsi ganda sebagai gerbang bagi pertukaran gas CO₂ dan difusi (Loomis, 1983) sehingga ada hubungan yang erat antara proses transpirasi dengan proses fotosintesis karena kedua proses tersebut memakai jalur stomata yang sama. Unsur hara dan air diserap oleh akar tumbuhan dan ditransportasikan melalui batang tumbuhan. Vaporisasi terjadi didalam daun terutama di ruang

antar sel dan pertukaran uap dengan atmosfer dikendalikan oleh pembukaan stomata. Semua air yang diserapi tumbuhan akan hilang melalui proses transpirasi dan hanya sebagian kecil digunakan untuk proses metabolisme tumbuhan.

Dalam proses transpirasi diperlukan energi terutama energi surya dan Sebagian dapat dari bahang yang berkorelasi dengan suhu udara untuk mengubah cairan air menjadi uap. Proses pemindahan uap air terutama di dorong oleh adanya tenaga penggerak berupa perbedaan tekanan uap air antara permukaan penguap dengan atmosfer sekitarnya. Penambahan uap ke atmosfer ini akan menyebabkan penurunan perbedaan tekanan uap karena lingkungan mendapatkan tambahan uap air akibat adanya evaporasi. Agar proses evaporasi tetap berjalan maka massa udara yang mengandung uap air harus dipindahkan dari permukaan penguap dan digantikan dengan masa udara yang lebih kering. Dalam proses ini angin mempunyai peranan yang penting (Gambar 8.7).



Gambar 8.7 Gambaran umum transpirasi dan evaporasi
(Sumber: <https://dianfitriarni.wordpress.com>).

32 Dengan memiliki kutikula yang tipis daun dimungkinkan dapat ditembus air, ditambah lagi transpirasi yang terjadi pada Sebagian besar tumbuhan merupakan proses transpirasi pada kutikula. Inilah yang berakibat sebesar 10% air yang terkandung pada tumbuhan hilang melalui daun-daun (Wilikin, 1989). Kecepatan transpirasi yang dimiliki tumbuhan berbeda-beda sesuai dengan jenis tumbuhan masing-masing. Akibat dari

32 terjadinya proses transpirasi ini dapat mengakibatkan penarikan air keatas melawan gaya gravitasi bumi yang memberikan efek tanaman menjadi dingin walau berada di sinar matahari yang Terik. Air yang naik keatas, maka dengan sendirinya kebutuhan air tumbuhan tercukupi untuk melakukan proses fotosintesis (Wilin, 1989).

Proses transpirasi menyebabkan terjadinya penguapan air menyebabkan suhu tanaman menurun. Apabila hal ini terus terjadi bisa berbahaya bagi tumbuhan, karena bila proses penguapan air melewati penyerapan air oleh akar maka tumbuhan akan kekurangan air, sehingga keadaan ini memaksa tumbuhan mengeluarkan energi, dan bila terus berlanjut maka dapat mengakibatkan tumbuhan bisa mati. Sumber air dalam proses transpirasi berasal dari air disekitar perakaran sehingga keberadaan air dalam tanah disekitar daerah perakaran merupakan factor yang turut menentukan proses transpirasi (Wenkert, 1983). Tumbuhan akan melakukan transpirasi pada laju potensial selama ketersediaan air tanah. Setelah melampaui titik kritis laju transpirasi akan menurun secara linear sampai semua air tersedia oleh tanaman untuk ditranspirasikan (Olaery *et al*, 1985). Akan tetapi beberapa peneliti menyatakan bahwa laju transpirasi akan menurun sejak kadar air tanah mulai berkurang dari kadar kapasitas lapang mengikuti rasio ketersediaan air tanah.

Sebelum berlangsung proses transpirasi akan terjadi pergerakan air dari sekitar perakaran memasuki akar dan menuju ke daun melalui batang. Sepanjang transpirasi air ini akan dijumpai berbagai macam hambatan termasuk hambatan pada interface tanah dan akar. Pada permukaan daun terdapat hambatan terhadap difusi uap air oleh hambatan stomata, hambatan lapisan berbatas dan hambatan udara. Ada beberapa factor lingkungan yang mempengaruhi transpirasi pada tumbuhan, yaitu:

1. Cahaya matahari

Telah diketahui bahwa menutupnya stomata karena tidak mendapat cahaya matahari dan sebaliknya cahaya matahari menyebabkan stomata membuka. Intesitas cahaya matahari yang tinggi yang diperoleh daun maka laju transpirasi juga akan semakin tinggi. Temperatur yang meningkat menambah tekanan uap diatmosfer atau diluar daun. Akan tetapi karena udara pada atmosfer tidak terbatas sehingga tekanan uap tidak lebih besar dari dalam daun ke udara bebas. Hal ini yang membuat

terjadinya difusi dimana molekul air dalam dengan konsentrasi yang tinggi akan berpindah keluar daun lewat stomata. Sehingga bisa disimpulkan bahwa temperature yang semakin tinggi akan membuat laju transpirasi semakin tinggi (Silaen, 2021).

2. Kelembaban udara

Kelembaban udara jumlah uap air yang ada di dalam udara. Jika dalam suatu wilayah memiliki kelembaban udara yang cukup besar maka itu memberi bentunjuka bahwa udara diwilayah tersebut mengandung uap air cukup banyak atau biasa disebut udara dalam keadaan basah. Persentase jumlah uap air yang berada diatmosfer hanya sekitar 2 % saja dari jumlah seluruh masa di atmosfer. Jumlah ini tergolong sedikit disbanding dengan masa gas lain. Akan tetapi jumlah tersebut tidak selalu konstan dan kadang disuatu wilayah tertentu memiliki kelembaban berkkisar 0 samapai 5%. Suatu daerah apabila memiliki kelembaban yang tinggi maka sangat mungkin akan terjadi hujan. Kelembaban udara dipengaruhi oleh beberapa factor seperti suhu udara, tekanan udara dan juga angin.

3. Angin

Angin adalah udara yang bergerak dari wilayah yang bertekanan tinggi ke wilayah bertekanan rendah. Arah angin terbentuk karena perbedaan tekanan udara di dua tempat yang berbeda. Arah angin selalu berasal dari tempat yang bertekanan tinggi menuju ke tempat yang bertekanan rendah. Angin terbentuk karena dipengaruhi oleh rotasi bumi juga dengan proses pemanasan disuatu wilayah oleh sinar matahari.. Angin dapat mempengaruhi suhu udara, kelembaban udara dan pergerakan awan sehingga turut memberikan pengaruh terhadap transpirasi pada tumbuhan. Angin yang berhembus dengan cepat akan mempercepat laju transpirasi juga. Selain itu angin juga dapat membawa uap air dari udara dan segera menurunkan kelembaban disuatu daerah sehingga dapat meningkat transpirasi. Saat angin bertiup disekitar daun, udara yang ada disekitar daun menjadi kering dan tekanan osmotic pada daun menyebabkan air berpindah secara difusi dari daun ke atmosfer.

Bab 9

FISIOLOGI STRESS TANAMAN

9.1 Pengantar

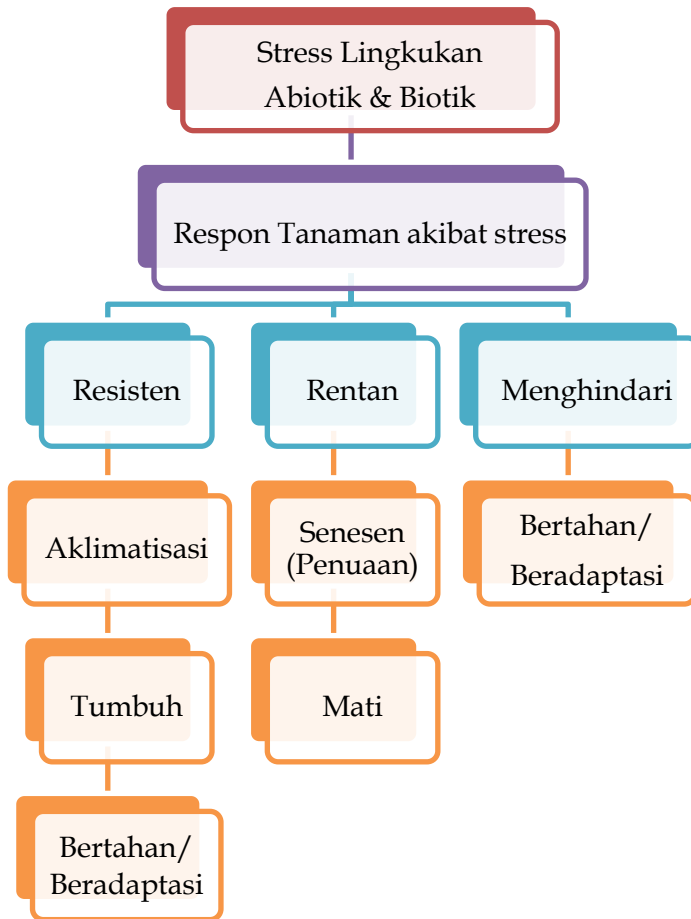
Potensi pengembangan areal pertanian sudah ditentukan berdasarkan tipologi tanah dan pembagian jenis tanaman. Arahana tata ruang pertanian secara nasional terdiri dari lahan basah dan lahan kering. Potensi luas lahan basah yang dapat dijadikan sebagai areal pertanian seluas 24,5 juta hektar yang berada di Papua, Sumatera dan Kalimantan. Areal yang berpotensi sebagai pengembangan lahan kering menjadi areal budidaya seluas 24,53 hektar di Kalimantan, Sumatera, Papua dan Sulawesi dengan komoditi tanaman pangan. Sedangkan pengembangan tanaman tahunan seperti kelapa sawit, karet, kopi, kakao, teh, jeruk dan mangga tersedia 50,94 hektar yang tersebar di Sumatera, Kalimantan, Papua, Maluku, Jawa (Makarim, 2024). Selanjutnya penetapan lahan dan komoditas tersebut diikuti dengan persoalan lain, yakni beragamnya stress atau cekaman yang menyebabkan rendahnya produktivitas termasuk stress abiotik maupun biotik. Oleh karena itu salah satu upaya mengatasinya atau mengurangi tingkat stress, tanaman budidaya harus diproduksi sesuai dengan pedoman.

Usaha budidaya bertujuan mencapai produksi maksimal. Pembudidayaanya harus dikelola dengan syarat – syarat yang baku. Cara budidaya yang sesuai dengan pedoman GAP (*Good Agriculture Practices*) untuk setiap jenis tanaman merupakan upaya menjaga agar tanaman tersebut tidak stress, sehingga memperoleh hasil panen yang diharapkan. Namun penerapan teknik budidaya tentunya memiliki faktor pembatas.

Ilmu tanaman termasuk bidang ilmu sains yang kompleks. Kompleksitas tersebut ditinjau dari aspek pertumbuhan dan perkembangan tanaman yang dipengaruhi oleh lingkungan tumbuh.

Lingkungan tumbuh merupakan faktor pembatas yang harus dikelola, sehingga tidak mengancam keanekaragaman hayati dan menjamin keamanan pangan secara global. Permintaan pangan semakin hari semakin meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah penduduk, sedang komponen lingkungan tumbuh menjadi ancaman dengan adanya pemanasan bumi. Kondisi ini mengancam produktivitas tanaman yang diakibatkan oleh tanaman yang tercekam atau stress. Tanaman yang stress akan mengalami kerugian pada usaha budidaya, pasokan pangan berkurang dan menjadi masalah serius yang mengancam perekonomian suatu negara.

Iklim merupakan faktor pembatas pertumbuhan dan perkembangan tanaman yang sangat rentan. Dampak pemanasan global mengakibatkan kenaikan suhu, curah hujan tinggi, jumlah hari bertambah saat musim kemarau. Kondisi tersebut dapat memacu perkembangan patogen, sehingga berdampak negatif pada produktivitas dan kemampuan lahan dalam mempertahankan nutrisi. Tanaman secara individu harus memiliki kemampuan beradaptasi secara fisiologi pada perubahan lingkungan, disisi lain kemampuan menghasilkan biomassa akan menurun dan hasil panenpun berkurang. Tanaman yang mengalami tekanan pada lingkungan tumbuh dan metabolismenya secara bersamaan pada waktu yang sama dapat memberikan respon negatif dan positif. Dampak positif dari kombinasi tekanan lingkungan akan mengakibatkan daya adaptasi, namun rentan terhadap stres yang lain (**Gambar 9.1**). Selain itu perubahan iklim mengakibatkan migrasi patogen dan hama, sehingga mempersulit tanaman beradaptasi dari aspek genotipe yang termasuk pada cekaman biotik. Penyebab tanaman mengalami stress terdiri dari dua yakni stress abiotik dan biotik (Manghwar & Zaman, 2024)



Gambar 9.1 Dampak stress lingkungan pada tanaman
 Sumber : Manghwar & Zaman, 2024

9.2 Stress Abiotik

Cekaman atau stress abiotic menjadi perhatian khusus dalam kurun waktu beberapa tahun terakhir ini. Produktifitas tanaman dibatasi oleh factor lingkungan. Tanaman mengalami tekanan akibat faktor lingkungan, dapat dikatakan bahwa kondisi tanaman dalam tekanan/stress abiotic. Dalam beberapa literatur dikatakan bahwa factor lingkungan mempengaruhi produksi tanaman sebanyak 70% dan menurut laporan FAO bahwa sekitar 96,5% lahan lahan pertanian di pedesaan dipengaruhi oleh abiotic (Imran *et al.*, 2021). Ini berarti tekanan

pada tanaman ketika kondisi lingkungan terus berubah. Ada beberapa factor yang memperburuk perkembangan tanaman seperti panas, dingin, kekeringan, genangan, salinitas dan logam berat. Oleh karena itu, umumnya stress abiotik ada dua yakni stress dari lingkungan di atas permukaan tanah, dan media tanam. Berikut ini akan disajikan penjabaran dari stress abiotik:

9.2.1 Unit Panas (*Heat Unit*)

Perubahan iklim secara global menjadi ancaman yang serius dan mengkhawatirkan para ilmuan pertanian terutama ilmu tanaman dan lingkungan. Aktivitas manusia meningkat secara signifikan dan memicu gas rumah kaca (GRK). Gas karbon, metana, dinitrogen oksida dan kloroflour karbon secara bertahap akan meningkatkan suhu udara. Kondisi ini berakibat pada kenaikan suhu bumi. Suhu termasuk salah satu komponen agroklimat yang berperan dalam metabolisme sel dan ketikan suhu berada pada kondisi di atas optimal, maka ada tekanan panas yang dialami oleh tanaman. Stress panas dapat diartikan sebagai peningkatan suhu udara yang berlebihan selama kurun waktu tertentu yang menyebabkan kerusakan sel pada tanaman.

Unit Panas atau *Heat Unit* adalah kombinasi proses yang kompleks antara intensitas cahaya dan laju kenaikan suhu optimal. Konsep heat unit didasarkan pada suhu sebagai energi salah satu indicator pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Suhu udara yang diterima tanaman dan terakumulasi dalam bentuk panas dapat menentukan fase pertumbuhan tanaman, indeks kematangan dan produksi. Tekanan panas di atmosfer tergantung pada frekuensi dan periode panas pada siang dan malam hari (Imran *et al.*, 2021). Panas dapat mengganggu aktivitas sel (homeostasis seluler) yang menghambat pertumbuhan dan kematian. Hal ini mengancam produktivitas tanaman, terutama pada pertumbuhan awal hingga fase produksi dan bahkan merubah pola tanam, terutama di daerah sub tropis. Hasil penelitian memberikan gambaran bahwa suhu yang tinggi dapat memperpendek umur siklus pertumbuhan tanaman serealia, cepat mengalami penuaan dan mengurasi durasi umur panen. Demikian halnya dengan masa transisi bunga tanaman jagung, gandum hanya padi

dapat tolerir sampai suhu optimal, jika suhu semakin tinggi akan terjadi kerusakan saat fase produksi.

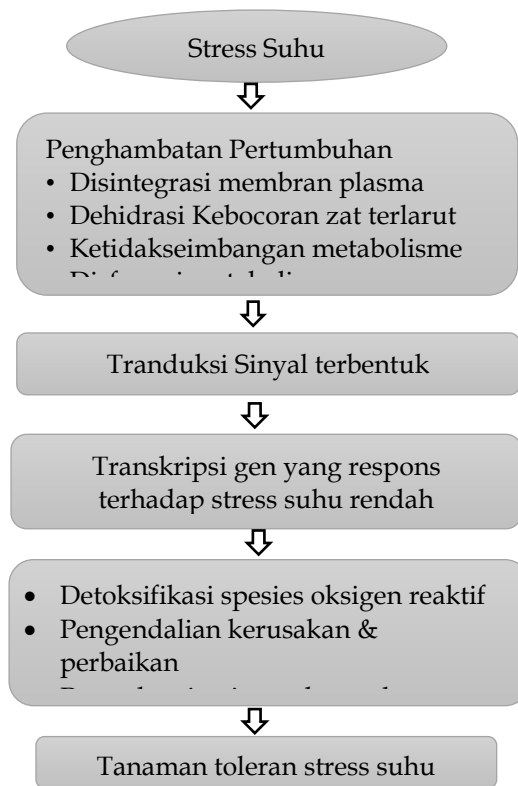
Proses metabolisme tanaman berdasarkan proses fisiologis maupun biokimia secara keseluruhan dipengaruhi oleh suhu tinggi. Setiap tanaman memiliki sensitifitas sendiri dalam merespon suhu tinggi. Suhu normal untuk tanaman pada kisaran 0° - 40° C, sedangkan suhu di atas 40°C, termasuk kategori suhu yang dapat memicu tingkat stress pada tanaman.

Tahapan fase tumbuh setiap tanaman berbeda tergantung pada seberapa besar panas yang diterima oleh tanaman, dan tindakan budidaya yang dilakukan. Penggunaan mulsa berdampak pada akumulasi panas yang diterima oleh tanaman. Penggunaan mulsa plastic hitam perak lebih kecil nilai unit panas (*thermal unit*) yang diterima tanaman sawi hijau, sehingga mempercepat fase pertumbuhan (*Huda et al., 2015*). Tanaman padi pada suhu yang tinggi dari suhu optimal berpengaruh pada karakter jumlah anakan total, jumlah gabah isi per malai, jumlah gabah hampa per malai, penurunan fertilitas (*Jaisyurahman et al., 2020*).

9.2.2 Stress Suhu Rendah

Suhu rendah menjadi factor pembatas pada tanaman dimusim dingin. Kebanyak tanaman pangan yang dikonsumsi oleh manusia seperti padi, jagung, pisang, tomat dan buah tropis sangat sensitif pada kondisi dingin. Menurut *Imran et al (2021)* suhu dingin yang menyebabkan tanaman mengalami tekanan dan mempengaruhi proses metabolisme dibedakan menjadi dua yakni stress beku (*Freezing*) dan stress suhu rendah (*Chilling*). Efek yang terjadi akibat suhu rendah tergantung pada tingkat keparahan dan waktu terpapar.

Kondisi tanaman stress pada suhu rendah berada pada kisaran 0-15°C. Kisaran suhu tersebut tanaman berupaya beradaptasi dan mempertahankan homeostatis sebagai bentuk toleransi terhadap pembekuan (*freezing*) dengan memperlihatkan ekspresi gen dalam metabolisme (**Gambar 9.2**).



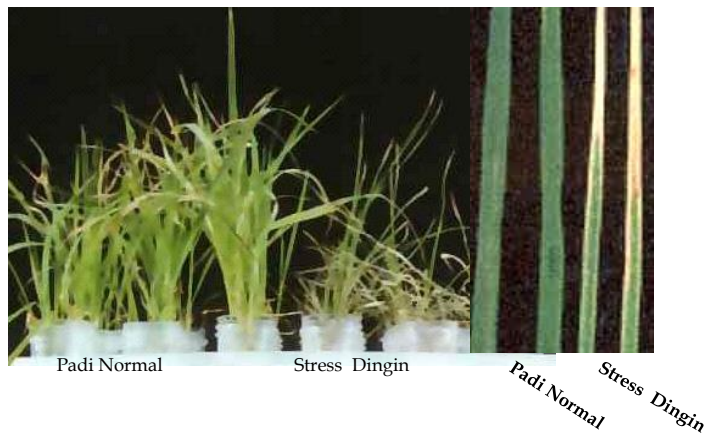
Gambar 9.2 Respon tanaman pada suhu rendah

Sumber: Yadav, 2010

Respon tanaman selama terpapar suhu rendah dengan mekanisme aklimasi. Suhu dingin memperlihatkan pertumbuhan yang terhambat, yang diakibatkan disitegrasi membran plasma. Selain itu akan terjadi dehidrasi dan ketidakseimbangan metabolesme sehingga terjadi disfungsi metabolisme. Setelah itu, ada transduksi sinyal sebagai ekspresi gen. Transkripsi gen yang respon terhadap stress suhu rendah mulai aktif, dengan bentuk tanggapan detoksifikasi spesies oksigen. Tanaman berusaha mengendalikan kerusakan akibat stress suhu rendah dengan cara restrukturisasi membran plasma, mempercepat sintesa osmolit (*osmolytes synthesis*), dan selanjutnya tanaman memperlihatkan toleransinya terhadap kondisi suhu rendah dan beku (Yadav, 2010).

Stress suhu dingin berdampak pada perubahan fisiologi, biokimia dan molekuler. Dampak lebih jauh dari cekaman ini pada kelimpahan dan

ekosistem dari tanaman. Kondisi tanaman yang mengalami stress tanaman mengakibatkan perubahan dan efisiensi fotosintesis, kandungan lipid pada membrane, sehingga menyebabkan kebocoran membrane dan elektrolit (Manasa *et al.*, 2022). Selain itu mekanisme kerusakan yang diakibatkan suhu dingin termasuk perubahan kadar kalsium intraseluler, kerusakan organel fotosintetik, akumulasi prolin, polifenol, gula larut dan memacu aktivitas enzimatik seperti Askorbat Peroksidase (APX), Superoksida Dismutase (SOD), Katalase (CAT). Tanaman yang mengalami stress dingin lebih banyak mengandung lemak tak jenuh dan kadar asam meningkat.



Gambar 9.3 Pengaruh stress suhu rendah tanaman padi
(Sumber: Yadav, 2010)

Setiap tanaman menunjukkan sensitivitas sendiri dalam merespon kondisi suhu rendah. Penampilan fenotip bervariasi tergantung tingkat jenis tanaman dan lama terpapar. Umumnya gejala kerusakan bisa terlihat setelah 48 - 72 jam yang ditandai dengan pertumbuhan daun yang terhambat dan berkurang, layu, klorosis (daun menguning), nekrosis dan mati (Yadav, 2010). Suhu dingin juga mempengaruhi perkembangan dan reproduksi tanaman padi, penghambatan pembungan karena dan kemandulan. Tanaman padi dalam tekanan suhu -20°C selama 12 jam, kemudian ditempatkan pada kondisi normal, menunjukkan performa tumbuh lambat, daun melebar, layu, nekrosis dan mati, dibandingkan dengan padi dalam kondisi normal (**Gambar 9.3**). Demikian halnya

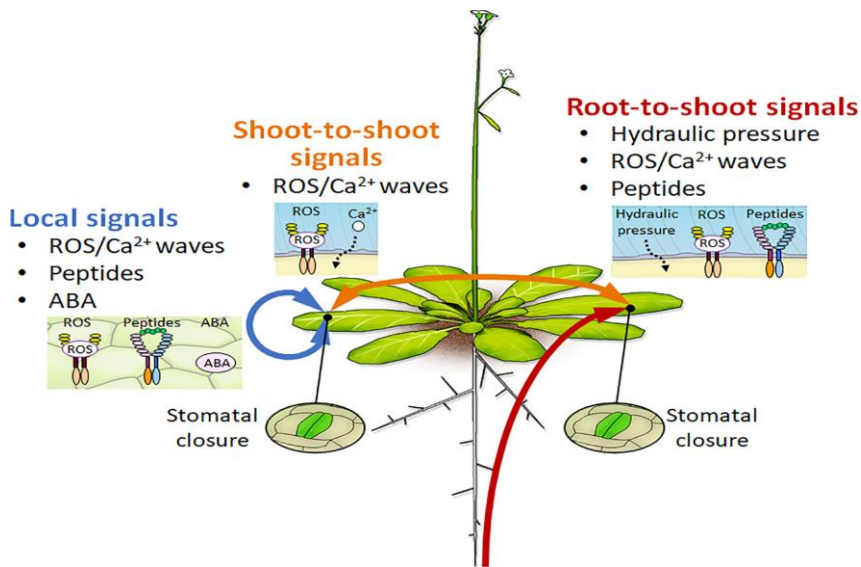
dengan tanaman sereal lainya seperti gandum menunjukkan fenotip perkecambahan terhambat, pembungan terganggu, jumlah anakan sedikit, daun menguning, mandul. Hal ini mengakibatkan produksi tanaman rendah.

9.2.3 Stress Kekeringan

Salah satu makhluk hidup yang tidak memiliki kemampuan berpindah tempat adalah tumbuhan. Kondisi ini juga mengancam pada kelangsungan hidup, terutama menghadapi kondisi kekeringan. Keberadaan media tumbuh dengan keterbatasan air tanah mendorong tanaman melakukan tindakan menghindari dan toleransi.

Respon tanaman dengan terhadap stress kekeringan sangat jelas terlihat pada organ daun. Tanaman itu sendiri akan mengendalikan tekanan media tanaman yang terbatas ketersediaan air akan membangun system pembuluh internal dari daun ke bagian jaringan jaringan lain, yang dijelaskan pada **Gambar 9.4** (Takahashi *et al.*, 2020). Kondisi media tanam yang status potensial airnya menurun merupakan ciri awal tanaman dalam kondisi stress kekeringan dan itu merupakan cara pengendalian internal dari tanaman itu sendiri. Tanaman kekurangan air, akan mengirimkan sinyal atau informasi ke semua organ dengan cepat. Tanaman Lycophytes dan pakis mempertahankan kondisi stress dengan mengatur stomata yang tetap tertutup dan mengakumulasi ABA dengan tujuan mempertahankan stomata tidak terbuka, agar penguapan diminimalisir.

Kekeringan pada areal penanaman menjadi factor pembatas pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Lahan dengan keterbatasan air tanah dapat berdampak pada tekanan pada tanaman budidaya. Tekanan yang terjadi dari ketidakcukupan air dapat mengakibatkan tanaman stress biologi, sehingga metabolisme tanaman terganggu akibat proses fisiologi dan fungsi-fungsi jaringan tanaman tidak normal bekerja. Respon pertama tanaman akibat kekeringan air adalah menutupnya stomata.



Gambar 9.4 Konsep diagram sinyal transmisi dari akar-tunas dan pucuk-tunas sebagai respon stress kekeringan
(Sumber: Takahashi *et al.*, 2020)

Stomata yang mengalami penutupan dapat menghambat proses fotosintesis, karena aliran karbondioksida ke daun berkurang dan pergerakan pati terganggu. Mekanisme tanaman mempertahankan kondisi stress kekeringan, lebih pada upaya mengakumulasi proses metabolic sekunder. Meningkatkan kandungan senyawa yang berperan dalam penyesuaian osmotik sel. Senyawa yang berperan dalam osmotik sel adalah gula dan prolin (Mudhor *et al.*, 2022). Senyawa tersebut berfungsi menjaga tekanan turgor dalam sel, dengan cara menurunkan potensial air dalam sel, tanpa membatasi fungsi enzim. Jadi, salah satu indikator tanaman yang toleran terhadap kekeringan adalah meningkatnya kandungan prolin. Fungsi prolin dapat menyimpan nitrogen, osmoregulator dan penjaga turgor sel, terutama di daerah perakaran, ketika osmotik air rendah atau berkurang.

Tanaman mengalami kondisi yang stress kekeringan berdampak pada pertumbuhan dan perkembangan yang berbeda-beda dan menunjukkan performa morfologi yang tidak sama untuk semua jenis tanaman. Namun, umumnya mulai dari fase perkecambahan, pemanjangan sel, fase pembungaan, mengisian biji. Tanaman mengalami

perubahan tinggi tanaman, biomassa serta komponen hasil. Beberapa hasil penelitian memberikan gambaran bahwa pertumbuhan tanaman terganggu akibat merespon kondisi kekeringan seperti, perkecambahan yang terganggu dan padi tidak tumbuh tegak atau rebah. Jenis tanaman sereal lain seperti kacang, gandum, sorgum mempengaruhi perkecambahan dan pertumbuhan awal pada saat pembibitan.

9.2.4 Stress Genangan

Air menjadi factor pembatas pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Ketersediaan air yang berlebihan di areal penanaman dapat berdampak buruk pada proses fisiologi tanaman. Kelebihan air di zona perakaran mengakibatkan kematian karena menghambat transfer oksigen dan gas lain ke atmosfer. Pertukaran gas tersebut bertujuan untuk mengimbangi fungsi organ dan jaringan terutama pada proses fotosintesis dan respirasi. Status oksigen dalam sel atau jaringan tanaman bervariasi tergantung jenis tanaman dan pasokan oksigen di lingkungan tumbuh (Sairam *et al.*, 2008). Lebih lanjut dijelaskan bahwa tanaman yang mengalami stress genangan disebabkan oleh hambatan difusi gas, sehingga terjadi kejenuhan yang mengakibatkan drainase buruk dan berada di atas kapasitas lapang. Keadaan abiotic seperti banjir menjadi ancaman bagi tumbuhan.

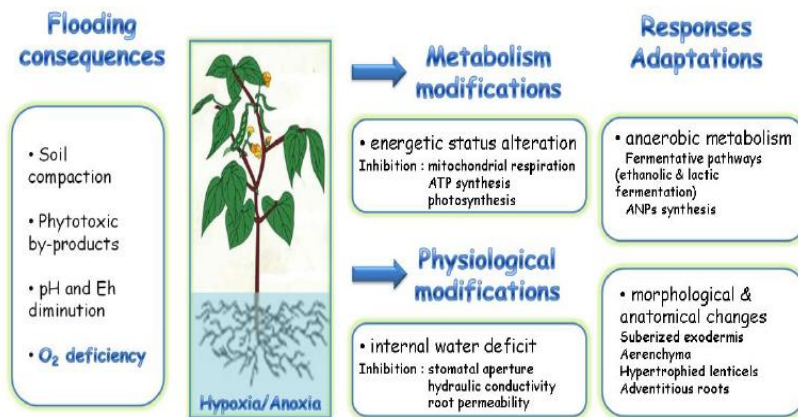
Umumnya gejala tanaman yang stres genangan dapat terlihat 2-4 hari setelah terendam air, karena adanya resistensi yang lebih tinggi dari aliran madda melai akar. Tanaman akan layu karena penghambatan respirasi. Sistem trasport ion di seluaruh areal perakaran terutama di endodermis organ akar. Umumnya stress terjadi di lahan tergenang dan dampak langsung pada organ akar dalam jangka waktu yang pendek (Sairam *et al.*, 2008), dimana bagian akar terendam, tetapi organ tanaman lain berada di atas genangan (udara) di sebut *Hipoksia*. Namun kondisi *hipoksia* juga berlangsung dalam jangka waktu yang lama. Sedangkan stress tanaman tergenang pada jangka waktu yang lama dan semua organ tanaman terendam disebut *Anoksia*. Kondisi genangan yang lama akan mengakibatkan tekanan ganda pada tanaman. Tanah tergenang air dapat memicu mikro flora yang termasuk stress biotik. Mikroorganisme anaerobic dalam kondisi ini akan mengakumulasi bahan-bahan sekitar

perakaran sehingga terjadi reduksi ion dan mineral seperti nitrit yang menyebabkan toksis.

Respon tanaman pada kondisi stress genangan dengan cara memproduksi senyawa metabolic sekunder. Pada kondisi hipoksia etilen terakumulasi di area perakaran di bagian organ yang terendam air dengan konsentrasi 10 cm^3 yang telah dilaporkan oleh penelitian yang dilakukan oleh Musgrave *et al.* (1972) dalam Sairam *et al.*, (2008). Etilen diproduksi dengan dua jalur. Pertama, proses difusi etilen dari akar ke dalam air, yang terjadi 10 kali lebih lambat dibandingkan dengan berdifusi ke udara. Pelepasan etilen melalui saluran Aerenkim Internal dari akar. Kedua, sistesis etilen meningkat pada akar hipoksia dan tunas aerobic. Prekursur dari pembentukan senyawa etilin adalah 1-amino siklopropana 1-asam karboksilat (ACC), yang disintesa di akar. ACC ditranslokasikan dari akar yang anaerobic ke bagian organ aerobic yang berada pada di atas permukaan air genangan. Hormon asam absisat (ABA) juga memiliki peran dalam kondisi stress, karena berfungsi mengatur stomata dengan cara menyesuaikan ukuran sel penjaga. Auxin (IAA) juga terakumulasi setelah tanaman tergenang, karena auxin berperan pada biosintesis etilen dan selanjutnya merangsang tranportasi IAA ke organ tanaman yang tergenang. Hasil penelitian menjelaskan bahwa kandungan gibberalin meningkat pada galur kacang anah yang toleran stress genangan dan penyemprotan gibberalin pada daun dapat mendorong pertumbuhan bagian atas tanaman yang tidak tergenang. Sebaliknya tanaman timun sangat sensitive terhadap genangan, dimana kandungan hormone Asam Jasmonic (JA) yang ada di hipokotil menurun selama tanaman tergenang, sehingga dapat disimpulkan bahwa JA berkorelasi negatif dengan stress genangan. Namun, pada tanaman kedelai, JA mengurangi tingkat kerusakan tanaman kedelai yang tergenang dan mendorong pertumbuhan tanaman (Pan *et al.*, 2021).

Adaptasi tanaman pada kondisi genangan dengan memodifikasi organ morfologi terutama pada akar. Akar akan membentuk akar petualang (ARs) dan jaringan aerasi lainnya, terjadi pemanjangan sel meristem dan pembentukan udara di kutikula, serta menghambat kehilangan oksigen radial. Ars berfungsi mendorong pertukaran gas dan penyerapan air serta nutrisi.

Pertumbuhan dan perkembangan tanaman pada kondisi tergenagn sangat kompleks dan berbeda tanggapannya dari setiap tanaman. Strategi adaptasi dapat dikaji berdasarkan tanggapan morfologi, struktur, fisiologi, pengaturan sinyal genetic dan metabolin sekunder, Teknik budidaya pada kondisi lingkungan tumbuh seperti ini harus dilakukan dengan pendekatan kerusakan yang terjadi akibat stress genangan. Gambaran umum respon tanaman pada kondisi genangan disajikan pada **Gambar 9.5** (Parent *et al.*, 2008).



Gambar 9.5 Gejala di areal perakaran pada kondisi genangan dengan modifikasi metabolisme dan fisiologi sebagai respon adaptif (Sumber: Parent *et al.*, 2008)

9.2.5 Stress Salinitas

Salinitas tanah adalah kadar air tanah dengan kandungan garam tinggi mengakibatkan system drainase yang buruk. Pertumbuhan dan perkembangan tanaman terganggu metabolismenya. Ketersedian air tanah yang tercampur dengan garam dengan konsentrasi $NaCl > 200$ mM sudah menjadi zat terlarut yang bersifat racun (Meriem, 2020). Areal penanaman dengan kondisi garam yang terlarut dalam tanah seperti ini dapat menurunkan penyerapan air oleh akar, sehingga produksipun rendah karena penuaan lebih cepat, luas daun kecil dan gugur.

Daya rusak sangat signifikan pada tanaman yang berada pada kondisi stres salin. Oleh karena itu sangat penting memahami pengaruh salinitas terhadap metabolisme tanaman dari aspek morfologi, fisiologi,

sifat biokimia dan bagaimana ekspresi gen pada stress salin. Kondisi stress salin mengakibatkan kemampuan tanaman kesulitan menyerap air tanah. Hal ini terjadi karena air potensial adanya pengaruh tekanan osmotik, dimana terjadi penurunan menyerapan air potensial yang ada pada media tanam. Dalam kondisi seperti ini, tanaman akan merespon dengan berbagai ekspresi dari beberapa aspek yang telah disampaikan sebelumnya. Ekspresi tanaman dalam merespon stress salin pada tingkat makroskopis dari perubahan morfologi yaitu dengan memperluas sel pada akar dan tunas.

Tanaman akan merespon kondisi stress salinitas dengan beberapa mekanisme adaptasi (Munns & Tester 2008), sebagai berikut :

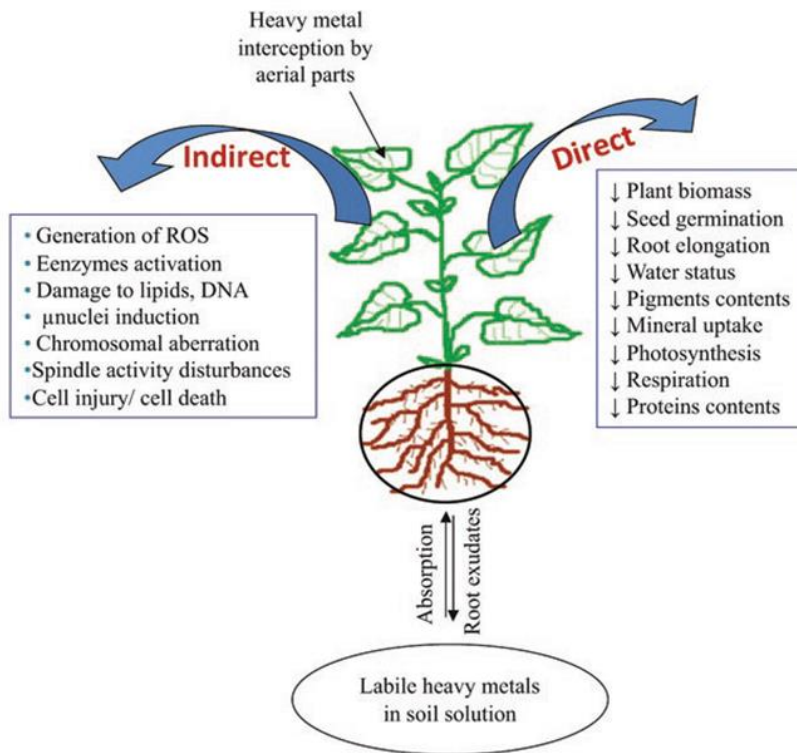
1. Toleransi terhadap tekanan osmotik; Tekanan osmotik menyebabkan pembesaran sel terutama pada ujung akar dan daun muda, dan konduktansi stomata yang lebih besar. Respon ini sangat menguntungkan Ketika tanaman dalam kondisi ketersediaan air tanah yang normal. Namun, pada kondisi tanah yang stress salin menyebabkan produksi tanaman rendah karena sehingga kebutuhan air tidak tersedia. Dampak buruk terjadi pada tanaman sereal saat pengisian biji dan bahkan pembentukan biji tidak sempurna.
2. Na^+ dari helaian daun; Na^+ di akar tidak terakumulasi dan menjadi racun yang tersimpan di helaian daun. Kerusakan ini terjadi dalam beberapa hari bahkan berminggu-minggu dan akhirnya mengalami kematian pada daun.
3. Toleransi pada jaringan tanaman; Akumulasi Na^+ pada jaringan dan sebagian menjadi Cl^- dan ini merupakan upaya mempertahankan diri pada kondisi cekaman salin. Toleransi ini juga bagian dari menghindari konsentrasi yang mengakibatkan keracunan pada sitoplasma, terutama sel mesofil di daun.

Tanaman dalam kondisi stress salinitas akan memperlihatkan adaptasi fisiologis dengan memproduksi senyawa terlarut. Senyawa tersebut sebagai penciri khusus yang disebut senyawa osmoregulator. Tanaman menghasilkan senyawa metabolik sekunder yakni *prolin*. Kandungan prolin cenderung tinggi di bagian akar, dan ini membantu serapan N. Selain itu ada senyawa lain yang bersifat merusak system membran sel dan mengganggu metabolisme dan DNA yakni Reactive Oxygen Species/ROS (Meriem, 2020).

9.2.6 Stress Logam Berat

Logam berat adalah suatu unsur yang memiliki satu atau lebih gugus hidroksil yang membentuk senyawa dengan berat jenis yang tinggi. Nampak fisik logam berat yakni berkilau dan penghantar panas serta listrik. Logam berat terbentuk dari komponen kimia dalam tanah dan kandungannya tergantung dari kandungan mineral bahan induk pembentuk tanah. Indikasi keberadaan logam yang ada dalam tanah, menunjukkan bahwa tanah tersebut tercemar. Aktivitas manusia dalam sektor industri penyumbang terbesar cemaran logam berat dan ini mengancam metabolisme tanaman maupun makhluk hidup lain. Pembuangan limbah industri, penggunaan pestisida dan pupuk berlebihan, pembuangan limbah industri dapat membahayakan cemaran lahan. Logam berat yang berpengaruh negatif di areal pertanian adalah timbal (Pb), krom (Cr), tembaga (Cu), seng (Zn), kadmium (Cd) dan merkuri (Hg).

Proses fisiologi sangat berperan dalam mengakumulasi logam berat dalam tanah. Kontak awal terjadi pada zona perakaran, dengan proses serapan unsur-unsur, mulai dari yang bisa diserap maupun yang tidak bisa diserap secara langsung. Kemampuan tanaman berbeda dalam merespon logam berat. Penyerapan logam berat di akar tergantung pada permeabilitas dan transpirasi tekanan akar (Hidayanti, 2016). Mekanisme serapan logam ke akar terjadi secara langsung dengan cara diadsorpsi (**Gambar 9.6**). Setelah itu ada pengikatan pada gugus karboksil golongan asam uronic di sekitar perakaran atau langsung ke permukaan sel *Rhizodermis* yang mengandung polisakarida. Proses yang terlibat meliputi desorpsi logam dari partikel tanah, pengangkutan logam menuju akar, serapan logam oleh akar dan translokasi ke bagian lain sampai ke pucuk tanaman (Shahid *et al.*, 2015).



Gambar 9.6 Mekanisme serapan logam oleh akar dan efek kerusakan yang dapat menurunkan produksi tanaman (Sumber: Shahid *et al.*, 2015)

Tanah yang tercemar logam berat tentunya dapat diatasi dengan pendekatan ekologi. Ada beberapa solusi yang dianjurkan dalam mengurangi kandungan logam berat dalam tanah. Namun dalam memulihkan tanah tercemar membutuhkan waktu dan biaya yang cukup besar. Cara praktis dan berkelanjutan dalam memulihkan tanah tercemar logam berat yaitu penambahan bahan organik, vegetasi tanaman dan pemberian bakteri.

1. Penambahan Bahan Organik ; Kompos termasuk bahan organik yang berfungsi mengembalikan kesuburan tanah, mengikat air tanah, memperbaiki struktur tanah dan mengaktifkan mikroba tanah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemberian kompos 125 - 752 g per polybag tanah bekas tambang Nikel pada pembibitan tanaman sengon dapat meningkatkan pH tanah, Kapasitas Tukar Kation

(KTK), N-total, P-tersedia dan K-tersedia. Pupuk kandang dari kotoran sapi, juga dapat memulihkan lahan bekas tambang yang mengandung logam berat. Pemberian pupuk kandang sapi 150 g/10 kg tanah bekas tambang yang ditanami pohon mahoni dapat memperbaiki struktur tanah. Pupuk bokashi berbahan baku ampas tahu menurunkan konsentrasi nikel dari 87 ppm menjadi 52 ppm,

2. Vegetasi; Tanaman; Tumbuhan yang dapat merubah logam di perakaran dalam bentuk terlarut dan tersedia disebut tumbuhan *Hiperakumulator*. Tanaman Hanjuang dan *Solanum nigrum* dapat menyerat Cadmium dengan mekanisme penyerapan *fitostabilisasi* (Sari *et al.*, 2019). *Thlaspi caerulescens*, *Ipomoea batatas*, *Sesbania drummondii* dapat menyerap Zn. Hiperakumulator yang dapat menyerap Pb adalah *Najas indica*, *Medicago sativa*, *Sesbania drummondii*. Tanah yang mengandung Nike (Ni) dapat dipulihkan cemarannya dengan menanam tanaman *Medicago sativa*, *Sesbania drummondii* (Shahid *et al.*, 2015). Lebih lanjut disebutkan juga bahwa tanaman *Ipomoea batatas*, *Fontinalis antipyretica* juga dapat menyerap logam Cu.
3. Pemberian Bakteri ; Pencemaran logam Pb dari air lindi yang tercemar di tanah dapat dikurangi dengan memberikan bakteri *Bacillus* yang termasuk mikroba local. Selain itu mikroba lain adalah *Pseudomonas*. *Bacillus* juga berperan dalam penyerapan Pb (Sari & Sulistiani, 2017).

9.3 Stress Biotik

Stress biotik adalah kondisi tanaman mengalami tekanan pertumbuhan yang disebabkan oleh organisme hidup. Organisme hidup jamur, virus, bakteri, nematoda, serangga dan bahkan tanaman. Dalam konteks stress biotik ini organisme hidup tersebut di sebut *Agen*. Agen ini menyebabkan tanaman terinfeksi berbagai penyakit dan merusak organ tanaman sehingga mempengaruhi produksi tanaman yang dibudidayakan. Tanaman sendiri mampu mengendalikan dirinya dengan mekanisme pertahanan tubuh saat kondisi ekstrim. Salah satu pertahanan yang efektif pada tanaman dengan mekanisme adaptasi fisiologis maupun genetik. Pengaruh microbiota dapat bersifat negative maupun positif. Dalam konteks ini stress biotik hanya mengulas tentang kerugian yang ditimbulkan akibat stress biotik.

Tanaman yang berinteraksi dengan mikroba terinduksi sehingga terjadi infeksi sekunder oleh agen (patogen). Hal ini mengakibatkan tanaman membentuk pertahanan dengan memproduksi metabolic persinyalan sistemik dengan berat molekul yang rendah terutama tanaman dikotil (Dresselhaus & Huckelhoven, 2019). Jamur menyebabkan banyak kerusakan pada tanaman sebagai agen penyakit. Beberapa jamur yang umumnya sebagai patogen :

1. Genus *Alternaria Sp* ; Jamur yang menyerang tanaman Cabai terutama pada benih dan menulur pada organ lainnya.
2. *Anthracnose/dieback/fruit rot (Colletotrichum spp.)* ; Penyebab busuk buah pada tanaman sayuran dan tanaman berbuah lainnya, terutama di daerah tropis.
3. *Aspergillus spp.* ; Jamur ini menyerang tanaman di lapangan maupun saat pascapanen. *Aspergillus flavus*, *A. niger*, *A. fumigates* ditemukan di buah dan sayur dan tanaman perkebunan.

Virus termasuk patogen yang menyerang tanaman. Gejala serangannya bervariasi tergantung jenis virus dan tanaman yang terserang, serta organ yang terinfeksi. Tanaman yang dalam kondisi ini menyebabkan stress yang dapat menurunkan produktivitas. Gejala serangan virus ditandai dengan warna daun menguning, berbintik bitnik dan tanaman kerdil. Beberapa jenis virus yang menyerang tanaman budidaya (Huseynova *et al.*, 2014).

1. Cucumber Mozaic Virus (CMV) ; Virus yang menyerang hampir sebagian besar tanaman sayur, terutama mentimun yang ditularkan oleh Kutu Aphid.
2. Tomato Mosaic Virus ; Virus ini menyerang tanaman tembakau dan tomat (TMV dan ToMV). Tanaman terinfeksi dengangejala daun tomat berbintik dan berwarna kekuningan dan menebal diarea yang terinfeksi. Jika terserang daun muda akan mengerut, sedangkan di buah ada bercak kuning dan nekrotik.
3. Melon Necrotic Spot Virus ; Virus ini menyerang melon (MNSV) dan hamper semua famili Cucurbitacea tertular. Virus ini bisa tertular secara mekanis oleh jamur *Olpidium bornovanus* dari biji. Gejalanya bercak nekrotik pada daun dan batang. Pengendalian virus ini hanya dengan menanam benih yang tahan virus.

Stress biotik pada tanaman juga disebabkan oleh serangga dan nematoda yang dapat merusak organ tanaman. Umumnya hama yang merusak organ tanaman mengakibatkan stress karena kerusakan. Fenomena biologis pada tanaman yang mengeluarkan zat biokimia yang dapat mempengaruhi kelangsungan hidup tanaman lain juga dapat digolongkan sebagai sumber stress pada tanaman. Zat biokimia yang keluar dari tanaman yang bersifat negative dan berdampak penurunan produksi tanaman yang dikenal dengan istilah Alelopati juga termasuk dalam sumber stress biotik.

Upaya yang dilakukan dalam meminimalisir kerugian yang ditimbulkan akibat stress biotik adalah menggunakan bahan tanam atau varietas yang tahan terhadap serangan patogen, mengatur pola tanam dan menerapkan Teknik budidaya yang sesuai dengan pedoman budidaya.

Bab 10

BIOTEKNOLOGI TUMBUHAN

10.1 Pengertian Bioteknologi

38 Istilah Bioteknologi pertama kali diperkenalkan oleh Karl Ereky, seorang insinyur Hongaria pada tahun 1919. Sejarah perkembangan bioteknologi dapat ditelusuri kembali pada zaman prasejarah, yaitu penggunaan mikroorganisme untuk proses seperti fermentasi, pembentukan yoghurt dan keju dari susu, cuka dari molase, produksi butanol dan aseton dari pati oleh *Clostridium acetobutylicum* atau produksi antibiotik seperti penisilin dari *Penicillium notatum*. Bioteknologi mulai berkembang pesat pada tahun 1970-an, yaitu dengan diperkenalkannya penemuan enzim restriksi yang mampu mengembangkan berbagai teknologi gen, sehingga hal tersebut dianggap sebagai revolusi ilmiah terbesar (Chawla, 2009).

Bioteknologi berasal dari kata “bio” dan “teknologi”. Bio berarti kehidupan dan teknologi berarti penerapan ilmu pengetahuan, yaitu penerapan penggunaan organisme hidup untuk membuat atau meningkatkan suatu produk (Pravara, 2024). Lebih lanjut Ambali (2024) memaparkan bahwa bioteknologi merupakan kumpulan teknik yang memanfaatkan sistem biologis atau turunannya untuk membuat, memperbaiki atau memodifikasi tanaman, hewan dan mikroorganisme untuk penggunaan tertentu. Beberapa pengertian lain dari bioteknologi diantaranya (Pravara, 2024) :

- Penggunaan organisme hidup untuk memecahkan masalah atau membuat produk yang berguna
- Penggunaan sel dan molekul biologis untuk memecahkan masalah atau membuat manfaat produk. Molekul biologis yang digunakan termasuk DNA, RNA dan protein

- Penerapan organisme hidup atau produknya secara komersial, melibatkan manipulasi yang disengaja terhadap molekul DNA
- Membuat sel hidup untuk melakukan fungsi tertentu dengan cara yang dapat diprediksi dan dikendalikan

Berdasarkan perkembangannya bioteknologi dibagi ke dalam bioteknologi konvensional dan modern. Caswell *et al.* (1998) melaporkan bahwa bioteknologi konvensional dapat didefinisikan sebagai pemanfaatan organisme hidup untuk memecahkan masalah atau membuat produk yang bermanfaat. Definisi ini mencakup metode pemuliaan tanaman dan hewan secara tradisional, dan bioproses, seperti fermentasi. Sedangkan bioteknologi modern merupakan penerapan seluler dan biologi molekuler untuk memenuhi kebutuhan manusia, definisi ini mencakup penggunaan antibodi monoklonal, kultur sel, biosensor, dan teknologi rekayasa genetik. Tahapan perkembangan bioteknologi berdasarkan Pravara (2024) disajikan pada **Tabel 10.1**.

Tabel 10.1 Tahapan perkembangan bioteknologi

| Tahapan | Tahun |
|--|--------------------|
| Bioteknologi Kuno (Sejarah awal yang berkaitan dengan makanan dan tempat tinggal; termasuk domestikasi) | 8000 – 4000 SM |
| Bioteknologi Klasik (Dibangun berdasarkan bioteknologi kuno; fermentasi dalam mendorong produksi pangan dan obat) | 2000 SM, 1800 1900 |
| Genetika | 1900 - 1953 |
| Penelitian DNA, perkembangan pesat sains | 1953 - 1976 |
| Bioteknologi Modern | 1977 |

(Sumber : Pravara, 2024)

Bioteknologi tumbuhan merupakan serangkaian teknik yang digunakan untuk mengadaptasi tanaman untuk kebutuhan atau peluang tertentu dengan hasil yang lebih tinggi. Bioteknologi tumbuhan yang

bekaitan dengan pengembangan varietas dan sifat baru mencakup genetika dan genomik, seleksi dengan bantuan penanda (*Marker Assisted Selection* - MAS), dan tanaman transgenik (rekayasa genetika) (USDA, 2024).

15 Bioteknologi tumbuhan secara umum bertujuan untuk menghasilkan varietas tanaman dengan produksi tinggi, mempunyai kandungan nutrisi yang lengkap, tahan terhadap hama dan penyakit, dan tidak tergantung banyak pada pemberian pupuk serta bahan kimia lain. Metode konvensional yang dilakukan adalah persilangan dan seleksi. 15 Bioteknologi tanaman modern menggunakan metode kultur jaringan untuk memperbanyak mikro dalam skala besar, pembentukan tanaman homosigot, dan tanaman baru. Selain itu juga digunakan metode rekayasa genetika untuk menghasilkan tanaman dengan gen dari dua individu yang berkerabat jauh (Kuswandi, 2015).

10.2 Kultur Jaringan

Kultur jaringan tanaman merupakan ilmu menumbuhkan sel tanaman, jaringan atau organ yang diisolasi dari tanaman induk, pada media buatan (George *et al.*, 2008), dengan kondisi aseptik dan di bawah lingkungan yang terkendali (Ashar *et al.*, 2024). Teknologi kultur jaringan telah banyak dikembangkan untuk memperbanyak tanaman dalam skala besar. Keunggulan bahan tanaman kultur jaringan menurut (Kumar *et al.*, 2015) yaitu :

- a. Sesuai dengan jenis tanaman induk yang dikelola dengan baik.
- b. Menghasilkan bibit dengan berkualitas yang bebas dari virus, jamur, bakteri dan pathogen
- c. Pertumbuhan tanaman seragam dan dapat meningkatkan hasil
- d. Rotasi tanaman yang lebih singkat dengan biaya penanaman yang minimum, penggunaan lahan yang maksimal
- e. Varietas baru dapat diperbanyak dalam waktu yang singkat
- f. Penanaman dapat dilakukan sepanjang tahun setelah bibit tersedia
- g. Merupakan cara yang cepat untuk memproduksi tanaman
- h. Homogenitas dalam pertumbuhan tanaman serta waktu berbunga dan berbuah
- i. Difusi varietas unggul lebih cepat

- j. Kemudahan pemindahan bibit dan ketersediaannya secara menyeluruh sepanjang tahun.

Selain penggunaannya untuk penelitian, teknik kultur jaringan tanaman dalam beberapa tahun terakhir, menjadi perhatian utama untuk kepentingan industri di bidang perbanyakan tanaman, pemberantasan penyakit tanaman, perbaikan tanaman dan produksi metabolisme sekunder. Ada beberapa aspek penting dari kultur jaringan, yaitu : (a) kondisi aseptik (b) aerasi (c) peralatan dan (d) nutrisi media (Singh & Kumar, 2020).

a) Kondisi Aseptik

Kultur jaringan harus dilakukan dengan kondisi aseptik. Panas kering digunakan untuk mensterilkan peralatannya dalam inkubator. Sterilisasi panas basah dilakukan dalam autoklaf pada suhu 120°C pada tekanan 15 lb selama 15 menit. Untuk cairan media yang tidak stabil pada suhu tinggi disterilkan dengan ultrafiltrasi. Bahan kimia, seperti alkohol digunakan untuk mensterilkan area kerja dan peralatannya.

Jaringan tanaman yang digunakan untuk pembiakan, permukaannya disterilkan secara kimia dengan beberapa bahan sterilisasi yang umum digunakan, misalnya: 9-10% kalsium hipoklorit, 2% larutan natrium hipoklorit, 10-12% hidrogen peroksida, dan 1-2% air bromin.

b) Aerasi

Aerasi yang tepat pada jaringan dalam media kultur sangatlah penting. Jaringan-jaringan yang dikulturkan pada media semi padat tidak memerlukan metode khusus untuk aerasi. Tetapi pada jaringan yang dikultur dalam media cair memerlukan alat khusus untuk aerasi.

c) Peralatan

Peralatan gelas yang digunakan untuk kultur jaringan harus dari gelas borosilikat (gelas pyrex), karena soda kaca dapat menghambat pertumbuhan jaringan.

d) Nutrisi Media

Media kultur jaringan tanaman harus mengandung semua nutrisi yang dibutuhkan untuk pertumbuhan dan perkembangan normal tanaman. Hal ini terkait dengan ketersediaan dari unsur makro, unsur mikro, vitamin, dan komponen organik lainnya dalam media kultur. pH media juga merupakan hal yang penting dalam mempengaruhi pertumbuhan tanaman dan aktivitas zat pengatur tumbuh. Besaran pH

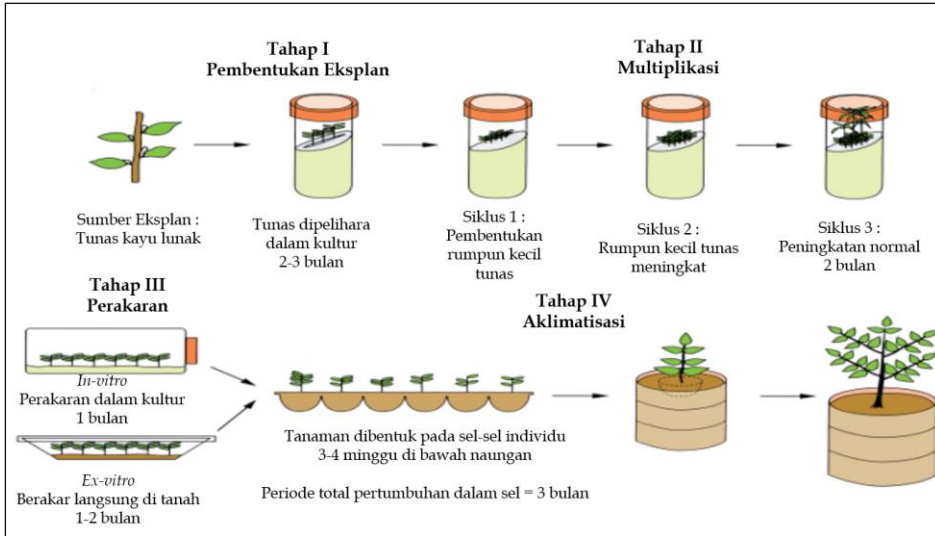
disesuaikan dengan nilai antara 5,4 – 5,8. Media padat dan cair keduanya dapat digunakan untuk kultur. Komposisi media, khususnya hormon tanaman dan sumber nitrogen memiliki efek yang besar pada eksplan awal.

18 Eksplan merupakan istilah untuk bahan tanam awal yang digunakan dalam kultur jaringan. Eksplan dapat berupa sel (kultur sel), protoplas (kultur protoplas), epidermis, empulur (kultur jaringan), meristem apikal atau lateral (kultur meristem), tunas apikal maupun lateral (kultur tunas), serta irisan batang, daun maupun akar (kultur organ) (Dwiyani, 2015). Menurut Ashar *et al.*, (2024), walaupun istilah yang digunakan adalah kultur jaringan, namun sesungguhnya yang dikulturkan tidak hanya dari jaringan, namun juga digunakan bagian lain dari tanaman, sehingga lebih umum digunakan istilah kultur *in-vitro*. Teknik kultur *in-vitro* merupakan dasar untuk melakukan perbanyakan mikro, yang dikenal sebagai mikropropagasi.

Tanaman yang diperbanyak secara mikro mampu berkembang lebih cepat, tumbuh lebih banyak, kuat dan lebih tinggi, siklus produksi yang lebih seragam, dan menghasilkan hasil yang lebih tinggi dibandingkan dengan cara konvensional (Singh & Kumar 2020). Tahapan kultur jaringan yaitu: inisiasi/pembentukan eksplan, multiplikasi, perakaran, dan aklimatisasi. Tahapan kultur jaringan secara lengkap disajikan pada **Gambar 10.1**. Kemudian contoh perkembangan kultur jaringan tanaman disajikan pada **Gambar 10.2**.

a) Tahap I : Inisiasi

Tahap inisiasi merupakan tahapan untuk menginduksi tanaman baru dari eksplan. Eksplan yang dapat digunakan bisa berupa daun, tunas, kotiledon, dan biji. Inisiasi merupakan tahap awal kultur jaringan yang bertujuan untuk mendapatkan eksplan yang bebas dari mikroorganisme serta inisiasi pertumbuhan baru. Pada tahap inisiasi, permukaan eksplan disterilkan permukaannya dan dipindahkan ke dalam media yang bernutrisi (lebih baik jika mengaplikasikan gabungan bakterisida dan fungisida). Permukaan eksplan disterilisasi dalam larutan kimia merupakan langkah penting untuk menghilangkan kontaminan yang dapat menyebabkan kerusakan pada sel.



Gambar 10.1 Tahapan kultur jaringan
(Sumber: Singh & Kumar, 2020)

b) Tahap II : Multiplikasi

Tahap multiplikasi merupakan penambahan jumlah propagul di mana jumlah propagul dikalikan dengan subkultur berulang sampai jumlah tanaman yang diinginkan tercapai. Tunas-tunas yang tumbuh dari hasil induksi diperbanyak dengan cara memotong setiap ruas dan menanamnya pada media kultur.

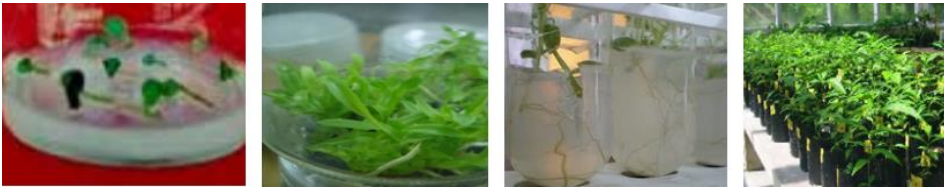
c) Tahap III : Perakaran

Tahap perakaran bertujuan untuk pembentukan akar dan pembentukan plantlet yang mandiri serta pucuk tanaman yang cukup kuat hingga dapat bertahan hidup sampai saat dipindahkan dari lingkungan in-vitro ke lingkungan alamiahnya. Tunas-tunas hasil multiplikasi yang belum mempunyai akar dipindahkan ke media yang mengandung lebih banyak auksin.

d) Tahap IV : Aklimatisasi

Tanaman hasil kultur jaringan tidak dapat ditanam langsung di lapang, namun memerlukan proses adaptasi bertahap terhadap lingkungan barunya yang disebut dengan aklimatisasi (Dwiyani, 2015). Aklimatisasi merupakan tahap akhir dari kultur jaringan. Aklimatisasi adalah proses penyesuaian suatu organisme untuk beradaptasi pada lingkungan yang baru. Proses aklimatisasi sangat penting karena akan

menentukan apakah tanaman yang berasal dari *in-vitro* dapat beradaptasi atau tidak pada kondisi *in-vivo* (Nursyamsi, 2010).



Gambar 10.2 Contoh kultur jaringan tanaman
(Sumber: Nursyamsi, 2010).

10.3 Rekayasa Genetika

Rekayasa genetika merupakan modifikasi genetik yang memerlukan penggunaan teknologi rekombinan asam deoksiribonukleat (rDNA) untuk membuat perubahan yang ditargetkan pada sekuens gen tumbuhan atau hewan untuk mencapai hasil tertentu (Yali, 2022). Informasi genetik dari suatu tumbuhan atau organisme dapat diperoleh dari beberapa sampel yang mewakili dan selanjutnya dianalisis di Laboratorium menggunakan teknik analisis tertentu sesuai dengan tujuan yang diinginkan.

Proses pengambilan sampel dari lapangan merupakan pengambilan bagian tumbuhan target (organ tumbuhan: daun, akar, atau kulit batang) dari tumbuhan atau individu untuk dilakukan uji genetik di laboratorium. Sebagai contoh sampel penelitian yang digunakan dalam bidang kehutanan adalah bagian dari pohon dan anaknya, yakni terdiri atas bagian daun, batang (kayu), kulit dan akar

Rekayasa genetika merupakan istilah yang digunakan untuk kajian molekuler pada tingkat DNA untuk memanipulasi gen, yang umumnya dilakukan di luar proses reproduksi alamiah suatu mikroorganisme. Hal ini meliputi isolasi, manipulasi, dan pemasukan kembali DNA hasil rekayasa ke dalam sel atau organisme model (Mulyono, 2010).

Tujuan dari rekayasa genetika diantaranya adalah untuk: (a) menghasilkan suatu protein tertentu sesuai yang diinginkan, (b) mengenalkan/memasukkan suatu karakteristik baru secara fisiologi pada organisme tertentu, misalnya : tanaman tahan hama, dan buah yang tahan

busuk, (c) untuk memperkenalkan fungsi-fungsi baru pada materi genetik yang ditemukan pada organisme, seperti transfer, replikasi, atau koreksi gen. Misalnya melalui rekayasa genetika, suatu tanaman dapat dibuat toleran terhadap garam. Secara genetik tanaman yang dimodifikasi kemudian dapat dibudidayakan di tanah dengan kandungan garam yang tinggi.

Produk dari rekayasa genetik atau secara luas disebut transgenik yang dalam istilah internasional disebut sebagai *Genetic Modified Organism* (GMO) menjadi salah satu terobosan penerapan bioteknologi untuk memacu produksi. Tanaman GM generasi pertama didasarkan pada penyisipan gen tunggal dari bakteri atau virus untuk menghasilkan gen dengan sifat-sifat agronomi yang baru, seperti ketahanan terhadap herbisida, serangga, dan virus (Wang *et al.*, 2017).

Yali (2022) melaporkan bahwa langkah-langkah dasar dalam rekayasa genetika adalah sebagai berikut :

- 1) Isolasi gen yang akan diklon (DNA target).
- 2) Gen tersebut dimasukkan ke dalam potongan DNA lain yang disebut sebuah vektor, yang memungkinkannya untuk diambil dan disalin oleh sel penerima.
- 3) Infeksi sel organisme penerima dengan vektor rekombinan, baik melalui transfeksi atau infeksi virus
- 4) Mengidentifikasi sel yang berisi vektor rekombinan yang sesuai
- 5) Perubahan pertumbuhan organisme.
- 6) Ekspresi gen untuk menghasilkan hasil yang diinginkan

10.4 *Marker Assisted Selection* (MAS) / Seleksi dengan Penanda

Henkrar dan Udupa (2020) melaporkan bahwa kapasitas penanda DNA untuk mendeteksi variasi alel dalam gen dan sifat-sifat yang mendasarinya memberikan harapan besar untuk pemuliaan tanaman. Dengan menggunakan penanda DNA untuk membantu pemuliaan tanaman, maka efisiensi dan ketepatan bisa lebih ditingkatkan. Pemanfaatan penanda DNA dalam pemuliaan tanaman dikenal dengan istilah *marker assisted selection* (MAS).

Pemanfaatan markah DNA sebagai alat bantu seleksi *marker assisted selection* lebih menguntungkan dibandingkan dengan seleksi

secara fenotipik (Azrai, 2005). MAS merupakan salah satu cara yang digunakan di perusahaan pemuliaan dan lembaga penelitian untuk mengembangkan varietas unggul secara cepat, sehingga memberikan kemungkinan untuk memilih sifat-sifat yang diinginkan secara langsung dengan menggunakan penanda DNA. Menurut Finkeldey (2005), langkah-langkah yang harus dilakukan di laboratorium untuk pengamatan penanda DNA berdasarkan PCR (*Polymerase Chain Reaction*) adalah sebagai berikut :

- Isolasi DNA dari jaringan tumbuhan. DNA dapat diisolasi baik dari jaringan hidup ataupun jaringan yang sudah mati, dan bahkan isolasi telah dilakukan dengan sukses dari material herbarium dan fosil
- Pengenceran DNA untuk PCR
- Pelaksanaan PCR dengan sembarang primer atau primer spesifik
- Elektroforesis dari potongan PCR pada berbagai media tergantung dari jenis penanda atau peralatan laboratorium
- Visualisasi dari pola pita dengan berbagai prosedur meliputi labeling secara radioaktif, pewarnaan fluorescent, pewarnaan dengan perak dan pewarnaan menggunakan *ethidium bromide*

10.4.1 Isolasi DNA Jaringan Tumbuhan

44 Isolasi DNA merupakan metode dalam pemisahan DNA dari bahan-bahan yang tidak diperlukan. Metode isolasi DNA terdiri atas metode berdasarkan CTAB (*Cetyl Trimethyl Ammonium Bromide*) (Murray & Thompson 1980; Doyle & Doyle 1990), dan metode Kit, misalnya DNeasy Plant Mini Kit. Umumnya, metode CTAB banyak digunakan dalam melakukan ekstraksi DNA tumbuhan, karena memiliki keunggulan dibandingkan dengan metode lain yakni mudah dilakukan dan kemungkinan adanya enzim pendegradasi DNA lebih kecil dibandingkan dengan metode lain (Rogers & Bendich 1994).

44 Alat-alat yang digunakan dalam isolasi DNA metode CTAB yaitu mortar dan pestel, waterbath (*incubator*), tube berukuran 1.5 ml, mikropipet, shaker, sentrifugasi, vortex. Sedangkan bahan-bahan yang digunakan yaitu buffer ekstrak, nitrogen cair, buffer TAE 1x, dan agarose. Komposisi bahan kimia untuk buffer ekstrak disajikan pada **Tabel 10.2**.

Tabel 10.2 Komposisi bahan untuk buffer ekstrak

| No | Bahan | l sampel reaksi (µl) | N sampel reaksi (µl) |
|----|--------------|----------------------|----------------------|
| 1 | Tris-HCl 1 M | 100 | N x 100 |
| 2 | NaCl 5 M | 280 | N x 280 |
| 3 | EDTA 0.5 M | 40 | N x 40 |
| 4 | CTAB 10% | 200 | N x 200 |
| 5 | Merkapetanol | 5 | N x 5 |
| 6 | PVP 1% | 100 | N x 100 |
| 7 | Aquades | 280 | N x 280 |

Keterangan: N=jumlah atau satuan

(Sumber : Aritonang *et al.* 2007)

Langkah isolasi DNA metode CTAB dengan contoh sampel dari daun tumbuhan adalah sebagai berikut (Aritonang *et al.* 2007) :

a) Pemotongan sampel

Sampel daun diambil dan dipotong dengan ukuran $\pm 2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$. Daun yang sudah dipotong tersebut digerus dengan menambahkan nitrogen cair di dalam pestel dan mortar yang bersih. Tujuan pemberian nitrogen cair ke dalam mortar adalah untuk mempermudah dalam penggerusan.

b) Penggerusan Sampel Daun

Daun hasil gerusan dimasukkan kedalam *tube* 2 ml dan ditambahkan larutan bufer ekstrak sebanyak 500-700 µl dan larutan polivinilpirolidin (PVP) 2 % sebanyak 100 µl. Agar daun hasil gerusan tercampur dengan larutan buffer dan PVP 2% secara merata, maka *tube* hasil gerusan tersebut divortex.

c) Proses inkubasi

Penggerusan yang telah dilakukan tidak cukup untuk merusak sel atau jaringan daun. Untuk itu, hasil gerusan direbus dalam air panas atau disebut dengan inkubasi. Proses inkubasi dilakukan selama 45 - 60 menit dalam *water bath* dan setiap 15 menit sekali dibolak-balikkan. Suhu optimal yang digunakan dalam proses inkubasi berkisar antara 65-70°C. Apabila proses inkubasi melebihi suhu optimal maka DNA yang ada dalam *tube* akan rusak.

2

d) Pemurnian DNA

2 Apabila proses inkubasi telah selesai, maka tube diangkat dan didinginkan selama 15 menit kemudian ditambahkan chloroform sebanyak 500 μ l dan fenol sebanyak 20 μ l, lalu dilakukan *sentrifugasi* pada kecepatan 13000 rpm selama 2 menit. Proses *sentrifugasi* dilakukan untuk memisahkan bahan-bahan kimia atau fase organik dari fase air berupa supernatan. Untuk tahapan selanjutnya, fase yang digunakan adalah fase air yang berisi benang-benang nukleat. Untuk itu fase air dipisahkan dari fase organik dengan menggunakan pipet mikro dan selanjutnya fase air dipindahkan kedalam *tube* baru. Chloroform dan fenol ditambahkan sebanyak dua kali. Tujuannya adalah untuk memperoleh DNA dengan tingkat kemurnian yang tinggi.

e) Pengendapan DNA

2 Supernatan yang telah terpisah dari fase organik, kemudian ditambahkan isopropanol dingin sebanyak 500 μ l dan NaCl atau NaOAc sebanyak 300 μ l. Campuran ini disimpan dalam *freezer* selama 45 menit-60 menit. Penyimpanan dilakukan bertujuan untuk pengendapan dan pembentukan benang-benang nukleat yang akan menjadi DNA. Hasil pengendapan tersebut disentrifugasi pada kecepatan 13000 rpm selama 2 menit dan kemudian cairan yang ada dalam *tube* dibuang. Pembuangan cairan harus dilakukan secara hati-hati agar pellet DNA yang mengendap tidak ikut terbang.

f) Pencucian pelet DNA

2 Hasil pengendapan berupa pellet DNA dicuci menggunakan etanol 96%-100% sebanyak 300 μ l. Kemudian disentrifugasi dan dilakukan pembuangan cairan etanol ke tempat pembuangan. Proses ini dilakukan sebanyak dua kali dengan tujuan agar pellet DNA yang diperoleh menjadi cukup murni.

g) Proses pengeringan pelet DNA

2 Pelet DNA yang telah tercuci kemudian dikeringkan dalam desikator \pm 15 menit. Posisi *tube* yang berisi pellet DNA dalam keadaan terbalik dengan tujuan agar *silica gel* di dalam desikator dapat menyerap cairan yang ada dalam *tube*. DNA yang telah kering kemudian ditambahkan buffer TE kedalam pelet DNA sebanyak 20 μ l. Penambahan buffer pellet TE bertujuan untuk memekatkan pellet DNA dan melarutkan pellet DNA. Selanjutnya, pellet DNA yang telah ditambahkan buffer TE

disentil-sentil dan disentrifugasi kembali pada kecepatan 13000 rpm selama 2 menit. Pelet DNA kemudian disimpan dalam freezer.

10.4.2 Jenis-Jenis Penanda DNA Tumbuhan

Azrai (2005) melaporkan bahwa saat ini telah ditemukan tiga tipe penanda DNA, yaitu penanda berdasarkan hibridisasi DNA dan berdasarkan PCR, ketiga tipe penanda tersebut adalah sebagai berikut:

- Penanda berdasarkan hibridisasi DNA, contohnya: RFLP (*Restriction Fragment Length Polymorphism*)
- Penanda berdasarkan PCR (*Polymerase Chain Reaction*) dengan menggunakan sekuen-sekuen nukleotida sebagai primer, contohnya : RAPD (*Randomly Amplified Polymorphic DNA*) dan AFLP (*Amplified Fragment Length Polymorphism*)
- Penanda berdasarkan PCR dengan menggunakan primer yang menggabungkan sekuen komplementer spesifik dalam DNA sasaran, contohnya: STS (*Sequence Tagged Sites*), SCARs (*Sequence Characterized Amplified Regions*), SSRs (*Simple Sequence Repets*) atau mikrosatelit, dan SNPs (*Single Nucleotide Polymorphism*).

a) RFLP (*Restriction Fragment Length Polymorphism*)

RFLP didefinisikan sebagai suatu kombinasi dari probe enzim spesifik (Azrai, 2005). RFLP merupakan penanda kodominan, sangat dapat dipercaya dalam analisis linkage dan breeding serta dapat ditentukan dengan mudah jika karakter terdapat dalam bentuk homozigot atau heterozigot. Kelebihan dari RFLP yaitu : konsistensi yang tinggi, sifat pewarisan kodominan, dapat diulang antar laboratorium, memberikan marka pada lokus yang spesifik, tidak memerlukan informasi sekuen, dan relatif mudah dilakukan skoring karena adanya perbedaan yang cukup besar antar fragmen.

b) RAPD (*Randomly Amplified Polymorphic DNA*)

RAPD merupakan penanda yang menggunakan oligonukleotida pendek (biasanya 10 *base pair*/bp) sebagai primer yang akan berikatan dengan bagian (sites) komplementernya (Kumar & Gurusubramanian 2011; Weising *et al.* 2005; Zufahmi 2013). Keunggulan dari teknik analisis menggunakan marka RAPD di antaranya adalah (1) kuantitas DNA yang dibutuhkan sedikit, (2) hemat biaya, (3) mudah dipelajari, dan (4) primer

yang diperlukan sudah banyak dikomersialisasikan sehingga mudah diperoleh (Azrai 2005; Weising *et al.* 2005; Zulfahmi 2013). Kumari dan Thakur (2014) memaparkan bahwa kelebihan dari teknik RAPD yaitu membutuhkan biaya yang relatif murah. Kelemahan teknik ini antara lain (1) tingkat reproduksibilitas pola markah dari laboratorium ke laboratorium berbeda dan antara hasil percobaan dalam laboratorium itu sendiri yang sama, (2) sangat sensitif terhadap variasi dalam konsentrasi DNA, dan (3) memerlukan konsentrasi primer dan kondisi siklus suhu yang optimal pada saat pengujian (Azrai 2005; Weising *et al.* 2005; Zulfahmi 2013).

Tabel 10.3 Contoh primer RAPD dari Operon Technology

| Nama Primer | Sequen (5'-3') | T _m (°C) |
|-------------|----------------|---------------------|
| OPC 07 | GTCCCGACGA | 32 |
| OPL 11 | ACGATGAGCC | 32 |
| OPA 08 | GTGACGTAGG | 32 |
| OPAH 15 | CTACAGCGAG | 32 |
| OPAM 20 | ACCAACCAGG | 32 |
| OPAN 01 | ACTCCAGGTC | 32 |
| OPAO 01 | AAGACGACGG | 32 |
| OPAP 20 | CCCGGATACA | 32 |
| OPAN 05 | GGGTGCAGTT | 32 |
| OPA 12 | TCGGCGATAG | 32 |
| OPAP 10 | TGGGTGATCC | 32 |
| OPAA 01 | AGACGGCTCC | 32 |
| OPAB 01 | CCGTCGGTAG | 32 |

(Sumber: Kesari & Rangan, 2011)

Kunci RAPD yaitu primer yang digunakan adalah urutan acak, primer tidak spesifik untuk gen tertentu (universal) atau dengan urutan tertentu dan mengikat DNA komplemennya dari bermacam-macam spesimen DNA. Contoh primer RAPD disajikan pada Tabel 10.3 (Kesari & Rangan 2011). Primer yang digunakan dalam RAPD adalah tunggal dan meng-*anealing* tempat penempelan primer (*priming site*) dengan arah yang berlawanan untuk terjadinya amplifikasi.

43 Amplifikasi fragmen DNA dalam RAPD dilakukan menggunakan mesin PCR pada suhu *annealing* rendah (35-40 °C). Dalam proses amplifikasi dengan PCR, jika suhu *annealing*-nya tepat, primer akan menempel pada beberapa tempat dimana sekuennya berkomplemen dengan sekuen DNA cetakan dan menghasilkan fragmen DNA secara acak (Zulfahmi, 2013). Penanda RAPD bersifat dominan, fragmen DNA yang dihasilkan tidak dapat membedakan individu yang memiliki genotipe homozigot (AA) dengan heterozigot (Aa), sedangkan yang tidak ada pita secara jelas menunjukkan genotipe resesif (aa) (Zulfahmi, 2013).

63 Penanda RAPD dapat digunakan untuk studi keragaman genetik, pemetaan genom, dan identifikasi kultivar (Kumar & Gurusubramanian 2011). Selanjutnya Kumari dan Thakur (2014) memaparkan bahwa penanda RAPD dapat digunakan untuk mempelajari genetika populasi, pemetaan gen, dan *breeding* tanaman.

c) AFLP (*Amplified Fragment Length Polymorphism*)

AFLP merupakan penanda berdasarkan PCR, yaitu amplifikasi fragmen terbatas yang diikat ke adaptor sintetik dan diamplifikasi menggunakan primer yang membawa nukleotida selektif pada ujung 3'nya. Teknik ini menghasilkan penanda yang dapat direproduksi dari DNA organisme apa pun dan memungkinkan dihasilkan genotipe dengan resolusi yang tinggi. AFLP telah digunakan secara luas, misalnya untuk menyelidiki genom dengan kompleksitas yang berbeda dari mikroba hingga organisme tingkat tinggi untuk tujuan identifikasi spesies, strain dan varietas, genetika populasi, serta pemetaan sifat sederhana dan kompleks. Finkeldey (2005) melaporkan bahwa proses AFLP yaitu DNA total dari suatu tumbuhan dicernakan oleh enzim restriksi tertentu, dan potongan-potongan yang dihasilkan dihubungkan dengan suatu primer dan diamplifikasi melalui PCR.

d) Mikrosatelit

Mikrosatelit dikenal juga dengan nama SSRs (*simple sequence repeats*) merupakan marka yang terdiri dari untaian urutan basa berulang dan memiliki motif sekuen yang pendek (Weising *et al* 2005). SSRs adalah marka molekuler kodominan yang dapat digunakan dalam mempelajari informasi genetik (mutasi, mating system, evolusi dll.) dalam suatu genom spesies makhluk hidup pada populasi. SSRs banyak diterapkan dalam mempelajari ekologi molekuler karena memiliki keunggulan

dibandingkan dengan penanda molekuler lainnya (RFLP, RAPD dan AFLP) seperti tingkat heterozigositas atau polimorfik yang tinggi, mampu mendeteksi keragaman pada tingkat alel (mempelajari Hukum Mendel), lebih stabil dan keberadaannya yang melimpah pada genom makhluk hidup (Sia, 2000).

Penggunaan mikrosatelit telah banyak digunakan dalam penelitian-penelitian studi genetik populasi, ekologi, pemuliaan tanaman, *gene flow*, keragaman genetik antar dan interpopulasi suatu tanaman. Pada genom makhluk hidup terdapat dua jenis mikrosatelit yaitu: nuklear (ncSSRs/SSRs), dan kloroplas (cpSSRs) (untuk tumbuhan), mitokondria (mtSSRs) (untuk hewan). Penggunaan ncSSRs oleh Wee *et al.* (2015) berhasil mendeteksi *gene flow*, potensi hibridisasi dan struktur genetik dua spesies mangrove yang berbeda antara *Rhizophora mucronata* dan *Rhizophora stylosa*, dan pada penelitian Manurung *et al* (2015) melaporkan adanya perbedaan keragaman genetik inter dan antarpopulasi mangrove *Avicennia marina* pada tiga populasi yang dipengaruhi oleh pencemaran limbah logam berat. Contoh lain penggunaan mikrosatelit yaitu pada tanaman Mindi (*Melia azedarach* L) di Hutan Rakyat Jawa Barat (Irmayanti *et al.*, 2015).

e) SNPs (*Single Nucleotide Polymorphism*)

Resolusi tertinggi untuk mengkarakterisasikan genotype dari suatu individu pada lokus gen tertentu dapat dicapai melalui sekuensi DNA (*DNA sequencing*), yakni dengan menentukan sekuensi basa-basa yang terdapat pada satu rantai DNA (Finkeldey, 2005). Dengan berkembangnya otomatisasi teknik sekuensi DNA, maka dapat dilakukan pengamatan variasi genetik ditingkat basa penyusun DNA itu sendiri.

DAFTAR PUSTAKA

- 64 Acquaah, G. (2007). *Principles of Plant Genetics and Breeding*. Blackwell Publishing Ltd.
- Alberts, B., Johnson, A., Lewis, J., Raff, M., Roberts, K., & Walter, P. (2014). *Molecular Biology of the Cell* (6th ed.). Garland Science.
- Allen, R.G. Pereira L.S, D. Raes D and Smith. 1998. *Crop Evaporation* FAO irrigation and Drainage paper.
- Ambali, A.J.D. (2024). *Biotechnology science policy nexus*. Biotechnology-Ecology Research and Outreach Consortium (BioEROC) Box 403, Zomba.
- 14 Anonim. (2020). Teknik Persilangan dan Penyerbukan Bawang Daun. <http://balitsa.litbang.pertanian.go.id/ind/index.php/berita-terbaru/1034-persilangan-bawang-daun>.
- Anonim. (2024a). <https://berita99.com>, 2024. Diakses tanggal 10 Agustus 2024
- Anonim. (2024b). <https://brainly.co.id>, 2024. Diakses tanggal 10 Agustus 2024
- Anonim. (2024c). <https://dkp.bogorkab.go.id>. Diakses tanggal 10 Agustus 2024
- Anonim. (2024d). <https://gurusiana.id>, 2024. Diakses tanggal 10 Agustus 2024
- Anonim. (2024e). <https://myedisi.com>. Diakses tanggal 10 Agustus 2024
- Anonim. (2024f). <https://ruangguru.com>. Diakses tanggal 10 Agustus 2024
- Anonim. (2024g). <https://solopos.com>. Diakses tanggal 10 Agustus 2024
- Anraku, Yasuhiro (1988). *Bacterial electron transport chains*. *Annual Review of Biochemistry*. **57** (1)
- 35 Aritonang, K.V., Siregar, I.Z., Yunanto, T. (2007). *Manual Analisis Genetik Tanaman Hutan di Laboratorium Silvikultur Fakultas Kehutanan Institut Pertanian Bogor*. Bogor (ID): Fakultas Kehutanan IPB.
- Artadana, I., & Savitri, W. (2018). *Dasar-Dasar Genetika Mendel dan Pengembangannya*. Yogyakarta: Graha Ilmu

- 91 Aryal, S. 2022. Krebs (Citric Acid) Cycle Steps by Steps Explanation. <https://microbiologyinfo.com/krebs-citric-acid-cycle-steps-by-steps-explanation/>. Diakses Tanggal 19 Juli 2024
- 1 Ashar, J.R., Farhanah, A., Firmansyah, Hamzah, P., Indriatama, W.M., Ismayanti, R., Friska, M., & Fitrahtunnisa. (2023). Pengantar Pemuliaan Tanaman. Haura Utama, Sukabumi.
- Ashar, J.R., Farhanah, A., Hari, B.D., Mariane, I., Khan, K.A., Tuhuteru, S., Paling, S., Ode, I., Fitrahtunnisa, Hamzah, P., Akbar, B.F. (2024). *Pengantar Bioteknologi*. Sukabumi: CV.Haura Utama.
- Atwel B. Kriedeman P and Turnbull C. (1998). Plant in action adaption in nature. Performance ini cultivation Macmillan Edu Australia PTY LTD.
- Azrai, M. (2005). Pemanfaatan markah molekuler dalam proses seleksi pemuliaan tanaman. *J Agro Biogen*. 1(1):26-37.
- 53 Baluška, F., Mancuso, S., Volkmann, D., & Barlow, P. W. (2010). Root apex transition zone: A signalling–response nexus in the root. *Trends in Plant Science*, 15(7), 402-408. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2010.05.002>
- Barret, Kim., et al., 2010, Ganong's Review of Medical Physiology. 23th edn. McGraw-Hill.
- Barus, T. (2006). Ekologi Tanaman dan Restorasi Lahan. Universitas Sumatera Utara.
- 50 Baucom, R. S., Heath, K. D., & Chambers, S. M. (2020). Plant–environment interactions from the lens of plant stress, reproduction, and mutualisms. *American Journal of Botany*, 107(2), 175–178. <https://doi.org/10.1002/ajb2.1437>
- Berg, H. C. (2004). *E. coli in Motion*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-5394-7>
- Berg, J. M., Tymoczko, J. L., & Stryer, L. (2002). *Biochemistry*. W. H. Freeman and Company.
- Bewley, J. D., & Black, M. (1994). *Seeds: Physiology of Development and Germination*. Plenum Press.
- 75 Braam, J. (2005). In touch: Plant responses to mechanical stimuli. *New Phytologist*, 165(2), 373-389. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01263.x>

- 89 Briggs, W. R., & Christie, J. M. (2002). Phototropins 1 and 2: Versatile plant blue-light receptors. *Trends in Plant Science*, 7(5), 204-210. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(02\)02245-8](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(02)02245-8).
- Buchanan, B. B., Gruissem, W., & Jones, R. L. (2015). *Biochemistry & Molecular Biology of Plants*. John Wiley & Sons.
- 2 Campbell, N. A., & Reece, J. B. (2005). *Biology* (7th ed.). Pearson Education.
- Campbell, N. A., & Reece, J. B. (2008). *Biologi Edisi Kedelapan Jilid 1*. Jakarta: Erlangga.
- Campbell, N.A., J.B Reece, L.A Urry, M.L Cain., S.A Wasserman, P.V. Minorsky. (2017). *Campbell Biology* 11th Edition. New York: Pearson Higher Education.
- Campbell, N.A., Jane B. Reece, Lawrence G. Mitchell. (2004). *Biologi*. Penerjemah Wasmen Mana. Amalia Safitri (ed). Edisi Lima Jilid Tiga. Erlangga. 436 hal.
- 1 Campbell, N.A., Reece, J.B., Mitchel, L.G., (2003) *Biologi, Edisi Kelima*, (Terjemahan : Rahayu Lestari, Ellyzar I.M. Adil, Nova Anita), Jakarta: Erlangga.
- Campbell, N.A., J.B. Reece, dan L.G. Mitchell. 2000. *Biologi Edisi ke 5 Jilid 2*. (diterjemahkan dari *Biology Fifth Edition*, penerjemah: W. Manalu). Penerbit Erlangga. Jakarta.
- Campbell, N.A., J.B. Reece, dan L.G. Mitchell. 2008. *Biologi Edisi ke 8 Jilid 1*. (diterjemahkan dari *Biology Eight Edition*, penerjemah: D.T. Wulandari). Penerbit Erlangga. Jakarta.
- Carlson, C.R., Caugant, D.A. and Kolsto, A.-B. (1994) Genotypic diversity among *Bacillus cereus* and *Bacillus thuringiensis* strains.
- Caswell, M.F., Fuglie, K.O., Klotz, C.A. (1998). Agricultural biotechnology an economic perspective. *An Economic Research Service Report*. 687.
- 110 Chaves, M. M., Flexas, J., & Pinheiro, C. (2003). *Understanding plant responses to drought – from genes to the whole plant*. *Functional Plant Biology*
- Chawla, H.S. (2009). *Introduction to Plant Biotechnology*. Enfield, New Hampshire, USA : Science Publishers.
- 108 Christie, J. M., & Murphy, A. S. (2020). Shoot phototropism in higher plants: New light through old concepts. *American Journal of Botany*, 107(5), 635-643. <https://doi.org/10.1002/ajb2.1454>

- Darmawan, J. dan J. Baharsjah. (1983). Dasar-Dasar Ilmu Fisiologi Tanaman. Semarang. P.T. Suryandaru Utama. Semarang. 95 hal.
- Darwin, C., & Darwin, F. (1880). The Power of Movement in Plants. John Murray.
- Darwin, C., & Darwin, F. (1880). The Power of Movement in Plants. John Murray.
- 105 Doyle, J.J., Doyle, J.L. (1990). Isolation of plant DNA from fresh tissue. *Focus*. 12: 13-15.
- Dresselhaus, T., & Hückelhoven, R. (2019). *Biotic and Abiotic Stress Responses in Crop Plants*. MDPI - Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- Dwidjoseputro, D.1992. Pengantar Fisiologi Tumbuhan. Cetakan Keenam. PT Gramedia. Jakarta.
- Dwiyani, R. (2015). *Kultur Jaringan Tanaman*. Denpasar : Pelawa Sari "Percetakan & Penerbit.
- Eko Setiawan. (2009). Kajian Hubungan unsur iklim terhadap Produktivitas Cabe jamu. (Agrovigor Vol 2)
- Elbaum, R., Gorb, S., & Fratzl, P. (2007). Structures in the cell wall that enable hygroscopic movement in non-seed plants and fungi. *Journal of Structural Biology*, 158(1), 124-133. <https://doi.org/10.1016/j.jsb.2006.12.004>
- 52 Ellison, A. M., & Gotelli, N. J. (2009). Energetics and the evolution of carnivorous plants—Darwin's 'most wonderful plants in the world'. *Journal of Experimental Botany*, 60(1), 19-42. <https://doi.org/10.1093/jxb/ern179>
- 1 Evert, R.F. (2006). *Esau's Plant Anatomy : Meristems, Cell, and Tissues of the Plant Body*. 3rd edition, United States of America : John Wiley & Sons Inc. Publication.
- Fageria, N.K. (2017). Fertilization and mineral nutrition of rice, ISBN: 9781138198869. Boca Raton. CRC Press. 586p.
- Fahn, A. (1991). *Anatomi Tumbuhan* (Terjemahan). Gajah Mada University Press, Yogyakarta.
- Fauziah, A. (2021). PENGANTAR FISILOGI TUMBUHAN. Biru Atmajaya. Tulungagung.

- 37 Fauziah, P. N., Rohmah, M. K., Umar, F., Wahdi, F. H., Setiyabudi, L., Sihombing, M. A. E. M., & Firmansyah, F. (2023). *Biologi Molekuler*. Tohar Media.
- Finkeldey, R. (2005). *Pengantar Genetika Hutan Tropis*. Djamhuri E, Siregar IZ, Siregar UJ, Kertadikara AW, penerjemah. Bogor (ID): Fakultas Kehutanan Institut Pertanian Bogor. Terjemahan dari: An Introduction to Tropical Forest Genetic.
- 5 Fiqa, A. P., Nursafitri, T. H., Fauziah, F., & Masudah, S. (2021). Pengaruh faktor lingkungan terhadap pertumbuhan beberapa aksesii *Dioscorea alata* L terpilih koleksi kebun raya purwodadi. *Jurnal AGRO*, 8(1), 25–39. <https://doi.org/10.15575/10594>
- Fitter A.H, & Hay R.K.M. (1991). *Fisiologi Lingkungan Tanaman*.
- Gardner, F. P., Pearce, R. B., & Mitchell, R. L. (2003). *Physiology of Crop Plants*. Scientific Publishers.
- 107 Gardner,F.P., R.B.Pearce dan R.L.Mitchell. (1991). *Fisiologi Tanaman Budidaya*. Universitas Indonesia Press. Jakarta. 424 hal
- George, E.F., Hall, M.A., Klerk, G.J.D. (2008). *Plant Propagation by Tissue Culture 3rd Edition*. AA Dordrecht, The Netherlands : Springer.
- 3 Gerasimovskaya, Evgenia; Kaczmarek, Elzbieta (2010). Extracellular ATP and adenosine as regulators of endothelial cell function: Implications for health and disease . Springer Science & Business Media.
- Gilroy, S., & Trewavas, A. (2001). Signal Processing and Transduction in Plant Cells. *Journal of Experimental Botany*, 52(362), 529–539. <https://doi.org/10.1093/jexbot/52.362.529>
- Goldsworthy, P.R. dan N.M. Fisher. 1992. *Fisiologi Budidaya Tanaman tropik*. Penerjemah Tohari. Universitas Gadjah Mada Press.
- Goudriaan, J., & van Laar, H. H. (1994). *Modelling potential crop growth processes*. Kluwer Academic Publishers.
- Hamim. (2019). *Fisiologi Tumbuhan*. Edisi kedua. E-ISBN:9786023923960 Tangerang Selatan. Universitas Terbuka. 436 hal.
- 23 Handoko. A, dan Rizki, A.M. (2020). *Buku Ajar Fisiologi Tumbuhan, Program Studi Pendidikan Biologi*. Fakultas Tarbiyah dan Keguruan UIN Raden Intan Lampung.

- Harahap, F. 2012. *Fisiologi Tumbuhan: Suatu Pengantar*. ISBN: 978-602-8848-88-6. Medan. Departemen Pendidikan Nasional Badan Penelitian dan Pengembangan. 186 hal.
- Harjadi, S. S. (2009). *Fisiologi Tumbuhan*. Kanisius.
- Hasnunidah, N dan Suwandi, T. (2016). *Fisiologi Tumbuhan*. Yogyakarta Innosains. ISBN. 978-602-6542-02-1.
- Heldt, H.-W., & Piechulla, B. (2011). *Plant Biochemistry*. Academic Press.
- Henkrar, F., Udupa, S. (2020). Marker assisted selection in plant breeding. *Mor. J. Agri. Sci.* 1(5): 237-247.
- 67 Hidayanti, N. (2016). Mekanisme Fisiologis Tumbuhan Hiperakumulator Logam Berat = Heavy Metal Hyperaccumulator Plant Physiology Mechanism. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 14(2), 75. <https://doi.org/10.29122/jtl.v14i2.1424>
- Hidayat, E.B. (1994). *Morfologi Tumbuhan*. Institut Teknologi Bandung.
- Hidayat, E.B. (1995). *Anatomi Tumbuhan Berbiji*. Institut Teknologi Bandung
- 47 Hopkins, W. G., & Hüner, N. P. A. (2008). *Introduction to Plant Physiology*. John Wiley & Sons.
- Hopkins, W. G., & Hüner, N. P. A. (2009). *Introduction to Plant Physiology* (4th ed.). Wiley.
- Hopkins, W. G., & Hüner, N. P. A. (2009). *Introduction to Plant Physiology* (4th ed.). Wiley.
- <https://contohmu.github.io/pulp/post/gambar-gerak-higroskopis/>
<https://gardencenter.co.id/fungsi-dan-struktur-daun-dalam-ilmu-biologi/> diakses tanggal 1 Agustus 2024.
- <https://infosekarang.my.id/bagian-bagian-dari-pohon.tomat.html>, diakses 24 Juni 2024.
- <https://mercusuar.co/2022/08/08/bagian-utama-tumbuhan/>. diakses 23 Juni 2024.
- <https://nurarifahsains.blogspot.com/2017/07/gerak-taksis.html>
- <https://www.mastah.org/akar-serabut/> diakses 23 Juni 2024
- <https://www.slideshare.net/slideshow/buah-2/25785923>. Diakses 23 Juni 2024
- Huda, M. N., Sunaryo, & Soelistyono, R. (2015). Study Of Thermal Unit Effects Assessment And Plant Density. *Jurnal Produksi Tanaman*, 3(1), 56-64.

- 36 Huseynova, I., Sultanova, N., Mammadov, A., Suleymanov, S., & Aliyev, J. A. (2014). Biotic Stress and Crop Improvement. In P. Ahmad, M. R. Wani, M. M. Azooz, & L.-S. Phan Tran (Eds.), *Improvement of Crops in the Era of Climatic Changes* (pp. 91-120). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8824-8_4
- 41 Imran, Q. M., Falak, N., Hussain, A., Mun, B.-G., & Yun, B.-W. (2021). Abiotic Stress in Plants; Stress Perception to Molecular Response and Role of Biotechnological Tools in Stress Resistance. *Agronomy*, 11(8), 1579. <https://doi.org/10.3390/agronomy11081579>
- 68 Irmayanti, L., Siregar, I.Z., Pamoengkas, P. (2015). Keragaman genetik mindi (*Melia azedarach* L.) pada hutan rakyat di Jawa Barat dengan penanda mikrosatelit. *Jurnal Silvikultur Tropika*. 06(1):1-8
- Istirochah, P., M. (2019). Pengantar Fisiologi Tumbuhan. In Intimedia (Vol. 2, Issue 1).
- 5 Jaffe, M. J. (1973). Thigmomorphogenesis: The response of plant growth and development to mechanical stimulation. *Planta*, 114(2), 143-157. <https://doi.org/10.1007/BF00387472>
- Jain, V.K. (2002). *Fundamental of Plant Physiology*. ISBN:8121904625. S.Chand&Company LTD. p32-44.
- 55 Jaisyurahman, Desta Wirnas, Trikoesoemaningtyas, & Dan Heni Purnamawati. (2020). Dampak Suhu Tinggi terhadap Pertumbuhan dan Hasil Tanaman Padi. *Jurnal Agronomi Indonesia (Indonesian Journal of Agronomy)*, 47(3), 248-254. <https://doi.org/10.24831/jai.v47i3.24892>
- James MG, Denyer K, Myers AM. (2003). Starch synthesis in the cereal endosperm. *Curr Opin Plant Biol*.
- Jékely, G. (2009). Evolution of phototaxis. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1516), 2795-2808. <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0072>
- Jones, D. L., Willett, V. B., & Farrar, J. F. (2009). *Plant respiration and the environment*. Academic Press.
- 104 Jones, H. G. (1992). *Plants and Microclimate: A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology*. Cambridge University Press.
- Jones, H. G., & Tardieu, F. (2006). *Monitoring plant water status and the impact of drought*. In *Plant Stress and Water Use Efficiency*, Springer.
- Junus, I. R. (1981). *Botani Umum*. Jakarta: Balai Pustaka.

- Kader, A. A. (2002). *Postharvest biology and technology: An overview*. HortScience
- 73 Kesari, V., Rangan, L. (2011). Genetic diversity analysis by RAPD markers in candidate plus trees of *Pongamia pinnata*, a promising source of bioenergy. *Biomass and bioenergy*. 3:3123-3128.
- 34 Kiss, J. Z. (2000). Mechanisms of the early phases of plant gravitropism. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 19(5), 551-573. <https://doi.org/10.1080/07352680091139226>
- 34 Kiss, J. Z. (2000). Mechanisms of the early phases of plant gravitropism. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 19(5), 551-573. <https://doi.org/10.1080/07352680091139226>
- Kompas.com,(2024).<https://www.kompas.com/skola/read/2020/10/28/163136869/bukti-bukti-peristiwa-fotosintesis>
- 3 Kracke, Frauke; Vassilev, Igor; Krömer, Jens O. (2015). Microbial electron transport and energy conservation – the foundation for optimizing bioelectrochemical systems". *Frontiers in Microbiology*
- 99 Kumar, N.S., Gurusubramanian, G. (2011). Random amplified polymorphic DNA (RAPD) markers and its Applications. *Sci Vis*. 11(3):116-124.
- 65 Kumar, V., Rout, S., Tak, M.K., Deepak, K.R. (2015). Application of Biotechnology in Forestry: Current Status and Future Perspective. *Nature Environment and Pollution Technology*. 14(3):645-653
- 85 Kumari, N., Thakur, S.K. (2014). Randomly amplified polymorphic DNA- a brief review. *American J of Animal and Veterinary Sciences*. 9(1):6-13.
- Kuswandi, P.C. (2015). Metode Bioteknologi Tanaman. Tersedia pada : <https://staffnew.uny.ac.id/upload/197810222010122001/pendidikan/1-metode-biotek-tnmn.pdf> [diakses pada 15 Juni 2024]
- Lakitan, B. (2007). *Dasar-dasar Fisiologi Tumbuhan*. Cetakan Pertama. PT Raja Grafindo Persada, Jakarta.
- Lakitan, B. (2018). *Dasar-Dasar Fisiologi Tumbuhan*. ISBN: 979-421-377-2 Jakarta. PT. Raja Grafindo. 205 hal.
- 71 Lambers, H., Chapin III, F. S., & Pons, T. L. (2008). *Plant Physiological Ecology*. Springer.

- Larcher, W. (2003). *Physiological Plant Ecology: Ecophysiology and Stress Physiology of Functional Groups* (4th ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-05214-3>
- 20 Larcher, W. (2003). *Physiological Plant Ecology: Ecophysiology and Stress Physiology of Functional Groups* (4th ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-05214-3>
- Lilisari, R. (2012). *Pengetahuan Awal Calon Guru Biologi tentang Konsep Katabolisme karbohidrat (Respirasi Seluler)*. Universitas Pendidikan Indonesia. Bandung
- 42 Liscum, E., Askinosie, S. K., Leuchtman, D. L., Morrow, J., Willenburg, K. T., & Coats, D. R. (2014). Phototropism: Growing towards an understanding of plant movement. *Plant Cell*, 26(1), 38-55. <https://doi.org/10.1105/tpc.113.119727>
- 45 Liscum, E., Askinosie, S. K., Leuchtman, D. L., Morrow, J., Willenburg, K. T., & Coats, D. R. (2014). Phototropism: Growing towards an understanding of plant movement. *Plant Cell*, 26(1), 38-55. <https://doi.org/10.1105/tpc.113.119727>
- Loomis R.S. 1983, Crop manipulation of efficient use water an over view in limitation of efficient water use production.
- 1 Loveles, A.R., (1991). *Prinsip-Prinsip Biologi Tumbuhan Untuk Daerah Tropik, Edisi Kedua, (Terjemahan : Kuswata Kartawinata, Sarkat Danimiharja, Usep Soetisna)*, Jakarta : PT Gramedia.
- 76 Maftukhah, Ulfaturrohmah, Sholikhah, N.I dan Fawaida, U. (2023). Pengaruh Cahaya Terhadap Proses Fotosintesis pada Tanaman Naungan dan Tanaman Terpapar Cahaya Langsung. *JPMMP: Jurnal Pengabdian Masyarakat MIPA dan Pendidikan MIPA*, 2023, 7(1), 51-55. Available online at: <http://journal.uny.ac.id/index.php/jpmmp>
- Maimunah, S., Mudzakir, H., Sopan, M., & Samek, J. H. (2020). Diversity of Types of Composers Arboretum Tropical Rainforest Conservation PT. Asmin Bara Bronang Kapuas District, Central Kalimantan. *Jurnal Hutan Tropis Volume*, 8(3), 274-280.
- Makarim, A. K. (2024). Cekaman Abiotik Utama dalam Peningkatan Produktivitas Tanaman. *Pusat Perpustakaan dan Literasi Pertanian*, 1(1), 1-11.

- 60 Manasa S, L., Panigrahy, M., Panigrahi, K. C. S., & Rout, G. R. (2022). Overview of Cold Stress Regulation in Plants. *The Botanical Review*, 88(3), 359–387. <https://doi.org/10.1007/s12229-021-09267-x>
- Manggabarani, A.M. (2018). Reaksi Fotosintesis Gelap dan Terang.
- Manggabarani, A.M. (2018). Reaksi Fotosintesis Gelap dan Terang. <https://generasibiologi.com/2018/04/reaksi-fotosintesis-gelap-dan-terang.html>.
- 98 Manghwar, H., & Zaman, W. (2024). Plant Biotic and Abiotic Stresses. *Life*, 14(3), 372. <https://doi.org/10.3390/life14030372>
- 19 Manurung, J., Siregar, I.Z., Kusmana, C. (2015). *Keragaman Morfologi Daun dan Genetik Mangrove Jenis Avicennia Marina (Forsk.) pada Estuari Tercemar Logam Berat di Kawasan Industri Cilegon*. Bogor (ID): Institut Pertanian Bogor.
- Marschner, H. (1986). Mineral Nutrition in Higher Plants. Academic Press Inc, London Ltd. 674p.
- Mas'ud, P. (1993). Telaah Kesuburan Tanah. Angkasa, Bandung.
- McDonald, A. J., & White, P. J. (2016). *Technological Advances in Measuring Plant Respiration*. *Journal of Plant Research*
- Meriem, S. (2020). Mekanisme Toleransi Tanaman pada Lahan Salin: Akumulasi Prolin. *Prosiding Seminar Nasional*, 1(1), 133–139.
- Miller, K. R., & Brody, L. (2012). Biology. Pearson Education.
- Miyazawa, Y., von Wangenheim, D., Nakamura, M., Levitsky, A., & Higashiyama, T. (2011). Roots utilize a nonspecific response to moisture to optimize growth and development. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(40), 16826-16831. <https://doi.org/10.1073/pnas.1109243108>
- Miyazawa, Y., von Wangenheim, D., Nakamura, M., Levitsky, A., & Higashiyama, T. (2011). Roots utilize a nonspecific response to moisture to optimize growth and development. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(40), 16826-16831. <https://doi.org/10.1073/pnas.1109243108>
- Monney, H.A and J.R Ehleringer, 1977. Photosynthesis Plant Ecology Ed. Blackweel Science London.
- 70 Morita, M. T. (2010). Directional gravity sensing in gravitropism. *Annual Review of Plant Biology*, 61, 705-720. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.043008.091714>

- 93 Morita, M. T. (2010). Directional gravity sensing in gravitropism. *Annual Review of Plant Biology*, 61, 705-720. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.043008.091714>
- 61 Mudhor, M. A., Dewanti, P., Handoyo, T., & Ratnasari, T. (2022). Pengaruh Cekaman Kekeringan Terhadap Pertumbuhan dan Produksi Tanaman Padi Hitam Varietas Jeliteng. *Agrikultura*, 33(3), 247. <https://doi.org/10.24198/agrikultura.v33i3.40361>
- Mulyani, R., & Sudarsono. (2010). *Bioteknologi Tanaman: Teori dan Aplikasi*. IPB Press.
- Mulyono. (2010). *Modul : Rekayasa Genetika*. Lampung : Universitas Lampung
- 20 Munns, R., & Tester, M. (2008). Mechanisms of Salinity Tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 59(1), 651-681. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911>
- Murray, H.G., Thompson, W.F. (1980). Rapid isolation of high molecular weight DNA. *Nucleic Acids Res.* 8:4321-4325.
- 12 Murtiwulandari, M., Archery, D. T. M., Haloho, M., Kinasih, R., Tanggara, L. H. S., Hulu, Y. H., Agaperesa, K., Khristanti, N. W., Kristiyanto, Y., Pamungkas, S. S., Handoko, Y. A., & Anarki, G. D. Y. (2020). Pengaruh suhu penyimpanan terhadap kualitas hasil panen komoditas Brassicaceae. *Teknologi Pangan : Media Informasi Dan Komunikasi Ilmiah Teknologi Pertanian*, 11(2), 136-143. <https://doi.org/10.35891/tp.v11i2.2168>
- 4 Mustika Ningsih, Rs., & Negeri, S. (2019). Pengaruh Intensitas Cahaya Terhadap Pertumbuhan Dan Perkembangan Tanaman Kacang Merah. *Agroswagati*, 7(1). <https://doi.org/10.33603/agroswagati.v7i1>
- 4 Mustika Ningsih, Rs., & Negeri, S. (2019). Pengaruh Intensitas Cahaya Terhadap Pertumbuhan Dan Perkembangan Tanaman Kacang Merah. *Agroswagati*, 7(1). <https://doi.org/10.33603/agroswagati.v7i1>
- Nakamura, A., & Matsumoto, H. (2008). Auxin-cytokinin interactions in the response of Arabidopsis roots to chemical gradients: A chemotropism model. *Plant and Cell Physiology*, 49(4), 509-517. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcn031>

- 100 Nakamura, A., & Matsumoto, H. (2008). Auxin-cytokinin interactions in the response of Arabidopsis roots to chemical gradients: A chemotropism model. *Plant and Cell Physiology*, 49(4), 509-517. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcn031>
- 8 Nelson, D. L., & Cox, M. M. (2008). *Lehninger Principles of Biochemistry* (5th ed.). W. H. Freeman and Company.
- 8 Novitasari.R. (2017). Proses Respirasi Seluler pada Tumbuhan. Prosiding Seminar Nasional Pendidikan Biologi dan Biologi Jurusan Pendidikan Biologi, Fakultas MIPA, Universitas Negeri Yogyakarta.
- Nursyamsi. (2010). Teknik kultur jaringan sebagai alternatif perbanyakan tanaman untuk mendukung rehabilitasi lahan. *Prosiding Ekspose*. 85-100.
- Oleary G.J. Connor DJ and White DH 1985. A simulation model of a development growth and yield of wheat crop agrich system.
- 29 Pan, J., Sharif, R., Xu, X., & Chen, X. (2021). Mechanisms of Waterlogging Tolerance in Plants: Research Progress and Prospects. *Frontiers in Plant Science*, 11, 627331. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.627331>
- Parent, C., Capelli, N., Berger, A., Crèvecoeur, M., & Dat, J. F. (2008). An Overview of Plant Responses to Soil Waterlogging. *Plant Stress*, 2(1), 20–27.
- Penertian dan Fungsi Fotorespirasi 2016. www.edubio.info/2016
- Pierce, B. A. (2016). *Genetiks Essential Concepts and Connection*. New York: Pearson.
- 4 Pramadana, M. H., Rivaj, M., & Pirngadi, H. (2021). Sistem Kontrol Pencahayaan Matahari pada Aquascape. *Teknik ITS*, 10(1), 15–21.
- Prasetya, E. (2022). Fotosintesis. *Inovasi Biologi*. <https://inovasibiologi.com/fotosintesis/>
- Pravara. (2024). *Principles of Plant Biotechnology*. <https://pravara.in/wp-content/themes/twentyseventeen/essentials/pdf/elearn/Principles-of-Plant-Biotechnology.pdf> [diakses pada 17 Februari 2024].
- Proses Terjadi Reaksi Terang Fotosintesis. 2020. www.kompas.com
- 2 Purnobasuki H. (2014). Mengembangkan Anatomi Tumbuhan Sebagai Kajian Biologi Yang Menarik dan Bermanfaat Dalam Berbagai Aspek Kehidupan. Pengukuhan Jabatan Guru Besar dalam Bidang

Ilmu Biologi pada Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Airlangga di Surabaya, Tanggal 13 September 2014.

Purwanto, A. (2010). Pengantar Biologi Tumbuhan. Jakarta: Rineka Cipta.

Puslitbangtan (2006) Petunjuk teknis produksi benih padi hibrida. Bogor.

Raven, P. H., Evert, R. F., & Eichhorn, S. E. (1999). *Biology of Plants* (6th ed.). W.H. Freeman and Company.

Raven, P. H., Evert, R. F., & Eichhorn, S. E. (2005). Biologi Tumbuhan: Biologi Sel dan Molekuler, Fisiologi, Perkembangan, dan Ekologi. Jakarta: Erlangga.

Raven, P. H., Evert, R. F., & Eichhorn, S. E. (2005). *Biology of Plants* (7th ed.). W. H. Freeman and Company.

Raven, P.H., Evert, R.F., Eichhorn, S.E., (1992). *Biology of Plants*. Fifth edition, United States of America : Worth Publisher.

Raven, P.H., Evert, R.F., Eichhorn, S.E., (2013). *Biology of Plants*. Eighth edition, New York : W.H. Freeman ang Company Publisher

Rezaldi, F., Qonit M.A.H., Mubarak, S. Nuraini, A. DAN Kusumiyati (2019). Pemanfaatan fenomena pembentukan buah partenokarpi dalam perspektif pertanian di Indonesia. *Jurnal Kultivasi* Vol. 18 (2) : 859-867

Riastuti R.W, Nopiyanti N., Febrianti Y. (2020). Keragaman Morfologi Modifikasi Batang (Caulis) di Kecamatan Lubuklinggau Timur I, Lubuklinggau. *Jurnal Biosalampari* 2(2):67-73

Rogers, S.O., Bendich, A.J. (1994). Extraction of Total Celluler DNA from plant, algae and fungi. 2nd ed. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht.

Sachs, T. (2012). *Plant Respiration and Its Measurement*. Plant Science

Sairam, R. K., Kumutha, D., Ezhilmathi, K., Deshmukh, P. S., & Srivastava, G. C. (2008). Physiology and biochemistry of waterlogging tolerance in plants. *Biologia Plantarum*, 52(3), 401–412. <https://doi.org/10.1007/s10535-008-0084-6>

Salisbury, F. B., & Ross, C. W. (1992). *Plant Physiology* (4th ed.). Wadsworth Publishing Company. Belmont, California.

Salisbury, F. B., & Ross, C. W. (1992). *Plant Physiology* (4th ed.). Wadsworth Publishing Company.

Salisbury, F.B. dan Ross, C.W. 1995. *Plant Physiology*. Third Edition. Wadsworth Publishing Co. Belmont California .

- 77 Salisbury, F.B., and C.W. Ross. (1995a). Fisiologi Tumbuhan. Edisi keempat. Jilid Dua. Bandung. ITB Bandung. 241 hal.
- Salisbury, F.B., and C.W. Ross. (1995b). Fisiologi Tumbuhan. Edisi keempat. Jilid Tiga. Bandung. ITB Bandung. 342 hal.
- Sari, K., & Sulistiani, W. S. (2017). Respon Fisiologis Tanaman Terhadap Kondisi Lingkungan Yang Tercemar Logam Berat, Kalah Atau Bertahan? *Prosiding Semnasoik*, 1(1), 478–483.
- 54 Sari, N. E. P., Nurlela, N., & Wardoyo, S. E. (2019). Fitoremediasi Tanah Tercemar Logam Berat Cd Dengan Menggunakan Tanaman Hanjuang (*Cordyline fruticosa*). *Jurnal Sains Natural*, 9(2), 57. <https://doi.org/10.31938/jsn.v9i2.230>
- Setimela, P.S., E. Monyo, and M. B. (2004) Successful Community-Based Seed Production Strategies. Mexico: D.F.: CIMMYT.
- Seyhan E. (1977). Fundamentals of hidrologis reved geografich insitut der Rijksuniversiteit the ultrect Amsterdam.
- 30 Shahid, M., Khalid, S., Abbas, G., Shahid, N., Nadeem, M., Sabir, M., Aslam, M., & Dumat, C. (2015). Heavy Metal Stress and Crop Productivity. In K. R. Hakeem (Ed.), *Crop Production and Global Environmental Issues* (pp. 1–25). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-23162-4_1
- Shtein, I., Popper, Z. A., Harpaz-Saad, S., & Elbaum, R. (2016). The hierarchical structure of the pod cell walls of the legume *Medicago truncatula* and its impact on dehydration-induced coiling. *Planta*, 243, 1065–1077. <https://doi.org/10.1007/s00425-016-2461-1>
- Shtein, I., Popper, Z. A., Harpaz-Saad, S., & Elbaum, R. (2016). The hierarchical structure of the pod cell walls of the legume *Medicago truncatula* and its impact on dehydration-induced coiling. *Planta*, 243, 1065–1077. <https://doi.org/10.1007/s00425-016-2461-1>
- 58 Sia, E.A., Butler, C.A., Dominska, M., Greenwell, P., Fox, T.D., Petes, T.D. (2000). Analysis of microsatellite mutations in the mitochondrial DNA of *Saccharomyces cerevisiae*. *PNAS*. 97(1):250-255.
- 72 Sianipar, E. M. (2021). Pengaruh Perubahan Iklim Terhadap Ekofisiologi Tanaman Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Majalah Ilmiah Methoda*, 11(1), 75–80. <https://doi.org/10.46880/methoda.vol11no1.pp75-80>

- Silaen, S. (2021). Pengaruh transpirasi dan komponen di dalamnya. *Agroprimatech* vol 5 Oktober 2021.
- Simanungkalit, R. D. M. (2009). *Fisiologi Tanaman: Fotosintesis, Respirasi, dan Transpirasi*. Universitas Indonesia Press.
- 92 Singh, J., Kumar, A. (2020). Plant tissue culture and its application in agriculture as biotechnological tool. *Int.J.Curr.Microbiol.App.Sci.* 11:274-284.
- 28 Sitompul, S.M. (2003). Fungsi Agronomi dan Ekologi Sistem Agroforestri Pinus Dengan Kedelai dan Jagung Sebagai Area Resapan Air (ARA): Transformasi Energi Radiasi dan Presipitasi. Laporan Hibah Penelitian. Program Due Like. PS Agronomi.Fak Pertanian. Unibraw.
- Sitompul, S.M. dan B. Guritno. (1995). *Analisis Pertumbuhan Tanaman*. ISBN: 9794203742. Yogyakarta. Gadjah Mada University Press. 412 hal.
- Sitompul, S.M.. (2002). Radiasi Dalam Sistem Agroforestri.Dalam Wanulcas. Model Simulasi Untuk Sistem Agroforestri. ICRAF. 79-102.
- 57 Smith, H., & Whitelam, G. C. (1997). The shade avoidance syndrome: Multiple responses mediated by multiple phytochromes. *Plant, Cell & Environment*, 20(6), 840-844. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.1997.d01-147.x>
- Soerawidjaja, T. H. (2008). *Keanekaragaman Hayati Indonesia dan Konservasinya*. Universitas Indonesia.
- Soetopo, L. (2003). *Fisiologi Tumbuhan dan Aplikasinya*. PT. Andi. Jakarta
- Stryer, L., Berg, J. M., & Tymoczko, J. L. (2015). *Biochemistry*. W. H. Freeman and Company.
- 14 Subekti, N.A., Syafruddin, R. Efendi, dan S. S. (2007) *Morfologi tanaman dan fase pertumbuhan jagung*. Maros: Balai Penelitian Tanaman Serealia.
- Sufardi, S. (2020). Pertumbuhan tanaman. Researchgate, May, 1-26.
- Sumarni, T. (2004). *Respirasi Tumbuhan*. Gadjah Mada University Press.
- Sumarwoto. (2011). *Botani Umum*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Sunarti, S. (2015). *Respirasi Tanaman: Aspek Fisiologi dan Molekuler*. IPB Press.

- Sunarti, T. (2011). *Biokimia dan Fisiologi Tumbuhan*. Gramedia.
- Sutanto, R. (2002). *Teknologi Pengelolaan Lahan Sawah*. PT. Andi.
- Syukur, M., Sujiprihati, S., Yuniarti, R. (2015) *Teknik Pemuliaan Tanaman*. Jakarta: Penebar Swadaya
- Taiz, L and E. Zeiger *Plant Physiology*. (2002). 3rd ed. English. Sinauer Associates English. 690p.
- 66 Taiz, L., & Zeiger, E. (2010). *Plant Physiology* (5th ed.). Sinauer Associates.
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2010). *Plant Physiology*. Sinauer Associates.
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2015). *Plant Physiology and Development* (6th ed.). Sinauer Associates.
- 39 Takahashi, F., Kuromori, T., Urano, K., Yamaguchi-Shinozaki, K., & Shinozaki, K. (2020). Drought Stress Responses and Resistance in Plants: From Cellular Responses to Long-Distance Intercellular Communication. *Frontiers in Plant Science*, 11, 556972. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.556972>
- Takahashi, H., Miyazawa, Y., & Fujii, N. (2002). Hormonal interactions during root tropic growth: hydrotropism versus gravitropism. *Plant and Cell Physiology*, 43(9), 1104-1109. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcf131>
- Tjitrosoepomo, G. (2010) *Morfologi Tumbuhan*. Gadjah Mada University Press. Yogyakarta.
- Tok, P. (2015). *Reaksi Terang dalam Fotosintesis*. Edubio: Informatif dan Mencerahkan. <https://www.edubio.info/2015/05/reaksi-terang-dalam-fotosintesis.html>
- USDA [United States Department of Agriculture]. (2024). *Plant Biotechnology*. [diakses pada 15 Juni 2024]. Tersedia pada : <https://www.nifa.usda.gov/grants/programs/biotechnology-programs/plant-biotechnology>
- Utomo, B. (2007). *Fotosintesis pada Tumbuhan*. Karya Ilmiah. Fakultas Pertanian USU.
- 106 Vasconcelos, T., Sarmiento, B., & Costa, P. 2007. Solid dispersions as strategy to improve oral bioavailability of poor water soluble drugs. *Drug Discovery Today*.
- Villar, R., & Merino, J. (2001). *Comparison of methods for measuring respiration in plants*. In *Methods in Ecology and Evolution*

- Volkov, A. G. (2012). *Plant Electrophysiology: Signaling and Responses*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-75558-4>
- Wang, T., & Zheng, J. (2020). Advances in Understanding Plant Responses to Environmental Stress. *Annual Review of Plant Biology*
- 62 Wang, X., Chang, S., Lu, J., Fray, R., Grierson, D., Han, Y. (2017). Plant genetic engineering and genetically modified crop breeding: history and current status. *Front. Agr. Sci. Eng.* 4(1): 5–27.
- 14 Wareing, P.F. & Graham, C.F. (1976). Problems of development. In: *The developmental biology of plants and animals*, edited by C.F. Graham and P.F. Wareing, 3–4. Oxford: Blackwell Scientific.
- 33 Wee, A.K.S., Takayama, Z., Chua, J.L., Asakawa, T., Meenakshisundaram, S.H., Onrizal, Adjie, B., Ardli, E.R., Sungkaew, S., Malekal, N.B., *et al.* (2015). Genetic differentiation and phylogeography of partially sympatric species complex *Rhizophora mucronata* Lam. and *R. stylosa* Griff. Using SSR markers. *BMC evolutionary Biology*.15-57.
- 35 Weising, K., Nybon, H., Wolff, K., Kahl, G. (2005). *DNA Fingerprinting in Plants: Principles, Methods, and Applications*. Amerika Serikat (US): CRC Press Taylor & Francis Group.
- Wenkert W. 1983. Water Transport and Balance within the plant overview in Limitiaion to efficient water use in crop production.
- Widjaja, E. A., & Setyowati, F. M. (2013). *Metabolisme Tanaman*. UGM Press.
- Widjaja, S. (2005). *Dasar-Dasar Fisiologi Tanaman*. Erlangga.
- Wiraatmaja, W. 2016. *Pergerakan Hara Mineral dalam Tanah*. Bahan Ajar. Universitas Udayana. 48 hal.
- 74 Yadav, S. K. (2010). Cold stress tolerance mechanisms in plants. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 30(3), 515–527. <https://doi.org/10.1051/agro/2009050>
- 88 Yali, W. (2022). Genetic Engineering Its Application, Importance and Future Aspects in Modern Crop Improvement. *International Research Journal of Plant and Crop Sciences (IRJPCS)*. 7(4):237-243.
- 4 Yustiningsih, M. (2019). Intensitas Cahaya dan Efisiensi Fotosintesis pada Tanaman Naungan dan Tanaman Terpapar Cahaya Langsung. *Bio-Edu: Jurnal Pendidikan Biologi*, 4(2), 44–49. <https://doi.org/10.32938/jbe.v4i2.385>

- Zahara dan Sadiyah. (2021). Jurusan Biologi, F., Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, F., Negeri Padang Jl Hamka, U., Tawar Barat, A., Padang Utara, K., & Padang, K. (n.d.). PENGARUH CAHAYA MATAHARI TERHADAP PROSES FOTOSINTESIS. <https://doi.org/10.24036/prosemnasbio/vol1/2>
- Zamzami, A., Martaningsih, S.T., Supriyanto, A. 2021. Mengenal Perkembangbiakan Tumbuhan dan Hewan. Sukabumi: Farha Pustaka.
- 5 Zidny F., Lailaty, I. Q., Sartika, D., & Ubaidi, M. A. (2022). Viabilitas dan Vigor Benih Kacang Tanah (*Arachis hypogaea* L.), Kacang Hijau (*Vigna radiata* (L.) R. Wilczek), dan Jagung (*Zea mays* L.) pada Temperatur dan Tekanan Osmotik Berbeda. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 27(1), 7-17. <https://doi.org/10.18343/jipi.27.1.7>
- Zulfahmi. (2013). Penanda DNA untuk analisis tanaman. *J Agroteknologi*. 3(2):41-52

BIODATA SINGKAT



Irma Lisa Sridanti, S.P.,M.Si merupakan anak pertama dari empat bersaudara yang lahir di Curup (Bengkulu), pada tanggal 20 Oktober 1975. Penulis menyelesaikan pendidikan sarjana pada Program Studi Agronomi, jurusan Budidaya Tanaman, Fakultas Pertanian Universitas Bengkulu tahun 2000. Pada tahun 2015 penulis menyelesaikan pendidikan magister pada Program Studi Agroekoteknologi

Fakultas Pertanian Universitas Bengkulu.

Saat ini penulis dalam tahap menyelesaikan Program Doktor pada Program Studi Ilmu Tanaman Fakultas Pertanian Universitas Bengkulu, dengan konsentrasi Ilmu Pemuliaan Tanaman. Penulis adalah Dosen Tetap Yayasan Semarak Bengkulu yang bertugas di Fakultas Pertanian, Universitas Prof. Dr. Hazairin, SH, dimana sejak bulan September 2022 hingga sekarang diamanahkan sebagai Wakil Dekan I di Bidang Akademik. Penulis berperan aktif dalam mengikuti seminar, mempublikasi artikel pada jurnal nasional dan internasional bereputasi; aktif sebagai editor jurnal pada jurnal nasional dan telah menulis beberapa buku hasil penelitian yang pernah dilakukan.

1



Prof. Dr. Yusuf Sabilu, M.Si. lahir di Raha Kabupaten Muna Sulawesi Tenggara pada tanggal 24 September 1968. Menyelesaikan pendidikan Program Sarjana Pendidikan Biologi Universitas Halu Oleo pada tahun 1991. Menyelesaikan Pendidikan Magister Program Studi Biologi Institut Pertanian Bogor pada tahun 1999. Menyelesaikan Program Doktor Program Studi Ilmu-Ilmu Pertanian Universitas Hasanuddin Makassar tahun 2015.

Pada tahun 2019 diangkat menjadi Guru Besar pada Bidang Ilmu Biologi Terapan. Penulis mulai bekerja sebagai dosen di Universitas Halu Oleo sejak tahun 1992 sampai sekarang. Pada tahun 1992-1998 ditugaskan pada Jurusan Pendidikan Biologi Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Tahun 1999-2011 ditugaskan pada Jurusan Biologi Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam. Tahun 2011-sekarang ditugaskan pada Fakultas Kesehatan Masyarakat

7



Nuraisyah Takdir, M.Pd lahir di Rante Limbong (Enrekang) Sulawesi Selatan pada tanggal 25 Oktober 1992. Penulis menyelesaikan pendidikan sarjana pada Program Studi Pendidikan Biologi, Fakultas Tarbiyah dan Keguruan, Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar tahun 2015. Penulis menyelesaikan pendidikan magister pada Program Studi Pendidikan Biologi, Universitas Negeri Makassar. Penulis bekerja sebagai Dosen non-PNS di Program Studi Agronomi Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Amal Ilmiah Yapis Wamena.

Penulis aktif mempublikasikan artikel ilmiah di jurnal nasional. Dan Aktif mengikuti kegiatan kolaborasi menulis buku pada beberapa penerbit. Judul buku yang telah terbit: Fitopatologi, Agroteknologi Berkelanjutan: Menuju Pertanian Ramah Lingkungan. Kesuburan Tanah dan Hortikultura.



Leni Handayani, S.Pi., MP lahir di Kuala Pembuang Kalimantan Tengah pada tanggal 14 Juni 1982. Penulis menyelesaikan pendidikan sarjana pada Program Studi Budidaya Perairan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Palangka Raya. Penulis menyelesaikan pendidikan magister pada Program Studi Budidaya Perairan, Universitas Lambung Mangkurat. Penulis bekerja sebagai PNS daerah di Pemerintah Kabupaten Seruyan dari Tahun 2008 dan Tahun 2017 menjadi PNS Dpk pada Program Studi Budidaya Perairan dari 2008 sampai Tahun 2022, selanjutnya penulis aktif mengajar pada Program Studi Agribisnis Universitas Darwan Ali Tahun 2022 -sekarang. Penulis aktif mengikuti seminar, mempublikasi artikel pada jurnal nasional; aktif sebagai editor jurnal pada jurnal nasional; aktif sebagai penulis seperti buku: Mikrobiologi Lingkungan, Ekosistem Kolam Air Tawar, dan Nutrisi Kesehatan Ikan. Selain menulis, penulis juga aktif dalam kegiatan penelitian dan pengabdian. Salah satu penelitian yang diterima adalah hibah Penelitian Kerja Sama Multi tahun dengan Judul Pemanfaatan Bahan Aktif Tumbuhan Endemik Kabupaten Seruyan untuk Meningkatkan Produksi Ikan Nila (*Oreochromis niloticus*) Tahun 2023 -2025 dan kegiatan pengabdian dengan hibah Program Kemitraan Masyarakat (PKM) Tahun 2024 yang berjudul Pemberdayaan Kelompok Wanita Tani Alam Lestari melalui Penerapan Teknologi Akuaponik sebagai Solusi Alternatif Perbaikan Usaha Pertanian di Desa Lampuyang



Dr. Ir. Suryati Tjokodiningrat, M.Si. Lahir di Manado Sulawesi Utara pada Agustus 1963. Penulis menempuh pendidikan sarjana pada Program Studi Hama dan Penyakit Tanaman Universitas Sam Ratulangi (UNSRAT). Pendidikan Magister jurusan Ilmu Tanaman Program Pascasarjana Universitas Sam Ratulangi. Pendidikan Program Doktor di Program Studi Ilmu Pertanian Universitas Brawijaya (UB). Penulis bekerja sebagai tenaga pengajar di Program Studi Budidaya Tanaman (Sekarang Program Studi Agroteknologi), Fakultas Pertanian Universitas Khairun tahun sejak tahun 1994 sampai sekarang. Penulis aktif mengikuti seminar, aktif mempublikasi artikel pada jurnal nasional dan internasional bereputasi. Penulis aktif sebagai reviewer pada jurnal pascasarjana Universitas Khairun.



Sangkalan, S.Si., M.Si lahir di Borong Sapiri, Kabupaten Gowa, Sulawesi Selatan pada tanggal 22 September 1990. Penulis menempuh pendidikan sarjana pada Program Studi Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Makassar tahun 2009 sampai 2014. Penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang magister pada Program Studi Agroteknologi, Universitas Hasanuddin, Makassar tahun 2017 sampai 2019. Saat ini penulis bekerja sebagai Dosen PNS pada Program Studi Agrobisnis, Jurusan Agribisnis, Politeknik Negeri Sambas, Kalimantan Barat sejak tahun 2020 sampai sekarang. Penulis aktif melakukan riset dan mempublikasikan hasil penelitian di beberapa jurnal ilmiah. Judul buku yang telah ditulis adalah [*Budidaya Tanaman Kopi Dan Olahannya Untuk Kesehatan*](#) (2023), [*Minyak Kelapa dan Minyak Sawit: Dampak Kesehatan, Lingkungan, Ekonomi dan Sosial di Balik Produksi*](#) (2023) dan [*Potensi dan Strategi Pengembangan Tanaman Aneka Kacang sebagai Bahan Baku Industri*](#) (2024), dan [*Pertanian Hortikultura*](#) (2024).



Heny Ekawati Haryono, M.Pd lahir di Lamongan pada tanggal 22 Januari 1991. Penulis menyelesaikan pendidikan sarjana pada Program Studi Pendidikan Fisika, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Negeri Surabaya tahun 2012. Penulis menyelesaikan pendidikan magister pada Program Studi Pendidikan Sains, Sekolah Pascasarjana Universitas Negeri Surabaya tahun 2014. Penulis bekerja sebagai tenaga pengajar di Program Studi Pendidikan Matematika, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Islam Darul 'Ulum Lamongan dari tahun 2013-sekarang.

Penulis aktif mengikuti seminar, mempublikasi artikel pada jurnal nasional dan internasional bereputasi; aktif sebagai asesor BAN-PDM Provinsi Jawa Timur, aktif sebagai Fasilitator Sekolah Penggerak angkatan 3; aktif sebagai penulis, seperti buku : [Kimia Dasar](#), [Kalor : Fisika SMP](#), [Ilmu Alamiah Dasar](#), Fisika Dasar I.



Shubzan Andi Mahmud SP., M.Si, Lahir di Ternate, Provinsi Maluku Utara pada tanggal 17 September 1973. Penulis menyelesaikan Pendidikan sarjana program studi budidaya Tanaman, Fakultas Pertanian Universitas Khairun Ternate tahun 1997. Penulis menyelesaikan pendidikan Magister pada program studi Agronomi pada Pascasarjana Universitas Sam Ratulangi Manado. Penulis diangkat sebagai PNS sejak tahun 2001 dan sejak tahun 2010 bekerja sebagai tenaga pengajar PNS di program studi Agroteknologi Fakultas Pertanian Universitas Khairun Ternate.

1



Dr. Rima Melati, SP., MP lahir di Ternate pada tanggal 12 Maret 1977. Penulis menyelesaikan pendidikan sarjana pada Program Studi Agronomi Fakultas Pertanian, Universitas Khairun (Unkhair) tahun 2000. Penulis menyelesaikan pendidikan Magister pada Program Studi Ilmu Tanaman- Minat Hortikultura Fakultas Pertanian Universitas Brawijaya tahun 2010 melalui Program Beasiswa Pendidikan Pasca Sarjana (BPPS) Kemendikbud.

Pendidikan Program Doktor selesai pada tahun 2019 di Program Studi Ilmu Pertanian Minat Agronomi Hortikultura Fakultas Pertanian Universitas Brawijaya melalui Program Beasiswa Pendidikan Pasca Sarjana (BPPS) Kemenristek-Dikti. Penulis bekerja sebagai tenaga pengajar PNS di Program Studi Agronomi - Agroteknologi Fakultas Pertanian Universitas Khairun, tahun 2006-sekarang. Penulis aktif mengikuti seminar, mempublikasi artikel pada jurnal nasional dan internasional dan menulis di media massa dengan judul : Keanekaragaman Hayati-Apa dan Mengapa, Taman Islami, Produksi Tanaman dan Tinjauan Ilmu Pengetahuan dan Bisnis, Produksi Tanaman sebagai Suatu Seni, Seni Herbarium : Inovasi Ilmu Science menjadi Science Terapan dan Kubermas dan *Clitoria ternatea*. Judul Book Chapter yang pernah ditulis Pertanian Hortikultura 2024.



Laswi Irmayanti, S.Hut., M.Si lahir di Tuban pada tanggal 23 Agustus 1988. Penulis menyelesaikan pendidikan sarjana pada Departemen Silvikultur, Fakultas Kehutanan, Institut Pertanian Bogor pada tahun 2011. Penulis menyelesaikan pendidikan magister pada Program Studi Silvikultur Tropika, Sekolah Pascasarjana Institut Pertanian Bogor tahun 2015 melalui program Beasiswa Unggulan (BU).

Penulis bekerja sebagai teknisi di Laboratorium Silvikultur, Fakultas Kehutanan, Institut Pertanian Bogor tahun 2013-2015. Kemudian sebagai Dosen non-PNS di Program Studi Kehutanan, Sekolah Tinggi Pertanian Labuha, Halmahera Selatan tahun 2016-2018, dan diterima menjadi ASN di Universitas Khairun pada Maret 2019-sekarang, dengan penempatan di Program Studi Kehutanan, Fakultas Pertanian. Mata kuliah yang diampu Penulis diantaranya : Bioteknologi Pohon, Genetika Hutan, Teknologi Benih, Silvikultur, Pemantauan Kesehatan Hutan, Ilmu Hama dan Penyakit Hutan.

Penulis aktif mengikuti seminar, mempublikasi artikel pada jurnal nasional dan internasional bereputasi; aktif sebagai reviewer pada jurnal nasional dan internasional; serta aktif dalam kepengurusan maupun keanggotaan beberapa organisasi, diantaranya : Masyarakat Silvikultur Indonesia (MasSI) (2020-2022), Perhimpunan Meteorologi Pertanian Indonesia (2019-2023), Kelompok Kerja Mangrove Daerah (KKMD) Provinsi Maluku Utara (2022-2026), dan Forum Koordinasi Daerah Aliran Sungai Moloku Kie Raha (2023-2027).

Penulis mendapatkan pendanaan ekspedisi dan/atau eksplorasi gelombang II dari Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) tahun anggaran 2022, dengan judul : "Eksplorasi Malapari (*Pongamia pinnata* L. Pierre) Sumber Bahan Baku Energi Baru Terbarukan di Indonesia Bagian Timur".

FISILOGI TUMBUHAN

Fisiologi tumbuhan merupakan bidang yang sangat penting yang diajarkan di beberapa program studi seperti Biologi, Agronomi, Agroteknologi ataupun Kehutanan. Sebagai pengetahuan dasar, Fisiologi Tumbuhan menjadi acuan untuk memahami proses-proses yang terjadi di dalam tumbuhan ataupun tanaman budidaya. Di dalamnya pendalaman tentang gambaran berbagai organ tumbuhan baik anatomi dan morfologi, proses-proses fotosintesis dan berbagai kegiatan seperti respirasi dan transportasi air dan nutrient, perkembangbiakan tumbuhan dan berbagai gerak pada tumbuhan, interaksi tumbuhan dengan lingkungan dan fisiologi stress pada tumbuhan hingga bioteknologi tumbuhan dan berbagai proses lain yang melibatkan proses kimia dan fisis diperjelas. Pemahaman yang komprehensif dari Fisiologi Tumbuhan akan memberikan pengetahuan dan inovasi untuk memanfaatkan proses-proses ini bagi kesejahteraan manusia, terutama dalam peningkatan produktifitas tanaman pangan, sandang dan papan, serta memberikan dasar bagi konservasi tumbuhan itu sendiri dan keuntungan bagi lingkungan di sekitarnya.

Buku ini menghantarkan pembaca untuk memiliki pengetahuan yang komprehensif tentang Fisiologi Tumbuhan. Pembaca berlatar belakang beragam, baik akademisi yakni dosen dan mahasiswa maupun peminat fisiologi tumbuhan dapat menjadikan buku ini sebagai buku wajib yang sangat penting untuk dimiliki dan dibaca, dengan pembahasan yang ringan, aktual dan cukup lengkap, menjadikan buku ini dapat menjadi buku pegangan bagi peminat tumbuhan ataupun tanaman.



Penerbit KAMIYA JAYA AQUATIC
RT 008 RW 003 Kelurahan Fitu, Kecamatan Ternate Selatan,
Kota Ternate, Maluku Utara
Telp. : 0812-2279-3284
Email : kamiyajayaaquatic@gmail.com
Website : <https://kjaquatic.com/>

