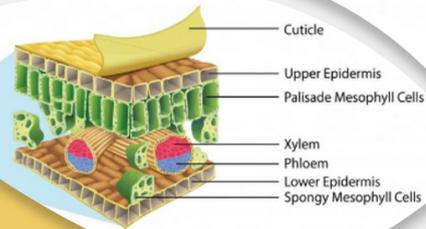


# DASAR-DASAR FISIOLOGI TUMBUHAN



- Mismawarni Srima Ningsih
- Edi Susilo
- Rahmadina
- Friskia Hanatul Qolby
- Dian Diani Tanjung
- Ulfah Anis
- Eka Susila N
- Nurul Huda Panggabean
- Sapto Priyadi
- Jumaria Nasution
- Novi Yulanda Sari
- Raisa Baharuddin
- Muhammad Parikesit Wisnubroto



# **DASAR-DASAR FISIOLOGI TUMBUHAN**

**Mismawarni Srima Ningsih  
Edi Susilo  
Rahmadina  
Friskia Hanatul Qolby  
Dian Diani Tanjung  
Ulfah Anis  
Eka Susila N  
Nurul Huda Panggabean  
Sapto Priyadi  
Jumaria Nasution  
Novi Yulanda Sari  
Raisa Baharuddin  
Muhammad Parikesit Wisnubroto**



**CV HEI PUBLISHING INDONESIA**

# **DASAR-DASAR FISILOGI TUMBUHAN**

**Penulis :** Mismawarni Srma Ningsih

Edi Susilo

Rahmadina

Friskia Hanatul Qolby

Dian Diani Tanjung

Ulfah Anis

Eka Susila N

Nurul Huda Panggabean

Sapto Priyadi

Jumaria Nasution

Novi Yulanda Sari

Raisa Baharuddin

Muhammad Parikesit Wisnubroto

**ISBN :** 978-623-89104-4-1

**Editor :** Tri Putri Wahyuni, S.Pd.

**Penyunting :** Lira Muhandi, S.Pt.

**Desain Sampul dan Tata Letak :** Gebi Dwi Syafitri, S.Pd.

**Penerbit :** CV HEI PUBLISHING INDONESIA

Nomor IKAPI 043/SBA/2023

**Redaksi :**

Jl. Air Paku No.29 RSUD Rasidin, Kel. Sungai Sapih, Kec Kuranji

Kota Padang Sumatera Barat

Website : [www.HeiPublishing.id](http://www.HeiPublishing.id)

Email : [heipublishing.id@gmail.com](mailto:heipublishing.id@gmail.com)

Cetakan pertama, Maret 2024

Hak cipta dilindungi undang-undang

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

## KATA PENGANTAR

Dengan penuh kehormatan dan rasa terima kasih, kami dengan bangga mempersembahkan buku ini kepada para pembaca yang budiman. Buku ini adalah hasil dari upaya kolaboratif dari para penulis yang berpengalaman dan berdedikasi dalam bidang fisiologi tumbuhan, yang bertujuan untuk menyajikan pengetahuan yang komprehensif dan mendalam tentang berbagai aspek penting dalam kehidupan tumbuhan.

Fisiologi tumbuhan adalah cabang ilmu yang mempelajari berbagai proses dan mekanisme yang terjadi dalam kehidupan tumbuhan, mulai dari respons mereka terhadap lingkungan hingga proses-proses fundamental seperti fotosintesis dan respirasi. Buku ini didesain untuk menjadi panduan yang lengkap bagi mahasiswa, peneliti, dan para profesional yang tertarik dalam memahami dunia fisiologi tumbuhan.

Setiap bab dalam buku ini secara sistematis membahas topik-topik penting dalam fisiologi tumbuhan, dimulai dari konsep dasar hingga aplikasi dalam konteks lingkungan. Mulai dari pengertian fisiologi tumbuhan, sifat-sifat air, kebutuhan hara, hingga proses-proses kompleks seperti pengangkutan bahan organik dan respons tumbuhan terhadap lingkungan, setiap bab disusun dengan teliti dan mendalam.

Kami berharap buku ini dapat menjadi sumber pengetahuan yang berharga dan bermanfaat bagi pembaca dalam memahami kompleksitas dunia tumbuhan. Kami mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam pembuatan buku ini, dan semoga buku ini dapat memberikan inspirasi dan pemahaman yang luas tentang fisiologi tumbuhan.

Padang, Maret 2024

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>i</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>ii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>vi</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>x</b>
<b>BAB 1 KONSEP DASAR FISILOGI TUMBUHAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Pengertian Fisiologi Tumbuhan.....	1
1.2 Sejarah Fisiologi Tumbuhan.....	3
1.3 Pembagian Fisiologi Tumbuhan .....	4
1.4 Fungsi Fisiologi Tumbuhan.....	6
1.5 Hubungan Fisiologi Tumbuhan dengan Cabang Botani Lainnya .....	7
1.6 Sepuluh Konsep Dasar Fisiologi Tumbuhan .....	8
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>10</b>
<b>BAB 2 SIFAT - SIFAT AIR DAN LARUTAN .....</b>	<b>11</b>
2.1 Peran Air pada Tumbuhan .....	11
2.2 Sifat-Sifat Air yang Bermanfaat bagi Tumbuhan.....	12
2.3 Proses Difusi dan Osmosis .....	14
2.4 Faktor yang Mempengaruhi Difusi dan Osmosis.....	21
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>23</b>
<b>BAB 3 HUBUNGAN AIR DENGAN TUMBUHAN.....</b>	<b>25</b>
3.1 Ruang lingkup Air.....	25
3.2 Jenis-Jenis Air.....	26
3.3 Waktu Pemberian Air yang Baik .....	27
3.4 Jenis Air yang Baik untuk Tanaman.....	27
3.5 Sifat kimia dan Fisika Air.....	28
3.6 Peranan Air bagi Tumbuhan .....	29
3.7 Hubungan Air dengan Tumbuhan .....	35
3.8 Kesimpulan .....	37
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>39</b>

<b>BAB 4 KEBUTUHAN DAN PERANAN HARA BAGI</b>	
<b>TUMBUHAN.....</b>	<b>43</b>
4.1 Pendahuluan.....	43
4.2 Pembagian Unsur Hara .....	44
4.3 Peran Unsur Hara Makro Bagi Tanaman .....	48
4.4 Kebutuhan Unsur Hara yang Ideal bagi Tanaman .....	55
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>57</b>
<b>BAB 5 PENGANGKUTAN BAHAN ORGANIK DALAM</b>	
<b>FLOEM.....</b>	<b>59</b>
5.1 Pendahuluan.....	59
5.2 Bentuk dan struktur floem .....	60
5.3 Jalur dan Pola Translokasi .....	63
5.4 Bahan yang Ditranlokasi dalam Floem.....	64
5.5 Mekanisme Translokasi Pada Floem.....	67
5.6 Alokasi dan Partisi Fotosintat.....	74
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>77</b>
<b>BAB 6 PROSES FOTOSINTESIS.....</b>	<b>79</b>
6.1 Fotosintesis .....	79
6.2 Tempat Fotosintesis pada Tumbuhan.....	81
6.3 Tahapan Fotosintesis.....	86
6.4 Perkembangan Kloroplas.....	88
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>92</b>
<b>BAB 7 PROSES RESPIRASI.....</b>	<b>93</b>
7.1 Pengertian Respirasi.....	93
7.2. Tahapan Proses Respirasi pada Tumbuhan .....	96
7.3 Jenis Respirasi pada Tumbuhan .....	100
7.4 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Laju Respirasi .....	103
7.5 Hubungan Fotosintesis dan Respirasi.....	105
7.6 Zat Penghambat Respirasi.....	106
7.7 Penutup.....	107

<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>108</b>
<b>BAB 8 METABOLISME NITROGEN DAN SULFUR.....</b>	<b>111</b>
8.1. Pendahuluan.....	111
8.2 Metabolisme Nitrogen .....	117
8.3 Metabolisme Sulfur .....	122
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>129</b>
<b>BAB 9 LIPID / LEMAK .....</b>	<b>131</b>
9.1 Pengantar Lipid dalam Tanaman .....	131
9.2 Klasifikasi dan Distribusi Lipid .....	139
9.3 Biosintesis dan Penyimpanan Lipid .....	147
9.4 Interaksi Lipid dengan Faktor Lingkungan.....	157
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>180</b>
<b>BAB 10 PERTUMBUHAN DAN PERKEMBANGAN .....</b>	<b>189</b>
10.1 Jenis Pertumbuhan dan Perkembangan Tanaman.....	189
10.2 Tahap pertumbuhan dan perkembangan .....	191
10.3 Faktor Perkembangan Tanaman .....	193
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>199</b>
<b>BAB 11 HORMON DAN ZAT PENGATUR TUMBUH PADA TUMBUHAN .....</b>	<b>201</b>
11.1 Pengertian Hormon dan Zat Pengatur Tumbuh (ZPT) .....	201
11.2 Perbedaan Hormon dan Zat Pengatur Tumbuh .....	202
11.3 Macam-macam Hormon dan Zat Pengatur Tumbuh.....	204
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>218</b>
<b>BAB 12 GERAK YANG TERJADI PADA TUMBUHAN.....</b>	<b>219</b>
12.1 Macam Gerak Tumbuhan .....	220
12.2 Gerak Tropisme .....	221
12.3 Gerak Nasti .....	228
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>233</b>
<b>BAB 13 FISILOGI LINGKUNGAN .....</b>	<b>235</b>
13.1 Konsep Fisiologi Lingkungan.....	235

13.2 Faktor Lingkungan yang Memengaruhi Proses Fisiologi.....	236
13.3 Tanggapan Tumbuhan terhadap Lingkungan .....	240
13.4 Cekaman dan Adaptasi Tumbuhan dalam Menghadapinya? .....	243
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>252</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 5. 1. Aliran massa pada translokasi di floem .....	69
Gambar 5. 2. Pengisian sukrosa ke dalam floem .....	70
Gambar 6. 1. Proses Fotosintesis secara singkat.....	79
Gambar 6. 2. Contoh beberapa organisme fotoautotrof yang mengalami proses fotosintesis.....	80
Gambar 6. 3. Penyerapan spectra .....	82
Gambar 6. 4. Perbedaan struktur klorofil a dan klorofil b .....	83
Gambar 6. 5. Organel tempat fotosintesis.....	84
Gambar 6. 6. (A) Struktur internal kloroplas bila dilihat dari mikroskop electron (B) Grana, tilakoid dan lumen yang dapat dilihat lebih jelas.....	85
Gambar 6. 7. Reaksi terang dan Siklus Calvin pada Fotosintesis .....	87
Gambar 7. 1. Respirasi pada tumbuhan sebagai proses masuknya masuknya Oksigen ( $O_2$ ) dan dilepaskannya karbondioksida ( $CO_2$ ) melalui alat pernafasan tumbuhan yang paling penting (stomata) (Sumber gambar: <a href="https://asset.kompas.com/">https://asset.kompas.com/</a> ,jpg ) .....	94
Gambar 7. 2. Tahapan proses respirasi Aerob; Glikolisis, dekarboksilasi oksidatif, siklus Krebs dan rantai electron.....	100
Gambar 7. 3. Jenis respirasi pada tumbuhan .....	102
Gambar 8. 1. Produksi metabolit melalui metabolisme N dan C di tumbuhan. Tumbuhan mengasimilasi C dan N anorganik menjadi asam amino dan gula melalui proses asimilasi N dan fotosintesis. Elips berwarna hijau melambangkan metabolit yang mengandung N, sedangkan elips berwarna merah menunjukkan metabolit fotosintesis. Sejak N dan C metabolisme terkoordinasi erat dalam jalur metabolisme, tingkat metabolit yang termasuk dalam jalur metabolisme	

seharusnya dipengaruhi oleh status N dan C. Namun karena jumlahnya banyak reaksi reversibel dan kompleks, khususnya pada metabolisme sentral, seringkali sulit untuk mengamati perubahan besar dalam tingkat metabolit. .... 118

Gambar 8. 2. Asimilasi nitrogen pada tumbuhan. A: Diagram asimilasi N. B: Enzim yang terlibat dalam asimilasi N berpartisipasi dalam berbagai proses biologis. Terkait asimilasi N enzim dalam Arabidopsis, beras, jagung, dan gandum dirangkum. Proses biologis terlibat dalam asimilasi N primer di akar dan pucuk (reduksi nitrat, ammonium asimilasi), metabolisme N selama fotorespirasi, penuaan dan pengisian biji-bijian. NR, nitrat reduktase; NiR, nitrit reduktase; GS, glutamin sintetase; GOGAT, glutamin-2-oksoglutarat aminotransferase; ASN, asparagin sintetase; CPSase, sintetase karbamoilfosfat; GDH, glutamat dehidrogenase; Glu, glutamat; Gln, glutamin; 2-OG, 2-oksoglutarat; Asp, aspartat; Asn, asparagin; CP, karbamoilfosfat. .... 121

Gambar 8. 3. Proses setelah Adenylation of Sulfate (APS) digunakan dalam reaksi sulfasi atau reduksi dan asimilasi sistein. PAPS dengan Choline Sulfotransferase mengkatalisis O-sulfat dari beragam metabolit. Sulfasi choline oleh choline sulfotransferase digambarkan pada baris atas. PAPS terbentuk dari ATP dan berphosforilasi menjadi APS. Sintesis sistein berkoordinasi dengan jalur reduksi sulfat (baris tengah) dan jalur paling depan untuk sintesis OAS (baris bawah). Enzyme ditunjukkan dengan huruf besar dan hasil metabolit dengan huruf kecil. .... 124

Gambar 8. 4. proses transportasi pada asimilasi sulfur primer. Sulfat diambil oleh sel akar dengan bantuan SULTR1;1 (1) dan SULTR1;2 (2). Setelah melintasi membran plasma epidermis dan akar kortikal sel, sulfat diangkut melalui rangkaian pengangkut sulfat (SULTR) yang berada pada berbagai membran dalam tumbuhan. SULTR4;1 dan SULTR4;2 penting untuk aliran efflux dari vakuola ke dalam sitoplasma (3). Pengangkut yang penting untuk masuknya sulfat ke dalam vakuole masih tidak diketahui. Pemasukan sulfat ke dalam kloroplas mungkin terjadi karena SULTR3;1 dan mungkin anggota subfamili SULTR3 lainnya (4) PAPS diproduksi baik di kloroplas dan sitoplasma dan dapat pertukaran antara kompartemen ini dengan transporter PAPST/TAAC (5). Yang diketahui transporter tiol (GSH/Gluthation dan  $\gamma$ EC) adalah transporter yang resistan terhadap klorokuin (CRT)-seperti protein atau CRL (6). Namun, sistem transportasi alternative karena tiol dalam membran plastida diharapkan ada. Dengan cara yang sama, Pengangkut GSH ke mitokondria masih menunggu penemuan. S-adenosil metionin transporter1 (SAMT1; 7) adalah protein kloroplasida terlibat dalam pertukaran SAM dengan S-adenosil homo sistein, itu produk sampingan dari reaksi metilasi yang harus diregenerasi menjadi SAM di sitoplasma. Hal ini juga terjadi pada plasmalemma yang merupakan tempat transporter dari S-methylmethionine (SMM) dan GSH/Gluthatione, yang berperan penting untuk mereduksi sulfur sehingga perlu dikeluarkan dari

	sel. APS,adenosine5-phosphosulfate; Cys,cysteine; OAS,O-acetylserine;γEC,γ-glutamylcysteine; GSH, glutathione; SAM, S-adenosylmethionine; PAPS, 3_-phosphoadenosine-5_-phosphosulfate; PAP,3_-phosphoadenosine 5_-phosphate. Garis putus-putus menunjukkan secara teoritis kemungkinan jalur transportasi.....	125
Gambar 9. 1.	Skema metabolisme sterol terkonjugasi pada tanaman, dan enzim yang terlibat: acyl CoA:sterol acyltransferase (ASAT), fosfolipid: sterol acyltransferase (PSAT), uridine diphosphate (UDP)-glucosa:sterol glycosyltransferase (SGT), steryl glycosida acyltransferase (SGAT), dan glucosylceramida synthase (GCS). .....	142
Gambar 9. 2.	Transfer reactive oxygen species (ROS) dan produk reaksinya, dan perannya dalam modifikasi oksidatif lipid pada tanaman. ....	173
Gambar 11. 1.	Bagian meristem apikal (ujung tanaman) sebagai tempat sintesisnya hormon auksin .....	205
Gambar 11. 2.	Pengaruh rasio auksin dan sitokinin dalam regulasi morfogenesis kultur jaringan .....	209
Gambar 12. 1.	Pecahnya kulit buah polong kedelai .....	220
Gambar 12. 2.	Pergerakan tumbuhan ke arah sumber cahaya.....	222
Gambar 12. 3.	Pergerakan hormon auksin akibat rangsangan cahaya.....	223
Gambar 12. 4.	Seismonasti pada tanaman Putri Malu ( <i>Mimosa pudica</i> ) Sumber: Sen, 2023 .....	230
Gambar 12. 5.	Gerak niktinasti pada tanaman trembesi ( <i>Samanea saman</i> ) pada pagi dan malam hari .....	231

## DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1. Sifat fisik air .....	29
Tabel 6. 1. Klasifikasi Gen terkait Penuaan.....	89
Tabel 7. 1. Energi berupa ATP yang dapat dihasilkan pada respirase aerob.....	101
Tabel 8. 1. Fungsi unsur hara makro dan bentuk yang tersedia bagi tanaman.....	113
Tabel 8. 2. Fungsi unsur hara mikro dan bentuk yang tersedia bagi tanaman.....	115

# BAB 1

# KONSEP DASAR FISILOGI

# TUMBUHAN

Oleh Mismawarni Srima Ningsih

## 1.1 Pengertian Fisiologi Tumbuhan

Istilah "fisiologi" berasal dari bahasa Latin, dimana "*physis*" merujuk pada alam dan "*logos*" merujuk pada pengetahuan. Fisiologi Tumbuhan adalah bidang biologi yang berfokus pada proses metabolisme yang terjadi di dalam tubuh tumbuhan, yang sangat penting untuk mempertahankan kehidupan tumbuhan (Nursanti *et al.*, 2022). Fisiologi Tumbuhan adalah disiplin ilmu yang menyelidiki anatomi, mekanisme, dan aktivitas tumbuhan, termasuk proses-proses vital dan fenomena reproduksi.

Proses fisiologis yang rumit yang terjadi pada tumbuhan hidup merupakan subjek yang menarik untuk diteliti. Misalnya, pergerakan air dan garam terlarut dari akar ke bagian paling atas tumbuhan melalui saluran khusus. Selain itu, tubuh tumbuhan mengalami banyak proses kimiawi secara bersamaan. Tumbuhan memiliki kemampuan untuk beradaptasi dengan kesulitan baru dengan memodifikasi proses fisiologis internal mereka, yang membuat respons mereka terhadap perubahan lingkungan menjadi elemen yang menarik. Fisiologi, sebuah cabang biologi, menyelidiki

banyak proses biologis organisme, yang membutuhkan pemahaman kimia, fisika, dan matematika. Selain memahami prinsip-prinsip ilmiah mendasar, pemahaman menyeluruh tentang fisiologi tumbuhan sangat penting untuk kemajuan bidang-bidang praktis seperti pertanian, kehutanan, dan ilmu farmasi (Hardiyati, 2019).

Fisiologi tumbuhan mencakup pemeriksaan mekanisme, operasi, dan perilaku tumbuhan dalam mempertahankan dan mengendalikan keberadaannya. Hal ini memerlukan pemahaman mekanisme yang terjadi pada tingkat molekuler dan seluler di dalam organisme tumbuhan. Dengan mempelajari bidang fisiologi tumbuhan, kita dapat memperoleh wawasan tentang proses rumit yang digunakan tumbuhan untuk memanfaatkan sinar matahari untuk mensintesis karbohidrat dari air dan karbon dioksida. Selain itu, kita dapat memahami alasan yang mendasari kebutuhan tumbuhan akan air, mekanisme rumit yang mengatur perkecambahan biji, dan manifestasi gejala seperti layu selama periode kekeringan.

Studi fisiologi tumbuhan menawarkan wawasan yang berharga ke dalam beberapa aspek keberadaan tumbuhan. Penelitian ini berfokus pada berbagai spesies tumbuhan, termasuk bakteri serta tumbuhan tingkat tinggi seperti Gymnospermae (tumbuhan berbiji) dan angiospermae (tumbuhan berbiji tertutup), termasuk monokotil dan dikotil (Hardiyati, 2019).

## 1.2 Sejarah Fisiologi Tumbuhan

Beberapa disiplin ilmu lain telah bermunculan dari bidang fisiologi, mengingat sejarahnya yang panjang. Bidang keilmuan penting yang muncul dari topik ini meliputi Biokimia, Biofisika, Biomekanika, Genetika Sel, Farmakologi, dan Ekofisiologi. Bidang biologi molekuler telah sangat mempengaruhi arah penelitian fisiologi (Khairuna, 2019). Fisiologi, yang berasal dari bahasa Latin, mengacu pada studi tentang ilmu pengetahuan alam dan prinsip-prinsip ilmiah. Fisiologi Tumbuhan, sebagai salah satu disiplin ilmu biologi, menyelidiki aktivitas metabolisme yang terjadi di dalam organisme tumbuhan, yang memfasilitasi kemampuannya untuk bertahan hidup. Laju metabolisme tumbuhan dapat dipengaruhi oleh variabel lingkungan mikro (Khairuna, 2019).

Kemajuan biologi molekuler juga berdampak pada lintasan penyelidikan Fisiologi. Asal-usul Fisiologi manusia dapat ditelusuri kembali ke sekitar tahun 420 SM, ketika Hippocrates yang sering dianggap sebagai nenek moyang kedokteran, memberikan kontribusi yang signifikan pada bidang ini. Fokus Aristoteles pada korelasi antara struktur dan fungsi menghasilkan kemajuan yang signifikan. Kata "Fisiologi" digunakan oleh Jean Fernel pada tahun 1525, dan bidang Fisiologi eksperimental muncul pada abad ke-17 ketika William Harvey memberikan deskripsi tentang sirkulasi darah.

Kajian Fisiologi mengalami kemajuan yang signifikan pada abad ke-19, terutama dengan penemuan penting teori sel oleh Schleiden dan Schwann pada tahun 1838. Claude Bernard menggunakan istilah "milieu interieur" untuk merujuk pada gagasan homeostasis. Subdisiplin ilmu seperti Fisiologi Komparatif,

Ekofisiologi, dan Fisiologi Evolusioner muncul sepanjang abad ke-20.

Fisiologi hewan dan tumbuhan memiliki pengaruh yang signifikan dalam bidang sains. Disiplin ilmu ini berfokus pada berbagai proses fisiologis tubuh dan fungsi organisme hidup, termasuk pemahaman tentang fungsi kehidupan yang rumit dan beragam. Studi fisiologi hewan berasal dari teknik dan metodologi yang digunakan dalam fisiologi manusia, yang kemudian diperluas ke spesies hewan lainnya. Ekofisiologi adalah subjek fisiologi yang menyelidiki pengaruh faktor ekologi pada organisme, serta dampak lingkungan dan stres pada fungsi tubuh (Khairuna, 2019).

### **1.3 Pembagian Fisiologi Tumbuhan**

Fisiologi tumbuhan berfokus pada proses metabolisme yang terjadi pada tumbuhan. Fisiologi tumbuhan sering dikategorikan ke dalam beberapa bagian berdasarkan cakupan pokok bahasannya, karena kemajuannya yang pesat, yang didukung oleh kemajuan dalam bidang kimia dan fisika.

#### **1. Fisiologi tumbuhan**

Fisiologi tumbuhan menyelidiki proses metabolisme yang terjadi pada tumbuhan yang dibudidayakan. Mengingat bahwa budidaya tumbuhan bertujuan untuk menghasilkan hasil yang dapat digunakan oleh manusia, maka sudah sepantasnya fisiologi tumbuhan memprioritaskan aktivitas metabolisme yang berkontribusi pada penciptaan dan pertumbuhan organ-organ berikutnya. Biasanya, organ-organ yang berkembang sebagai konsekuensinya dapat mencakup buah, biji, daun, akar, umbi, dan sebagainya (Fauziah, 2021).

## **2. Fisiologi pascapanen**

Fisiologi pascapanen mempelajari mekanisme fisiologis yang terjadi pada organ yang dipanen. Proses yang terjadi sebagian besar bersifat katabolik, khususnya melibatkan penguraian makromolekul kompleks seperti karbohidrat, selulosa, protein, lipid, dan asam nukleat menjadi molekul-molekul kecil yang lebih sederhana. Keuntungan utama dari memanipulasi laju proses katabolik untuk memperpanjang kesegaran organ yang dipanen adalah aspek utama dari penelitian fisiologis pasca panen (Sudjatha & Wisaniyasa, 2017).

## **3. Ekofisiologi**

Ekofisiologi mengkaji bagaimana kondisi lingkungan mempengaruhi proses metabolisme tumbuhan, termasuk efek yang menguntungkan (bermanfaat) dan merugikan (merusak) pada tumbuhan dan manusia. Unsur-unsur lingkungan dapat dikategorikan ke dalam dua jenis utama: lingkungan abiotik, yang mengacu pada aspek fisik, dan lingkungan biotik, yang mencakup organisme hidup. Ekofisiologi terutama berfokus pada dampak elemen lingkungan yang tidak hidup, seperti intensitas cahaya, lama pencahayaan, kualitas cahaya, suhu, kelembapan, perubahan konsentrasi gas di atmosfer, dan kualitas fisik dan kimia tanah. Bidang ekofisiologi yang secara khusus meneliti reaksi fisiologis tumbuhan terhadap situasi lingkungan yang tidak ideal disebut sebagai "fisiologi stres" (Fauziah, 2021).

#### **4. Fisiologi benih**

Proses perkecambahan biji memiliki banyak langkah yang berbeda, termasuk imbibisi, pengaktifan kembali enzim, pemecahan bahan yang tersimpan, dan perluasan radikula. Fisiologi benih adalah subbidang fisiologi tumbuhan yang berfokus pada proses biologis yang terjadi selama perkecambahan benih. Empat contoh cabang yang disebutkan di atas dalam bidang fisiologi tumbuhan adalah titik fokus dari argumen yang paling menonjol. Selain itu, ada bidang fisiologi tumbuhan lain yang muncul, seperti fisiologi perkembangan dan fisiologi herbisida. Fisiologi perkembangan tumbuhan mencakup mekanisme ekspansi dan pembelahan sel, pembentukan dan pertumbuhan organ tumbuhan, serta keterlibatan hormon dalam fotomorfogenesis. Herbisida fisiologis menyelidiki dampak pestisida terhadap metabolisme tumbuhan (Fauziah, 2021).

### **1.4 Fungsi Fisiologi Tumbuhan**

Peran fisiologi tumbuhan, sebagai bidang studi, dapat didefinisikan sebagai berikut (Khairuna, 2019):

1. Manfaat bagi kehidupan manusia: Fisiologi tumbuhan berfungsi sebagai peta jalan untuk memenuhi kebutuhan hidup manusia dengan memanfaatkan potensi tumbuhan. Hal ini mencakup pemenuhan kebutuhan pangan, obat-obatan, konstituen kosmetik, tekstil, daya pikat visual, bahan ritual adat, input industri, dan sumber daya untuk infrastruktur pemukiman (Fauziah, 2021).

2. Membangun lingkungan yang kondusif dan menyehatkan: Prinsip-prinsip fisiologi tumbuhan dapat digunakan sebagai cetak biru untuk membangun suasana yang menyenangkan, aman, dan meningkatkan kesehatan. Selama fotosintesis, tumbuhan menghasilkan karbohidrat dan secara bersamaan mengeluarkan oksigen (O<sub>2</sub>). Oleh karena itu, kehadiran dedaunan yang lebat dapat menimbulkan sensasi yang menyenangkan dan menyegarkan di sekitarnya. Selain itu, karena sistem perakarannya yang kuat dan penyebarannya yang luas, tumbuhan memainkan peran penting dalam memitigasi terjadinya tanah longsor atau erosi (Fauziah, 2021).

## **1.5 Hubungan Fisiologi Tumbuhan dengan Cabang Botani Lainnya**

Berkembangnya topik-topik di berbagai disiplin ilmu telah menyebabkan konvergensi antara fisiologi tumbuhan dan berbagai subjek ilmiah lainnya, terutama botani. Fisiologi dan ekologi tumbuhan saling berhubungan, terutama dalam hal bagaimana tumbuhan bereaksi terhadap perubahan kondisi lingkungan. Perpotongan bidang-bidang ini menyebabkan munculnya disiplin ilmu yang berbeda yang disebut ekofisiologi atau fisiologi lingkungan (Angela, 2019).

Studi anatomi tumbuhan memainkan fungsi penting dalam kemajuan fisiologi tumbuhan, terutama dalam memahami komposisi membran dan organel sel yang rumit. Memahami ultrastruktur dan komponen membran tilakoid pada kloroplas sangat penting untuk menjelaskan mekanisme transpor elektron selama fase terang fotosintesis (Dhaniaputri, 2017).

Berdasarkan penjelasan tersebut, terlihat jelas bahwa hubungan antara fisiologi tumbuhan dan bidang botani lainnya cukup jelas. Selain itu, fisiologi tumbuhan memiliki hubungan yang erat dengan ilmu-ilmu dasar seperti kimia dan fisika, yang memberikan bantuan yang sangat penting.

## **1.6 Sepuluh Konsep Dasar Fisiologi Tumbuhan**

Berikut ini adalah 10 dalil tentang ilmu pengetahuan secara umum dan khususnya di bidang fisiologi tumbuhan, seperti yang diuraikan oleh (Hardiyati, 2019):

1. Fungsi tumbuhan dapat dijelaskan secara komprehensif oleh prinsip-prinsip dasar fisika dan kimia. Kemajuan dalam bidang fisika dan kimia memainkan peran penting dalam kemajuan fisiologi tumbuhan, karena bidang biologi terkait erat dengan kedua disiplin ilmu ini.
2. Ahli botani dan fisiologi tumbuhan memfokuskan studi mereka pada empat dari lima dunia makhluk yang diidentifikasi dalam kategorisasi biologi kontemporer, yaitu Monera, Protista, Fungi, dan Plantae.
3. Prinsip dasar teori sel menyatakan bahwa sel berfungsi sebagai blok bangunan fundamental kehidupan. Sel mengacu pada makhluk tanpa nukleus atau organel membran yang terorganisir, yang dikenal sebagai organisme senonistik.
4. Sel Eukariotik dan Sel Prokariotik: Sel eukariotik memiliki organel yang terikat membran, termasuk kloroplas, mitokondria, nukleus, dan vakuola, tetapi sel prokariotik tidak memiliki organel yang terikat membran.

5. Molekul Makro Khusus dalam Sel: Sel memiliki molekul makro yang khas, seperti pati dan selulosa, yang terdiri dari banyak gula atau senyawa lainnya. Sel tumbuhan dicirikan oleh makromolekul ini.
6. Sel memiliki molekul makro, termasuk protein dan asam nukleat (DNA dan RNA), yang terstruktur sebagai rantai dan membawa informasi turun-temurun antar generasi.
7. Organisme multiseluler terdiri dari sel-sel yang tersusun menjadi jaringan dan organ, yang masing-masing melakukan aktivitas yang berbeda. Menerapkan prinsip ini pada tumbuhan lebih menantang dibandingkan dengan mamalia.
8. Pertumbuhan Otonom Makhluk Hidup: Makhluk hidup memiliki kemampuan untuk bertambah besar secara otonom melalui proses-proses seperti pembelahan sel, ekspansi sel, dan diferensiasi.
9. Interaksi Lingkungan: Makhluk hidup mengalami pertumbuhan dan perkembangan di dalam lingkungannya dan terlibat dalam berbagai interaksi baik dengan lingkungannya maupun dengan makhluk hidup lainnya. Interaksi ini mencakup dampak dari faktor-faktor seperti suhu, cahaya, gravitasi, kelembapan, dan angin.
10. Saling ketergantungan antara struktur dan fungsi: Struktur dan fungsi makhluk hidup saling terkait secara rumit, dan fungsi tumbuhan bergantung pada pemahaman yang komprehensif mengenai anatomi, biologi sel, kimia struktural, dan kimia fungsional.

## DAFTAR PUSTAKA

- Angela, L. (2019). Pengembangan Modul Fisiologi Tumbuhan Berorientasi Konstruktivisme Dilengkapi Peta Pikiran. *Tarbawi: Jurnal Ilmu Pendidikan*, 15(1), 107–117. <https://doi.org/10.32939/tarbawi.v15i1.360>
- Dhaniaputri, R. (2017). Ilmu Botani Sebagai Dasar Keanekaragaman Jenis. *Prosiding SNPS UNS 2017*, 5(1), 338–345. <https://jurnal.fkip.uns.ac.id/index.php/snps/article/view/11443>
- Fauziah, A. (2021). *Pengantar Fisiologi Tumbuhan*. Biru Atmajaya: Tulung Agung.
- Hardiyati, T. (2019). *Struktur dan Fungsi Sel Tumbuhan*. Universitas Terbuka: Jakarta.
- Khairuna. (2019). *Diktat Fisiologi Tumbuhan*. Program Studi Pendidikan Biologi Fakultas Ilmu Tarbiyah dan Keguruan Universitas Islam Negeri Sumatera Utara: Medan.
- Nursanti, N., Adriadi, A. A., & Sai'in, S. (2022). Komponen Faktor Abiotik Lingkungan Tempat Tumbuh Puspa (*Schima Wallichii* Dc. Korth) Di Kawasan Hutan Adat Bulian Kabupaten Musirawas. *Jurnal Silva Tropika*, 5(2), 438–445. <https://doi.org/10.22437/jsilvtrop.v5i2.14566>
- Sudjatha, W., & Wisaniyasa, N. W. (2017). *Fisiologi Dan Teknologi Pascapanen (Buah Dan Sayuran)*. Udayana University Press: Bali.
- Yama, D. I., & Kartiko, H. (2020). Pertumbuhan dan Kandungan Klorofil Pakcoy (*Brassica rapa* L) Pada Beberapa Konsentrasi AB Mix Dengan Sistem Wick. *Jurnal Teknologi*, 12(1), 21–30.

## **BAB 2**

# **SIFAT - SIFAT AIR DAN LARUTAN**

Oleh Edi Susilo

### **2.1 Peran Air pada Tumbuhan**

Semua makhluk hidup di bumi, termasuk tumbuhan, menggunakan air sebagai sumber kehidupan utama. Air melakukan banyak hal bagi tanaman selain fotosintesis dan transportasi. Selama fotosintesis, air digunakan sebagai sumber energi. Fotosintesis menggunakan energi, sehingga tanaman membutuhkan lebih banyak air. Ini mengandung nutrisi yang membantu membuat protoplasma. Penyerapan unsur hara menyebabkan mineral masuk ke dalam tanaman dan didistribusikan ke seluruh tanaman. Senyawa yang berperan dalam reaksi tumbuhan. Reaksi yang mempengaruhi berbagai reaksi yang terjadi pada saat pembuahan. Ini menghasilkan energi mekanik selama pertumbuhan dan pembelahan, menjaga ekspansi sel tetap konstan dan dalam bentuk, dan mengontrol pembukaan dan penutupan stomata tanaman. Air juga dapat berperan sebagai sistem hidrolis, memberikan tekanan pada sel tumbuhan, menyebabkan turgor dinding sel, memanjangkan sel tumbuhan, dan berperan sebagai sumber berbagai aktivitas yang berkaitan dengan pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Ini membantu tanaman untuk melakukan aerasi. Ini adalah media untuk proses biokimia dan kendaraan transportasi untuk

mengangkut produk fotosintesis. Tumbuhan mengatur suhu karena mempunyai menyerap panas dan pengaturan.

Air sangat penting untuk memenuhi segala kebutuhan hidup, termasuk seluruh aktivitas yang dilakukan manusia, hewan, dan tumbuhan. Hampir semua makhluk hidup membutuhkan air yang berasal dari alam, baik itu air hujan, dialirkan ke sungai, atau ditampung oleh mesin pertambangan. Tumbuhan membutuhkan air untuk hidup dan tumbuh sepanjang waktu. Dengan cara ini dapat menghasilkan pohon-pohon tinggi yang menghasilkan daun, biji, dan buah yang baik. Tanpa air, tanaman menjadi kering. 80% berat kering tumbuhan adalah air. Oleh karena itu, air merupakan bagian tanaman yang tidak bisa ditinggalkan. Kalaupun lama tidak ditemukan air, tanaman akan mengering dan mati karena kekurangan air.

## **2.2 Sifat-Sifat Air yang Bermanfaat bagi Tumbuhan**

Air dimanfaatkan oleh tumbuhan karena mempunyai banyak sifat dan karakteristik yang unik. Beberapa sifat air yang dapat dimanfaatkan tanaman adalah kohesi, viskositas, polaritas, kelarutan, dan penguapan bila dipanaskan. Air memiliki banyak sifat dan karakteristik unik yang penting bagi kehidupan, salah satu contohnya adalah tumbuhan. Beberapa ciri-ciri air yang dapat dimanfaatkan oleh tumbuhan adalah: 1). Konsolidasi air memungkinkan tanaman menyerap air secara vertikal. Ada tiga teori berbeda tentang pepadatan: potensi air antara tanah dan udara, kemampuan dinding pembuluh xilem menahan molekul air di bawah tekanan, dan kohesi antar molekul air untuk membantu menjaga integritas kolom air di pembuluh xilem. 2). Adhesi: Adhesi

terjadi pada dinding xilem tanaman, menyebabkan aksi kapiler dan meningkatkan jumlah air dalam tabung sempit tanaman. Dengan adanya kekuatan ini, tindakan pembatasan tercipta. Tindakan sumbat menyebabkan air naik ke dalam tabung sempit karena membasahi dinding tabung dan menarik mortar ke atas. Adhesi antara molekul air dan dinding xilem menyebabkan air naik ke pembuluh xilem yang disebut kapiler. 3). Air yang bersifat polar berubah bentuk setelah melewati xilem tumbuhan, sifat polar air mengubah bentuk tetesan air setelah melewati xilem yang sedang tumbuh. 4). Sebagai pelarut, air diketahui sangat baik untuk tiga kelompok zat biologis (zat terlarut): bahan organik, ion bermuatan ( $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  dan  $NO_3^-$ ) dan molekul kecil. Filter dan Hay (1991) menemukan bahwa air merupakan pelarut yang baik untuk tiga kelompok biokimia. Asam amino, karbohidrat, protein dengan berat molekul rendah, dan air yang mengandung hidrogen, amina, atau asam karboksilat juga dapat membentuk ikatan ion hidrogen dengan senyawa organik. 5). Transpirasi: tumbuhan melakukan berbagai proses termodinamika untuk mengatur suhunya. Karena sifat penguapan air pada suhu tinggi, tumbuhan melakukan transpirasi untuk mengatur suhu.

Air sangat penting bagi tanaman dan semua makhluk hidup lainnya. Beberapa ciri-ciri air adalah merupakan air murni, karena mempunyai titik didih yang lebih tinggi dibandingkan semua jenis air lainnya, air dapat menyerap energi dalam jumlah besar tanpa menaikkan suhunya. Titik kepadatan terbesar adalah  $4^\circ C$ , sehingga air tidak membeku di lautan atau danau. Organisme hidup di dalamnya. Molekul air tidak mempunyai kemampuan untuk berikatan (menempel) dengan molekul lain, namun mempunyai kemampuan untuk berikatan satu sama lain. Ini sangat membantu

mengangkut air ke seluruh tanaman. Panas uap air sangat tinggi, sekitar  $540 \text{ cal gm}^{-1}$ , dan sangat efektif dalam menjaga suhu organisme. Air permukaan mempunyai tekanan yang tinggi dan mencapai ketinggian 120 cm di atas permukaan. Hal ini sangat bermanfaat bagi tanaman karena memungkinkan air bergerak bebas melalui ruang partikel dan di dinding sel tanaman. Air memiliki kemampuan yang baik dalam mentransmisikan cahaya sehingga membantu tumbuhan khususnya tumbuhan air untuk melakukan fotosintesis. Air juga memungkinkan cahaya menembus lebih dalam ke jaringan daun. Air dan kelembabannya pada suhu kamar merupakan elemen penting air bagi kehidupan. Air mengalir dengan mudah karena viskositasnya yang rendah. Hal ini memungkinkan air masuk ke dalam tubuh tanaman, yang sangat penting bagi kesehatan tanaman. Seluruh sifat fisik di atas menjadikan air sangat bermanfaat dalam berbagai aktivitas vital (Parwati, 2013).

### **2.3 Proses Difusi dan Osmosis**

Proses difusi dan osmosis pada tumbuhan mengangkut dan melepaskan zat ke seluruh tubuh tumbuhan. Kelompok tumbuhan dibagi menjadi dua. Pada tumbuhan tingkat rendah, seluruh tubuh menyerap air dan unsur hara terlarut. Namun pada tumbuhan tingkat tinggi fungsi transpor dilakukan oleh alat transpor yang dibentuk oleh xilem dan floem. Menurut Berg (2007), difusi, osmosis, absorpsi dan transpor aktif merupakan mekanisme yang memungkinkan terjadinya proses transpor tersebut, pergerakan adalah pergerakan molekul dan ion dari tempat konsentrasi tinggi ke daerah rendah, karena energi molekul. Perubahan konsentrasi

diakibatkan oleh perbedaan jumlah partikel per kelompok tergantung pada situasi. Perbedaan sifat selain perbedaan konsentrasi dapat menyebabkan difusi (Aqil, 2013). Proses difusi adalah pergerakan ion dan molekul dari konsentrasi tinggi (valensi tinggi) ke konsentrasi rendah (valensi rendah) dengan atau tanpa membran semipermeabel. Perbedaan konsentrasi menyebabkan kondensasi. Menurut Devia (2011), molekul berdifusi melalui tekanan dan pergerakan molekul dari larutan dengan konsentrasi tinggi ke larutan dengan konsentrasi rendah tanpa melalui membran yang disebut proses difusi. Menambahkan gula ke dalam teh biasa adalah contoh sederhana. Airnya terasa enak untuk sementara waktu. Contoh lainnya adalah uap air dari ketel yang menyebar melalui udara. Zat yang berbeda berbeda. Tujuan ventilasi adalah untuk memindahkan partikel zat seperti  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  ke dalam jaringan. Ada beberapa faktor penting yang mempengaruhi mobilitas partikel bahan-bahan tersebut. Proses pertukaran gas pada daun tumbuhan merupakan contoh difusi. Dalam proses ini, gas  $\text{CO}_2$  dari atmosfer memasuki stomata sel mesofil daun dan digunakan untuk fotosintesis. Karena  $\text{CO}_2$  yang masuk ke daun masih digunakan untuk fotosintesis pada siang hari, maka kadar  $\text{CO}_2$  di ruang antar sel daun lebih rendah dibandingkan di udara, sehingga  $\text{CO}_2$  dapat berdifusi dari atmosfer ke dalam daun pada siang hari. Demikian pula oksigen berdifusi ke atmosfer melalui pori-pori di antara sel-sel daun. Hal ini disebabkan oksigen dihasilkan selama fotosintesis dan terakumulasi di pori-pori sela-sela sel daun, yang konsentrasinya lebih besar dibandingkan konsentrasi oksigen di atmosfer (Heddy, 1990). Dalam kondisi tersebut, oksigen mengalir dari daun ke atmosfer.

Pada malam hari, fotosintesis tidak terjadi; namun, difusi terjadi, yang berarti ada peningkatan kandungan CO<sub>2</sub> dalam rongga antar sel. Laju difusi dipengaruhi oleh suhu medium dan densitas (kepadatan). Jika dibandingkan dengan zat cair, gas dan zat padat berdifusi lebih lambat. Molekul berukuran besar bergerak lebih lambat daripada molekul berukuran lebih kecil (Heddy, 1990).

Semua zat bergerak seiring dengan perubahan suhu. Semakin tinggi suhu maka semakin cepat pula pergerakan material. Hati-hati saat memanaskan air. Semakin cepat molekul air bergerak, maka akan semakin panas. Salah satu faktor yang mendukung penyerapan zat oleh akar adalah pergerakan zat tersebut. Dengan kata lain, gaya penggerak terjadi ketika konsentrasi suatu zat berubah. Perbedaan tekanan antara kedua daerah menyebabkan benda bergerak antara ruang di sekitar akar (rizosfer) dan keadaan internal sel dan jaringan.



Sumber: *Biology, Raven dan Johnson*

**Gambar 2. 1. Proses Difusi (Raven dan Johnson, 2002)**

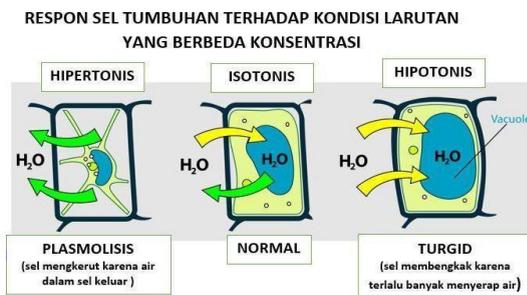
Partikel kohesif (mudah menempel pada suatu permukaan). Gaya kohesif pada permukaan partikel mencegah partikel tersebut bergerak. Perbedaan tekanan atau suhu menyebabkan zat tersebut terdispersi. Udara adalah udara yang bergerak. Udara bergerak dari

tekanan tinggi ke tekanan rendah, materi berpindah dari tekanan tinggi ke tekanan rendah. Oleh karena itu, semua zat bergerak ketika suhu, tekanan, dan konsentrasi berubah.

Prosedur untuk menghilangkan zat-zat berikut :1). distribusi sederhana, yang meliputi pemasukan udara dan air; 2). Terjemahan sederhana, yang melibatkan penghilangan molekul besar seperti gula dan sukrosa. Difusi terbantu, salah satu proses difusi paling terkenal, difasilitasi oleh protein. Hal ini bergantung pada mekanisme transpor membran dan terjadi pada bakteri *E. coli* yang dimuat dalam medium laktosa. Laktosa tidak dapat melintasi membran bakteri karena tidak dapat melintasi membran bakteri. Setelah beberapa menit, bakteri menghasilkan enzim seluler yang disebut permease, suatu protein seluler. Enzim ini menciptakan jalur bagi laktosa untuk melewati membran sel. 3). Transportasi aktif yang menyerap banyak ion. Ion-ion yang berukuran kecil sangat sulit melintasi membran karena membran mempunyai permeabilitas yang rendah. Oleh karena itu, kita harus (mengaktifkan) kapasitas penyerapannya. 4). Proses osmosis: Osmosis adalah proses perpindahan air dari larutan rendah ke larutan tinggi. Proses ini biasanya terjadi melintasi membran semipermeabel, dengan fase encer berpindah ke fase yang lebih pekat. 5). Difusi air dari larutan berair ke cairan tidak berair melalui membran berpori (yang menyerap pelarut tetapi tidak menyerap zat terlarut) disebut osmosis. Sama seperti akar pohon yang menembus bebatuan, osmosis dapat melepaskan energi dan kerja. Zat terlarut, biasanya air, berpindah dari larutan yang kurang pekat (konsentrasi rendah) ke larutan yang lebih pekat (konsentrasi tinggi). Tujuan ini adalah untuk membandingkan konsentrasi kedua larutan. Efek ini terjadi ketika tekanan larutan hipertonik meningkat dibandingkan

larutan hipotonik. Tekanan osmotik adalah tekanan yang diperlukan untuk menjaga keseimbangan tanpa adanya aliran pelarut.

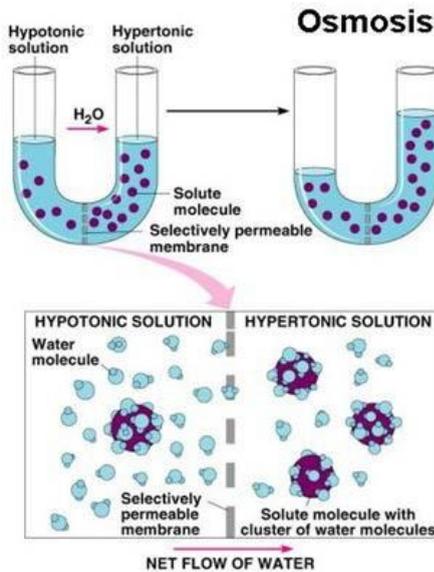
Osmosis adalah proses difusi melalui membran semipermeabel, mirip dengan difusi. Di sinilah molekul berpindah dari area dengan konsentrasi tinggi ke area dengan konsentrasi rendah. Menurut Suhartono (2008), proses osmosis berakhir ketika konsentrasi zat pada kedua sisi membran mencapai kesetimbangan. Osmosis memegang peranan penting dalam kehidupan tumbuhan, antara lain: proses dimana tumbuhan menyerap air dari dalam tanah melalui bulu-bulu akarnya melalui proses osmosis. Air yang diserap didistribusikan ke seluruh jaringan hidup melalui proses osmosis antar sel. Biji ringan meningkatkan osmosis pada sel penjaga, stomata terbuka dan air masuk. Contoh proses osmosis adalah pergerakan suatu larutan ke dalam sel endotel. Dalam tubuh organisme multiseluler, air dapat berpindah dengan bebas dari satu sel ke sel lainnya. Selain air, molekul kecil seperti oksigen dan karbon dioksida mudah melintasi membran sel melalui osmosis dari sitoplasma ke organel yang terikat membran (Santoso, 2010).



**Gambar 2. 2. Peristiwa osmosis pada sel tumbuhan**

(Sumber: <https://perbedaan.budisma.net/perbedaan-larutan-isotonik-hipotonik-dan-hipertonik.html>)

Tekanan osmotik adalah sifat umum yang bergantung pada konsentrasi molar zat terlarut dan bukan pada jenis zat. Osmosis merupakan fenomena penting dalam sistem biologis karena sebagian besar membran biologis relatif permeabel. Umumnya membran kedap terhadap zat organik dan molekul besar seperti polisakarida. Tapi untuk air dan bahan kimia kecil tidak berfungsi. Permeabilitas membran juga bergantung pada karakteristik kelarutan, muatan, atau sifat kimia zat terlarut. Misalnya, molekul air dapat melintasi tonotoplas (vakuola) atau protoplas melalui lapisan ganda fosfolipid atau melalui aquaporin, protein transmembran kecil yang memfasilitasi dan mensintesis saluran ion. Cara paling sederhana untuk mengangkut air masuk dan keluar sel adalah dengan osmosis. Osmosis membran sel mempertahankan tekanan turgor sel antara bagian dalam sel dan lingkungan luar yang hipotonik. Pelarut dan zat terlarut tidak dapat menembus membran semipermeabel, sehingga menimbulkan gradien tekanan melintasi membran. Osmosis terjadi secara alami, namun dapat ditekan dengan menggunakan tekanan yang lebih tinggi. Satuan gaya yang diperlukan untuk mencegah pelarut mengalir melalui membran ke dalam larutan yang lebih kuat sama dengan tekanan turgor. Semua aspek tekanan osmotik bergantung pada konsentrasi zat terlarut dan bukan pada sifat zat terlarut itu sendiri. Osmosis penting dalam biologi karena dapat menjelaskan mengapa air masuk dan keluar sel. Istilah "reverse osmosis" berasal dari kata osmosis. Reverse osmosis adalah proses alami dalam sel hidup di mana molekul zat terlarut (terutama air) mengalir dari area dengan kelarutan rendah ke area dengan kelarutan tinggi melintasi membran semipermeabel. Gerakan "pencampuran" berlanjut hingga konsentrasi pada kedua sisi membran sama.



**Gambar 2. 3. Proses terjadinya osmosis**

Suatu pelarut, biasanya berupa cairan, berpindah dari larutan dengan konsentrasi lebih rendah (konsentrasi lebih rendah) ke larutan dengan konsentrasi lebih tinggi (konsentrasi lebih tinggi), bila konsentrasi kedua larutan sama. Efek ini terjadi ketika tekanan larutan hipertonik meningkat dibandingkan larutan hipotonik. Tekanan osmotik adalah tekanan yang diperlukan untuk menjaga keseimbangan tanpa adanya aliran pelarut. Tekanan osmotik adalah sifat sederhana yang bergantung pada konsentrasi molar zat terlarut dan bukan pada jenis zat. Ada dua faktor utama yang menentukan laju osmosis (melalui membran). Perbedaan potensial air (warna) antara cairan sel yang diserap dan larutan tanah ekstraseluler. dan 2). Permeabilitas membran terhadap zat tertentu. Penyerapan mengacu pada kemampuan dinding sel dan plasma sel untuk menyerap air dari luar sel sehingga menyebabkan dinding sel mengembang. Dalam konteks pertumbuhan tanaman, hal ini berarti ketika air

memasuki ruang di antara dinding sel, maka dinding sel akan mengembang. Ketika hal ini terjadi, molekul air akan berikatan antar molekul dinding sel atau plasma sel sehingga menyebabkan plasma sel mengembang (Devia, 2011). Sistem ini melibatkan pertukaran ion  $\text{Na}^+$  dan  $\text{K}^+$ . Protein countersporin, suatu protein pengangkut, mengangkut ion  $\text{Na}^+$  dari luar sel ke dalam sel bersama dengan glukosa dan asam amino. Contohnya adalah pergerakan air dari inti ke inti (Dwijoseputro, 1983).

## 2.4 Faktor yang Mempengaruhi Difusi dan Osmosis

Difusi adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan proses perpindahan zat dan partikel dari satu tempat ke tempat lain. Beberapa contoh proses biologis adalah penyerapan, stabilisasi pertumbuhan pupuk, dan penyerapan fisik unsur hara dari makanan. Beberapa variabel mempengaruhi laju rambat, antara lain:

- 1). Ukuran partikel. Sebagaimana kita ketahui, besar kecilnya partikel menyulitkan pergerakannya, dan besar kecilnya partikel mempengaruhi kecepatan proses difusi (semakin besar ukuran partikel maka semakin panjang fotonnya).
- 2). Ketebalan membran sel: Faktor kedua yang mempengaruhi laju difusi adalah ketebalan membran sel. Sebagaimana didefinisikan di atas, difusi mengacu pada fenomena dimana zat atau partikel berpindah dari area dengan konsentrasi tinggi ke area dengan konsentrasi rendah. Selain ukuran partikel, ketebalan film juga berhubungan dengan kecepatan.
- 3). Luas permukaan: Luas difusi berhubungan dengan laju difusi. Semakin besar wilayah distribusinya, semakin banyak pula komponen yang dapat dihubungkan. Hasilnya, aset bergerak lebih cepat.
- 4). Jarak: Faktor keempat yang mempengaruhi laju difusi

adalah jarak antara dua konsentrasi di mana difusi terjadi. Seperti halnya gerak pada umumnya, semakin besar jarak konsentrasi yang harus ditempuh suatu partikel, maka semakin lama pula waktu yang dibutuhkan untuk berpindah dari satu konsentrasi ke konsentrasi lainnya. 5). Suhu: Hal terakhir yang mempengaruhi kecepatan proses pendinginan adalah suhu. Artinya partikel membutuhkan banyak energi untuk bergerak lebih cepat, dan panas merupakan salah satu sumber energinya. Temperatur yang tinggi akan menyebabkan tumbukan terjadi lebih cepat dari biasanya.

## DAFTAR PUSTAKA

- Aqil M, Firmansyah I U dan Akil M. 2013. Pengelolaan air tanaman jagung (*Zea mays*). Makasar (ID) : Balai Penelitian Tanaman Serealia.
- Devia. 2011. Transportaton System (online). [http://z14.invisionfree.com/FORUM\\_FORUMAN/ar/t18.htm](http://z14.invisionfree.com/FORUM_FORUMAN/ar/t18.htm) (Diakses pada tanggal 30 September 2020)
- Dwijoseputro, D. 1983. Pengantar Fisiologi Tumbuhan. Gramedia. Jakarta.
- Heddy, S. 1990. Biologi Pertanian. Rajawali Press. Jakarta.
- Parwati D U. 2013. Pengaruh Frekuensi Penyiraman Dan Lama Penyiraman Terhadap Pertumbuhan Bibit Jarak Pagar (*Jatropha curcas* L.). Fakultas Pertanian, Instiper, Yogyakarta.
- Raven, P. H., and Johnson, G. B. 2002. Biology. 6th ed. McGraw-Hill Company, Inc., New York. 1239p.
- Santoso B. 2010. Faktor-Faktor Pertumbuhan Dan Penggolongan Tanaman Hias.
- Suhartono. 2008. Pengaruh Interval Pemberian Air Terhadap Pertumbuhan Dan Hasil Tanaman Kedelai (*Glicine Max* (L) Merrill) Pada Berbagai Jenis Tanaman. Embryo, Vol 5 (1) : 98-112.



# **BAB 3**

## **HUBUNGAN AIR DENGAN TUMBUHAN**

Oleh Rahmadina

### **3.1 Ruang lingkup Air**

Air sebagai molekul anorganik yang sangat berperan penting dalam kehidupan makhluk hidup terutama manusia, hewan, tumbuhan dan lainnya. Air berperan penting dalam mencegah fluktuasi suhu yang cepat yang dapat membuat berbagai kerusakan pada sel, terutama struktur makromolekul. Air adalah komponen tanaman yang paling penting, karena menyumbang 60 hingga 90 persen dari berat daun. (Fried, 2006).

Air sangat penting untuk fungsi pertumbuhan dan perkembangan tanaman, termasuk perannya sebagai media yang memberikan tekanan turgor pada sel tanaman, dan untuk pertumbuhan sel tanaman serta perlekatan daun dan pembentukan struktur tanaman. Air juga berperan untuk menetralkan muatan pada molekul koloid dan menghidrasinya. Peran air bagi enzim adalah untuk mempertahankan dan meningkatkan fungsi katalitik pada tanaman. Air yang diserap tanaman digunakan untuk proses metabolisme. (Sondang, 2020).

## **3.2 Jenis-Jenis Air**

### **3.2.1 Air beras**

Air beras merah tersusun oleh kalsium, zat besi, serta vitamin B1. Kandungan air ini lebih tinggi dibandingkan air beras putih. Di dalam air cucian beras terkandung zat gizi seperti : 80% Vitamin B1, 70% Vitamin B3, 90% Vitamin B6, 50% Mangan, 50% Fosfor, 60% Besi, dan Ca 2,944%, Mg 14,252%, S 0,027% , Fe 0, 0427% dan B 0,043%. Unsur hara yang terkandung didalamnya ialah unsur hara makro dan mikro, sehingga dapat membantu dalam kesuburan tanaman. Air beras bisa dimanfaatkan dalam pupuk organik. (Wulandari, 2012).

### **3.2.2 Air Hujan Asam**

Air hujan yang bersifat asam adalah air yang bisa memberikan dampak negatif bagi tumbuhan dan hewan. Ketika air hujan menjadi asam, maka nilai pH akan menurun sehingga dapat membahayakan kelestarian populasi ikan dan biota perairan di suatu badan air. Di dalam air ini, mengandung larutan yang dapat melarutkan logam berat dalam air, tanah, dan air permukaan.<sup>3</sup> (Nasihah, 2017).

### **3.2.3 Air Tanah**

Air tanah adalah air yang banyak mengandung unsur kimia utama yaitu HCO<sub>3</sub>, Mg, dan Ca. Air ini memiliki berbagai macam manfaat bagi flora dan fauna. Air ini bisa ditemukan pada sumur, grenase ataupun pada terowongan. (Redana, 2020).

### **3.2.4 Air Limbah**

Air limbah bisa menghambat pertumbuhan tanaman atau menyebabkan penyakit pada tanaman. Air limbah mengandung pewarna yang pekat, logam berat, nitrogen, fosfat, sulfida, dan zat yang sangat beracun. Air limbah pada industri tempe mengandung unsur hara yang dapat berguna bagi tanaman, dan limbah pada nasi mengandung mikroorganisme yang bagus untuk penguraian tanah, sehingga kedua dari limbah ini baik bagi tanaman jika digunakan sebagai pupuk yang mendorong pertumbuhan tanaman. (Rahmawati, 2020)

### **3.3 Waktu Pemberian Air yang Baik**

Air berperan sebagai penstabil suhu bagi tanaman. Bila terjadi defisiensi maka tekanan turgor sel menurun sehingga mempengaruhi membran sel serta dapat berpengaruh proses metabolisme terutama pada proses fotosintesis tumbuhan. Air dengan cepat meresap ke dalam tanah dan mengalir tanpa kehilangan banyak air melalui penguapan. Jika Anda menyiram pada siang hari, sinar matahari akan lebih tinggi dan air akan menguap dan membakar tanaman. (Nugraha, 2014).

### **3.4 Jenis Air yang Baik untuk Tanaman**

Air saluran pembuangan pada umumnya mengandung unsur detergen seperti unsur N, C, P, O, K, S, Ca, Mg dan lain-lain. Unsur makro tanaman dan unsur jejak adalah unsur hara yang digunakan dalam proses pertumbuhan tanaman. Air saluran mempunyai banyak manfaat, namun juga mempunyai satu dampak negatif

seperti menyebabkan penyakit yang menyebar ke tanaman lain (Hutapea, 2023).

### **3.5 Sifat kimia dan Fisika Air**

Air merupakan salah satu bahan kimia dengan rumus kimia  $H_2O$ . Molekul air terdiri dari dua atom hidrogen yang terikat secara kovalen dengan atom oksigen. Air juga memiliki sifat Fisika yang penting bagi kehidupan. Tiga sifat fisika yang ada pada air ialah: padat seperti es, cair seperti air, dan gas seperti uap air. Bentuk yang dihasilkan bergantung pada kondisi cuaca setempat. Sifat kimia air adalah pH 7 dan jenuh dengan oksigen terlarut (=DO) sebesar 9 mg/L.

Air juga merupakan cairan tubuh yang terdapat dalam tubuh organisme hidup. Sifat biologis air adalah selalu terdapat kehidupan di dalam air, jenis tumbuhan dan hewan. Organisme ini saling mempengaruhi kualitas air. Atom oksigen mempunyai nilai keelektronegativan yang sangat besar, sedangkan atom hidrogen mempunyai nilai keelektronegativan terkecil di antara unsur bukan logam. Hal ini tidak hanya meningkatkan polaritas air, tetapi juga menyebabkan ikatan hidrogen antar molekul air. Ikatan hidrogen terjadi karena atom oksigen yang terikat pada satu molekul air dapat membentuk ikatan dengan atom hidrogen yang terikat pada molekul air lainnya. Ikatan hidrogen ini memastikan bahwa air menunjukkan sifat uniknya. Sifat khusus air sangat bermanfaat bagi kehidupan di Bumi.

Ciri-ciri tersebut antara lain: Air memiliki titik beku 0°C dan titik didih 100°C (jauh lebih tinggi dari perkiraan teoritis yang menjadikan ideal pada suhu sekitar 0°C hingga 100°C. Air merupakan zat cair yang cocok untuk kehidupan. Ini sangat bermanfaat bagi organisme hidup karena tanpa sifat tersebut, air dapat berbentuk gas atau padat di jaringan tubuh makhluk hidup, lautan, sungai, danau, dan badan air lainnya. Kita sekarang membutuhkan air cair untuk bertahan hidup. Berikut merupakan sifat fisik air.

**Tabel 2. 1. Sifat fisik air**

Sifat Fisik	Suhu (°C)					
	0	20	40	60	80	100
Air						
Tekanan Uap (mm Hg)	4.58	17.53	55.32	149.4	155.2	760.0
Kerapatan (g/cm <sup>3</sup> )	0.9988	0.9982	0.9922	0.9832	0.9718	0.9583
Panas Jenis (kal/g°C)	1.0074	0.9988	0.9980	0.9994	1.0023	1.0070
Panas Penguapan (kal/g)	597.2	586.0	574.7	563.3	551.3	538.9
Daya hantar panas (Kkal/m <sup>2</sup> /atm°C)	0.486	0.515	0.540	0.561	0.576	0.585
Tegangan Permukaan (dyne/cm)	75.62	72.75	69.55	66.17	62.60	58.84
Kekentalan (centipoise)	1.792	1.002	0.653	0.466	0.335	0.282
Angka bias	1.338	1.3330	1.3306	1.3272	1.3230	1.3180
Tetapan dielektrik	88.0	80.4	73.3	66.7	60.8	55.3
Koefisien muai panas x 10 <sup>-4</sup>	-	2.07	3.87	5.38	6.57	-

Sumber: De Menn, (1980) dalam Sakidja (1989).

### 3.6 Peranan Air bagi Tumbuhan

Air berperan penting bagi tumbuhan diantaranya ialah

- sebagai alat transpor;
- sebagai wadah dan bahan dasar tempat berlangsungnya reaksi-reaksi biokimia;
- Sebagai zat pelarut bagi unsur hara tanaman
- Sebagai sistem hidrolik Air;
- sebagai salah satu penjaga Stabilisasi dan pemindahan panas tubuh tumbuhan;

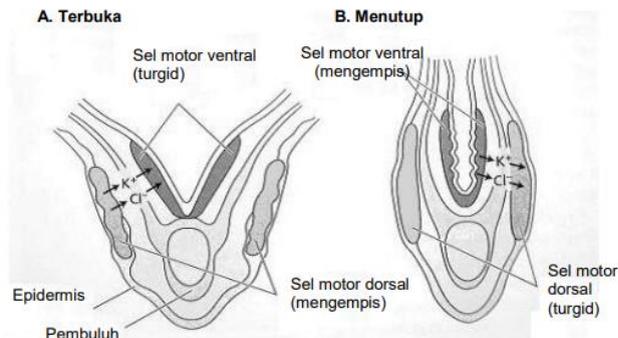
- Sebagai transportasi pada daun;
- Sebagai Penyusun utama pada protoplasma..

Dalam proses biokimia tumbuhan dan air mempunyai fungsi penting sebagai media reaksi dan bahan reaksi metabolisme pada tumbuhan. Banyak reaksi kimia pada sel tumbuhan memerlukan air sebagai medianya. Kekurangan air menunda banyak reaksi metabolisme dan menghambat pertumbuhan tanaman. Misalnya, hidrolisis pati membutuhkan air untuk memecah pati menjadi glukosa. Demikian pula reaksi hidrolisis lainnya.

Air juga berperan penting dalam proses reaksi terang fotosintesis. Dalam proses ini, air adalah sumber elektron, atau, dan molekul air dipecah menghasilkan  $O_2$ ,  $H^+$ , dan elektron. Meskipun proporsi air yang diperlukan untuk reaksi sangat kecil dibandingkan dengan reaksi biokimia lainnya. Fungsi lain yang tidak kalah pentingnya adalah fungsi air dalam menjaga pembengkakan sel, pertumbuhan sel, dan pergerakan struktur tanaman tertentu. Derajat pembengkakan sel, atau yang dikenal dengan tekanan turgor sel, merupakan tekanan sel yang ditimbulkan oleh masuknya air ke dalam sel. Jika suatu sel tumbuhan mengalami kehilangan air yang begitu besar hingga layu, maka nilai tekanan turgor sel pada titik tersebut adalah nol. Ketika air masuk ke dalam sel, tekanan turgor (positif) meningkat dan sel membengkak sehingga mencapai ukuran maksimalnya. Bila hal ini terjadi, sel tumbuhan menjadi membengkak sepenuhnya. Pada pagi hari, jika air tanah atau media tanam tercukupi, biasanya sel tanaman dalam keadaan turgid penuh. Jika matahari terik pada siang hari dan tumbuhan kehilangan banyak air melalui

penguapan, tekanan turgor tumbuhan dapat menurun atau bahkan menjadi nol (Worken).

Pernahkah Anda mengamati pergerakan tumbuhan? Pergerakan bukan dimaksudkan untuk digerakkan oleh angin, melainkan karena organ tumbuhan bergerak sendiri. Gerakan yang dimaksud mirip dengan yang terjadi pada daun Putri Malu yang menutup saat disentuh. Penutupan lobus ini disebabkan oleh distribusi air di dalam dan di luar jaringan pulpa paru. Skema Gambar 3.1. Mekanisme pergerakan daun dijelaskan di bawah ini. Pada pangkal daun bagian atas dan bawah terdapat dua kelompok sel yang dapat menyerap atau memompa air. Ketika sel bagian atas panggul mengumpulkan ion  $K^+$  dan  $Cl^-$  dalam jumlah besar, air dari sel di sekitarnya diserap ke dalam sel panggul. Hal ini menyebabkan sel membengkak dan daun terbuka. Situasi sebaliknya terjadi ketika air memasuki sel-sel paru bagian bawah. Gambar tersebut dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 1.1.  
Skema pangkal daun putri malu dengan kelompok sel pulvinus di bagian atas dan bawah petiol daun mengatur membuka dan menutupnya daun

### Gambar 3. 1. Mekanisme pergerakan daun Putri Malu

Air memegang peranan yang sangat penting bagi tanaman. Air digunakan sebagai pelarut senyawa molekul organik dari tanah hingga tanaman. Air berperan dalam menjaga kepenuhan sel, antara lain perluasan sel, pembukaan stomata, penyiapan protoplasma, dan pengaturan suhu pada tanaman. Kurangnya air dalam tanah mempengaruhi proses fotosintesis karena menghambat pengangkutan air sebagai unsur hara ke daun sehingga mempengaruhi produksi yang dihasilkan.

Dalam fisiologi tumbuhan, air merupakan unsur penting yang menunjang proses fotosintesis. Pembentukan senyawa kompleks seperti karbohidrat, protein, dan lemak melalui respirasi dan keringat. Selain itu, air juga merupakan penstabil suhu bagi tanaman. Selama produksi protoplasma seluler, air diserap ke dalam akar melalui stomata dan menghasilkan biomassa tanaman. Rambut akar mengandung rhizobia yang menyerap air dan mempengaruhi pertumbuhan.

Air berperan sangat aktif dalam proses pertumbuhan tanaman. Air juga dapat menjadi penghambat proses pertumbuhan jika jumlah air melebihi batas normal. Namun tanaman tidak dapat tumbuh dengan baik tanpa air. Tanaman perlu menerima kapasitas normalnya yaitu air untuk mendukung proses pertumbuhannya. Air juga berperan dalam menunjang fotosintesis pada tumbuhan. Tanaman tidak dapat tumbuh dengan baik jika mengalami kekeringan pada musim tanam. Ketika kacang hijau mengalami kekeringan, batangnya akan kerdil dan tidak memiliki akar yang kuat untuk menopang tubuhnya.

Air merupakan unsur abiotik yang menunjang pertumbuhan tanaman. Tumbuhan tidak dapat tumbuh tanpa air. Air hadir dalam protoplasma. Berat total jaringan tumbuhan terdiri dari 85-90% air. Pembukaan dan penutupan stomata juga dipengaruhi oleh air (Song *et al.*, 2011).

Tumbuhan yang berbeda memerlukan jumlah air yang berbeda pula. Apabila tumbuhan menerima air dalam jumlah besar, stomatanya tertutup. Penurunan tekanan turgor secara simultan dan peningkatan asam absisat bebas pada daun mempersempit stomata dan juga mempengaruhi fotosintesis (Anggrani, Novita *et al.*, 2015). Adanya cekaman air pada tanaman ini dipengaruhi oleh tingkat cekaman, jenis atau varietas yang ditanam. Hambatan terbukanya celah daun mempengaruhi proses fisiologis dan metabolisme tanaman dan merupakan dampak pertama yang nyata pada tanaman yang mengalami cekaman air.

Air merupakan unsur yang sangat penting bagi tumbuhan. Jika tanaman tidak diberi air maka tanaman tersebut tidak akan tumbuh. Jika Anda memberi tanaman terlalu banyak air, tanaman tidak akan tumbuh dengan baik. Oleh sebab itu dibutuhkan keseimbangan air dalam pertumbuhan tanaman yang dapat dikendalikan oleh tiga jenis potensi yang secara alami bertindak dan berinteraksi dalam sel jaringan tanaman: potensi air total (0), potensi osmotik (0<sub>6</sub>), dan potensi turgor 0P. Ketiga potensi ini berinteraksi sepanjang umur sel/jaringan dan mengendalikan berbagai mekanisme dalam pertumbuhan tubuh, seperti transportasi air, transportasi nutrisi, dan pembelahan sel. Interaksi ketiga komponen potensial tersebut dirumuskan dalam persamaan berikut:

$$\psi = \psi_{\text{t}} + \psi_{\text{p}} \text{ (Kramer, 1983; Tyree dan Jarvis, 1982);}$$

di mana  $\psi_0$  adalah potensial air total,  $\psi_{\text{p}}$  menunjukkan potensial osmotik dan adalah tekanan turgor  $\psi_{\text{p}}$ . Potensial air total ( $\psi_0$ ), adalah perbedaan potensial kimia air pada suatu tingkat dalam suatu sistem dengan air murni pada suhu yang sama dan pada tekanan udara 1 atmosfer yang setara dengan 102 kPa. Potensial air dikontrol oleh suhu dan konsentrasi solut. Solut (solute) adalah bahan-bahan terlarut dalam sel tumbuhan. Solut dapat berupa bahan organik maupun anorganik.

Pada sel tumbuhan yang mengalami cekaman air, potensial air merupakan fungsi dari kandungan air, sehingga potensial air ( $\psi_0$ ) bergeser ke arah yang lebih negatif (ke bawah). Beberapa spesies tumbuhan dapat mengembangkan mekanisme internal untuk memprediksi perubahan potensi air ini dengan mengatur nilai osmolaritas ke arah yang lebih negatif/lebih rendah (osmolalitas lebih rendah), yaitu sesuai dengan arah potensial air yang dikenal dengan penyesuaian osmotik (osmotic adjustment, penyesuaian osmotik). Osmoregulasi dicapai dengan mensintesis dan mengumpulkan beberapa zat terlarut dengan berat molekul rendah di semua kompartemen sel, termasuk intraseluler, vakuola, sitoplasma, dan organel.

### **3.7 Hubungan Air dengan Tumbuhan**

Air sangat penting bagi kehidupan. Peranan air bagi kehidupan khususnya pada lingkungan dapat memberikan kehidupan bagi makhluk hidup. Air memiliki reaksi secara biokimia dalam protoplasma yang dikontrol oleh enzim. Selain memberi fasilitas bagi berlangsungnya suatu reaksi biokimia, molekul air dapat berinteraksi secara langsung sebagai komponen reaktif dalam proses metabolisme di dalam sel.

Air memegang peranan yang sangat penting bagi tumbuhan, oleh karena itu kehidupan tidak mungkin terjadi tanpa air. Selama hidupnya, tanaman memerlukan sekitar 500 g air untuk setiap bahan organik yang terbentuk. Air diserap melalui bulu-bulu akar kemudian diangkut ke dalam tubuh tumbuhan dan kemudian menguap ke atmosfer. Jika terjadi ketidakseimbangan air sekecil apa pun pada tumbuhan, maka akan menyebabkan kekurangan air dan terganggunya reaksi biokimia pada protoplasma.

Air secara langsung maupun tidak langsung mempengaruhi hampir seluruh proses kehidupan tumbuhan. Untuk menunjang proses kehidupan tumbuhan, air dalam tanah mempunyai beberapa fungsi, antara lain sebagai pelarut, pengangkut unsur hara, sumber hidrogen, pengatur suhu tanah dan aerasi. Selain itu, tumbuhan dirancang untuk berperan dalam menjaga kekakuan dan suhu sel-sel dalam tubuh tumbuhan, agar metabolismenya tidak terganggu oleh perubahan suhu lingkungan. Sel tumbuhan mempunyai dinding sel yang menyebabkan terbentuknya tekanan hidrostatik pada protoplasma sel, hal ini disebut tekanan turgor.

Tekanan turgor sangat penting untuk berbagai proses fisiologis, antara lain ekspansi sel, pertukaran gas pada daun, pengangkutan produk fotosintesis di floem, atau proses pengangkutan melintasi membran sel. Selain itu tekanan turgor juga mempengaruhi kekakuan dan stabilitas mekanik jaringan tanaman. Air merupakan penyusun sebagian besar massa sel tumbuhan, dan sel mempunyai vakuola besar yang mengandung air.

Sitoplasma suatu sel hanya menyusun 5-10% volume sel, sedangkan sisanya kosong. Sekitar 75-90% protoplasma adalah air, organel sel (seperti kloroplas dan mitokondria) mengandung 50% air, sebagian besar daging buah adalah air (85-90% berat segar), air 80-90% daunnya lunak dan akar 70-90%. Sayuran bisa mengandung 85-90% air. Beberapa bagian tanaman mengandung sedikit air pada buah matang (biasanya 10-15%), sedangkan beberapa biji yang menyimpan banyak lemak hanya mengandung 5-7% air (Sondang, 2020).

Air merupakan pelarut terbaik untuk tiga kelompok bahan hayati yang sangat penting bagi tumbuhan, yaitu; 1). Bahan organik melalui ikatan hidrogen dengan asam amino (protein), karbohidrat, asam nukleat dan kandungan seluler lainnya, terutama molekul yang mengandung ikatan hidroksil, amina atau gugus karboksil fungsional, 2). Ion unsur hara yang dapat diserap tanaman sebagian besar berbentuk ion terlarut dalam air dan 3). Gas dengan berat molekul rendah di atmosfer seperti oksigen dan nitrogen.

Tumbuhan senantiasa menyerap air, sehingga tumbuhan dapat mengalami kehilangan air. Hilangnya air pada tumbuhan melalui permukaan daun selama hidup disebut transpirasi. Transpirasi adalah proses penting untuk mengekstraksi panas dari sinar

matahari. Panas yang dilepaskan oleh molekul air menguap ke atmosfer yang berenergi lebih tinggi dan melonggarkan ikatan yang menyatukan molekul-molekul air. Ketika molekul-molekul ini dilepaskan, sekelompok molekul air tetap berada pada energi yang lebih rendah, sehingga air menjadi lebih dingin. Aliran air yang diserap oleh akar merupakan cara yang sangat penting untuk menarik mineral terlarut dari tanah ke permukaan akar.

Air memiliki sifat unik dan penting bagi tumbuhan, karena berfungsi sebagai pelarut dan mudah diangkut ke seluruh tubuh tumbuhan. Hubungan Air dan Tumbuhan Tumbuhan memerlukan tanah sebagai substrat pertumbuhan atau habitatnya, sedangkan tumbuhan memerlukan air untuk mengisi kembali unsur hara dalam proses pertumbuhan dan perkembangannya, sehingga tanah, air dan tumbuhan sangat erat hubungannya dengan proses fotosintesis. air sehingga saling berkaitan dalam pemeliharaan dan pertumbuhan tanaman (Ishaq, 2021).

### **3.8 Kesimpulan**

Tanah merupakan lapisan permukaan bumi yang berasal dari bahan dasar yang telah diolah lebih lanjut oleh air, udara dan berbagai organisme baik yang hidup maupun yang mati. Air adalah satu-satunya molekul anorganik yang sangat penting yang harus ada dalam kehidupan. Air berperan penting dalam mencegah perubahan suhu mendadak yang dapat menyebabkan berbagai kerusakan pada sel, terutama struktur makromolekulnya. Air merupakan komponen terpenting yang terdapat pada tumbuhan, karena air dapat menyusun 60-90% massa daun. Tumbuhan dapat hidup dimana saja, baik itu rumah, hutan, ladang atau taman. Pada

umumnya tumbuhan dimanfaatkan sebagai makanan, sandang dan juga obat-obatan. Hubungan antara tanah, air dan tumbuhan sangatlah erat, karena tumbuhan memerlukan tanah sebagai tempat tumbuh atau tempat hidupnya, sedangkan tumbuhan memerlukan air untuk melengkapi pertumbuhannya dengan unsur hara dan dalam proses perkembangannya, dan air juga dibutuhkan dalam proses fotosintesis. Jadi hubungannya adalah tanaman tidak bisa tumbuh tanpa air dan tanah.

## DAFTAR PUSTAKA

- Anggraini, Novita., Faridah, Eny., Dan Indrioko, Sapto. 2015. Pengaruh Cekaman Kekeringan Terhadap Perilaku Fisiologi Dan Pertumbuhan Bibit Black Locust (*Robinia Pseudoacacia*). Jurnal Ilmu Kehutanan. Vol. 9 No. 1 Hal: 41-46.
- Fried, George H, dan George J. Hademenos. 2006. *BIOLOGI*: Erlangga.
- Fahmi, Arifin, dkk. 2010. Pengaruh Interaksi Hara Nitrogen Dan Fosfor Terhadap Pertumbuhan Tanaman Jagung (*Zea Mays L*) Pada Tanah Regosol Dan Latosol<sup>1</sup>. *Journal Biology*.
- Hakim, Luchman. 2015. Rempah Dan Herba Kebun Pekarangan Rumah Masyarakat. Yogyakarta:Diandara Creative.
- Hardjoloekito, A.J. Hari Soeseno. Pengaruh Pengapuran Dan Pemupukan Terhadap Pertumbuhan Dan Hasil Tanaman Kedelai (*Glycine Max, L.*) Pada Tanah Latosol. *Jurnal Unsoer*. Vol. 5. No. 2.
- Harefa, Dermawan. 2020. Pemanfaatan Hasil Tanaman Sebagai Tanaman Obat Keluarga (Toga). *Indonesian Journa Of Civil Society*. Vol. 2, No. 2.
- Herman, Welly, dkk. 2020. Pemanfaatan Biochar Plus Terhadap Tanah Entisol Pesisir Pantai dan Tanaman Sawi Hijau (*Brassica juncea L.*). *Jurnal Galung Tropika*. Vol. 9. No. 1.
- Hutapea, Teguh Christian, dkk. 2023. Efektivitas Penyiraman Air Parit Dan Air *Water Treatment Plant* Terhadap Kualitas Tanaman *Euchalyptus Sp*. *Jurnal Agroforetech*. Vol. 1. No. 1.

- Ishak, Lily. 2021. *Biologi Tanah*. Banda Aceh: Syiah Kuala University Press.
- Nasihah, Mimatun. 2017. Efek Hujam Asam terhadap Pertumbuhan Tanaman. *Jurnal Environment Science*. Vol. 1. N0. 1.
- Nugraha, Sumedi P dan Wanda Rusma Agustingsih. 2015. Pelatihan Penanaman Tanaman Obat Keluarga (Toga). *Jurnal Inovasi dan Kewirausahaan*. Vol. 4. No. 1.
- Nugraha, Yoga Sasmita, dkk. 2014. Pengaruh Interval Waktu Dan Tingkat Pemberian Air Terhadap Pertumbuhan Dan Hasil Tanaman Kedelai (*Glycine max* (L) Merrill.). *Jurnal Produksi Tanaman*. Vol. 2. No. 7.
- Nopriyani, Lenny Sri dan Soemarno. 2023. *Pengelolaan Keasaman Tanah dan Pengapuran*. Malang: UB Press.
- Patola, Lidia Natalidini Putri, dkk. 2017. Pengaruh Penggunaan Pupuk Hayati dan Perbedaan Jenis Tanah terhadap Pertumbuhan dan Hasil Garut. *Jurnal Inovasi Pertanian*. Vol. 17. No. 1.
- Perihastanti, Erma. 2010. Pembibitan Jarakm Pagar (*Jatropha curcas* L.) Pada Jenis Tanah dan Penambahan Kompos yang Berbeda. *Jurnal Anatomi dan Fisiologi*. Vol. 18. No. 2.
- Rahmawati, Anita dan Warsito. 2020. Pengolahan Limbah Domestik dengan Tanaman Eceng Gondok (*Eichornia crassipes*) untuk Menghasilkan Air Bersih Diperumahan Green Temboro, Kota Malang. *Jurnal Teknologi Ramah Lingkungan*. Vol. 4. No.1

- Rayh, I. N. R. poerwanto. 2008. *Memproduksi Buah Diluar Musim*. Yogyakarta: Andi. Redana, I Wayan. 2020. *Air Tanah*. Bali: Udayana University Press.
- Sadzli, Muhammad Amin dan Slamet Supriyadi. 2019. Pengaruh Biochar Sekam Padi dan Kompos Paitan (*Tithonia diversifolia*) terhadap Pertumbuhan Tanaman. *Prosiding Seminar Nasional Pengabdian kepada Masyarakat 2021*.
- Salisbury and ross. 1995. *Fisiologi Tumbuhan*. ITB: Bandung.
- Sanadji, Insun, dkk. 2017. Kandungan Antasianin didalam Mahkota Bunga Beberapa Tanaman Hias. *Jurnal Biology Science dan Education*. Vol. 6, No.2.
- Sani, Almadora Anwar, dan Nurriyanti. 2014. Mesin Pematut Tanaman Umbi-umbian dengan Pematut Model Cakra pada Home Industry. *Jurnal Austenit*. Vol. 6. No. 2.
- Sondang, Yun, dkk. 2020. *FISIOLOGI TANAMAN*. Limapuluh: Politeknik Pertanian Negeri Payakumbuh.
- Song, Nio Dan Banyo, Yunia. 2011. Konsentrasi Klorofil Daun Sebagai Indikator Kekurangan Air Pada Tanaman. *Jurnal Ilmiah Sains* Vol. 11 No. 2. Hal 169-170
- Syahbanuari, dkk. 2020. Keanekaragaman Serangga Pengunjung Bunga Pada Kelapa Sawit (*Elais giuneensis Jacq.*) Aksesori Angola. *Jurnal Biologi Makassar*. Vol. 2. No.1.
- Wulandari, Citra, dkk. 2012. Pengaruh Air Cucian Beras Merah dan Beras Putih Terhadap Pertumbuhan dan Hasil Selada (*Lactuca sativa. L*). *Journal UGM*.

Zulkarnain, Maulana, dkk. 2013. Pengaruh Kompos, Pupuk Kandang, dan Custom-Bio terhadap Sifat Tanah, Pertumbuhan dan Hasil Tebu (*Saccharum officinarum* L.) pada Entisol di Kebun Ngrangkah-Pawon, Kediri). *Indonesian Green Technology Journal*. Vol. 2. No. 1.

# **BAB 4**

## **KEBUTUHAN DAN PERANAN HARA BAGI TUMBUHAN**

Oleh Friskia Hanatul Qolby

### **4.1 Pendahuluan**

Tumbuhan sebagai makhluk hidup memerlukan asupan makanan untuk menunjang kehidupannya, sama halnya dengan makhluk hidup lain. Asupan makanan bagi tumbuhan biasa disebut dengan unsur hara/ nutrisi tanaman. Unsur hara merupakan senyawa-senyawa kimiawi yang dibutuhkan oleh tumbuhan selama masa pertumbuhan/ siklus hidupnya. Suplai unsur hara bersifat mutlak dan berperan hampir dalam semua proses metabolisme yang terjadi di dalam tumbuhan. Unsur hara dan proses metabolisme memiliki keterkaitan yang sangat erat dan tidak dapat dipisahkan.

Walaupun keberadaan unsur hara bersifat mutlak bagi tumbuhan, namun kebutuhan minimal dan optimal unsur hara tiap spesies tanaman berbeda. Jika unsur hara yang tersedia tidak mampu memenuhi kebutuhan minimal tanaman, maka akan terjadi defisiensi/ kekurangan unsur hara, sebaliknya jika unsur hara yang tersedia melebihi kebutuhan optimal maka akan terjadi toksisitas/ keracunan hara pada tanaman. Jika kedua hal tersebut terjadi maka pertumbuhan dan produksi tanaman akan terganggu. Kebutuhan hara tanaman yang ideal berada pada kisaran melebihi batas

kebutuhan minimal hingga mencapai kebutuhan optimal yang dikenal dengan zona kecukupan.

Tanaman menyerap unsur hara yang terdapat di dalam tanah dan atmosfer melalui akar dan daun. Setelah itu unsur-unsur tersebut akan digunakan dalam proses metabolisme tanaman yang akan menghasilkan senyawa-senyawa kompleks dan energi yang menunjang proses pertumbuhan tanaman. Namun, tanah dan atmosfer tidak akan selamanya mampu menyuplai ketersediaan hara bagi tanaman. Solusi dari hal tersebut yaitu melakukan pemupukan dengan menambahkan hara yang dibutuhkan tanaman agar proses metabolisme dan pertumbuhan tanaman tidak terganggu.

## **4.2 Pembagian Unsur Hara**

Unsur hara tanaman yang terdapat di alam ada berbagai jenis, agar mudah untuk diketahui dan dipelajari para ahli nutrisi tanaman membagi unsur hara menjadi 3 kelompok utama yaitu berdasarkan tingkat esensialnya, jumlah yang dibutuhkan tanaman, dan tingkat mobilitasnya di dalam jaringan floem.

### **4.2.1. Unsur Hara berdasarkan Tingkat Esensial (Tingkat Kebutuhan)**

Berdasarkan tingkat keesensialannya Marschner (1986) mengelompokkan unsur hara menjadi 3 yaitu :

#### **1. Unsur hara esensial**

Suatu unsur hara dapat dikatakan esensial bagi tanaman jika memenuhi minimal 3 kriteria yaitu : (1) jika unsur hara tersebut tidak tersedia bagi tanaman maka tanaman tidak mampu

menyelesaikan siklus hidup (tanaman tidak dapat tumbuh), (2) fungsi unsur hara tersebut tidak dapat digantikan/ disubstitusi oleh unsur hara lain, dan (3) unsur hara tersebut terlibat dalam proses metabolisme tanaman secara langsung.

2. Unsur hara benefisial

Unsur hara yang hanya bersifat esensial bagi sebagian tanaman, namun bagi tanaman lainnya tidak. Unsur hara ini berfungsi untuk menstimulasi pertumbuhan tanaman.

3. Unsur hara non-esensial

Unsur hara yang tidak memenuhi tiga kriteria unsur hara yang esensial seperti diatas.

#### **4.2.2. Unsur Hara berdasarkan Jumlah Kebutuhan Tanaman**

Berdasarkan jumlah yang dibutuhkan oleh tanaman, unsur hara dikelompokkan menjadi 2, yaitu :

1) Unsur Hara Makro

Unsur hara makro merupakan unsur hara yang dibutuhkan oleh tanaman dalam jumlah relatif banyak dalam menunjang pertumbuhannya. Unsur hara yang tergolong makro diantaranya :

- 1) Hidrogen (H)
- 2) Karbon (C)
- 3) Oksigen (O)
- 4) Fosfor (P)
- 5) Nitrogen (N)
- 6) Sulfur (S)
- 7) Kalsium (Ca)
- 8) Kalium (K)
- 9) Magnesium (Mg)

## 2) Unsur Hara Mikro

Unsur hara mikro merupakan unsur hara yang dibutuhkan oleh tanaman dalam jumlah yang relatif sedikit dibanding unsur hara mikro. Unsur hara yang tergolong mikro yaitu :

- 1) Klor (Cl)
- 2) Zat besi (Fe)
- 3) Mangan (Mn)
- 4) Tembaga (Cu)
- 5) Seng (Zn)
- 6) Boron (B)
- 7) Molibdenum (Mo).

### **4.2.3. Unsur Hara berdasarkan Mobilitasnya dalam Jaringan Floem**

Berdasarkan tingkat mobilitasnya di dalam jaringan floem unsur hara digolongnya menjadi 3, yaitu :

1. Unsur hara mobil, terdiri dari Kalium (K), Natrium (Na), Magnesium (Mg), Fosfor (P), Sulfur (S), Klor (Cl), dan Rubidium (Rb).
2. Unsur hara intermediet, terdiri dari Zat besi (Fe), Mangan (Mn), Seng (Zn), Kobalt (Co), dan Molibdenum (Mo).
3. Unsur hara immobile, terdiri dari Boron (B), Litium (Li), Sesium (Cs), Stronsium (Sr), dan Barium (Ba).

Selain pengelompokan di atas, Mengel dan Kirkby (1982) mengelompokkan unsur hara dengan dasar fungsi fisiologis dan sifat biokimianya menjadi 4 kelompok yaitu :

1. Unsur-unsur yang menjadi penyusun utama bahan organik, berperan dalam proses-proses enzimatik, dan reaksi-reaksi reduksi-oksidasi. Unsur ini terdiri dari C, O, H, S, dan N.
2. Unsur-unsur yang berperan dalam reaksi transfer/ penyaluran energi dan esterifikasi dengan gugus alkohol dalam tanah, unsur ini terdiri dari P dan B.
3. Unsur-unsur yang berperan dalam proses osmotik dan menjaga keseimbangan ion-ion, serta memiliki fungsi khusus dalam mengkonfirmasi enzim dan katalis. Unsur ini terdiri dari Cl, Mn, Ca, dan K.
4. Unsur-unsur yang berperan dalam transportasi dan distribusi elektron melalui terjadinya perubahan valensi. Unsur-unsur ini terdiri dari Mo, Zn, Cu dan Fe. Unsur tersebut selanjutnya juga dikelompokkan menjadi 2 yaitu, kelompok logam seperti Mo, Zn, Mn, Fe, Ca, Mg dan K. kelompok non logam terdiri dari S, B, P, N dan Cl.

Walaupun para ahli nutrisi tanaman telah mengelompokkan unsur hara menjadi tiga kelompok, namun pada praktiknya di lapangan kadang tidak sesuai dengan pengelompokkan tersebut, karena tiap jenis tanaman memiliki kebutuhan yang berbeda terhadap suatu unsur hara. Selain itu, penyerapan unsur hara oleh tanaman juga dipengaruhi oleh kondisi lingkungan (abiotik).

## **4.3 Peran Unsur Hara Makro Bagi Tanaman**

### **4.3.1 Nitrogen (N)**

Nitrogen merupakan unsur yang keberadaannya paling melimpah di alam, nitrogen menempati 80 persen dari semua unsur yang terdapat di atmosfer. Namun, secara kimiawi N di atmosfer tidak dapat dimanfaatkan secara langsung oleh tanaman sehingga tanaman juga harus memanfaatkan pada N yang berada di dalam tanah. Tanaman menyerap unsur N dalam bentuk  $\text{NO}_3^-$  (nitrat) dan  $\text{NH}_4^+$  (ammonium). Nitrogen merupakan unsur utama yang menyusun protein. N yang terdapat dalam tanaman diubah menjadi asam amino kemudian disusun menjadi protein tanaman. Protein sel tanaman akan selalu mengalami pemecahan dan reformasi karena bentuknya tidak stabil.

N juga berperan dalam pembentukan molekul klorofil, secara tidak langsung unsur N sangat berkaitan erat dengan pertumbuhan vegetatif tanaman. Pemberian unsur N pada tanaman dalam jumlah tertentu akan menyebabkan pertumbuhan vegetatif tanaman menjadi subur yang ditandai dengan warna daun hijau gelap. Selain itu, N juga berperan dalam proses enzimatik, yaitu sebagai penyusun enzim karena penyusun utama enzim merupakan protein (Sugito, 2012).

### **4.3.2 Fosfor (P)**

Unsur P merupakan salah satu unsur esensial yang penting selama masa pertumbuhan dan perkembangan tanaman. P berperan dalam proses perkembangan akar, pembelahan sel, dan pertumbuhan umbi bagi tanaman umbi-umbian. P juga berperan sebagai aktivator dalam proses enzimatik, salah satunya dalam proses

sintesis amilosa. Disamping itu, P juga berperan sebagai penyusun utama materi genetick DNA (*Deoxyribonucleic acid*) dan RNA (*Ribonucleic acid*) yang menyimpan seluruh informasi genetic suatu tanaman (Hanafiah, 2005).

P dalam tanah terdapat dalam bentuk P organik yang berasal dari bahan organik yang telah terdekomposisi dan P anorganik yang berasal dari mineral tanah. P organik kebanyakan berasal dari sisa-sisa tanaman dan hewan yang telah terurai. P anorganik terdiri dari tiga jenis yaitu,  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  (kalsium fosfat),  $\text{AlPO}_4$  (aluminium fosfat), dan  $\text{FePO}_4$  (besi fosfat).

Semua kebutuhan P tanaman disuplai dari P tanah (organik dan anorganik). Ketersedian P bagi tanaman sangat dipengaruhi oleh kondisi dan sifat tanah. Pada tanah ultisol yang banyak mengandung senyawa Al dan Fe, maka P tidak tersedia karena kedua senyawa tersebut akan membentuk senyawa kompleks dengan P yang bersifat tidak larut. Sedangkan pada tanah ultisol yang banyak mengandung unsur Ca akan mengakibatkan kelarutan fosfat dalam tanah terhambat (Rosmarkam dan Yuwono, 2012).

### **4.3.3 Kalium (K)**

Kalium merupakan hara esensial bagi tanaman yang proses penyerapannya melalui korteks dan epidermis. Berdasarkan ketersediannya di dalam tanah K dikelompokkan dalam 4 kelompok yaitu :

- 1) K-larut, kalium yang siap diserap oleh tanaman namun hanya tersedia dalam jumlah sedikit, berkisar  $2\text{-}5 \text{ mg.kg}^{-1}$

- 2) K-dapat ditukar (K<sub>dd</sub>), bentuk kalium yang juga dapat secara langsung diserap oleh tanaman dan ditukar dengan kation lain. Jumlahnya berkisar 10-400 ppm/ tidak lebih dari 2%.
- 3) K-terfiksasi/tidak dapat ditukar, bentuk K yang tidak dapat tersedia langsung bagi tanaman karena terfiksasi kuat oleh lapisan mineral liat yang mempunyai energi hidrasi kuat jika dibandingkan dengan ion K<sup>+</sup>.
- 4) K-struktural, dikenal juga dengan istilah K-mineral yang sebagian besar terikat oleh mineral liat seperti feldspar, mika, dan gelas vulkan.

K bagi tanaman berperan dalam berbagai fungsi fisiologis, diantaranya proses metabolisme karbohidrat meliputi pembentukan, perombakan, dan distribusi pati dan glukosa bagi pertumbuhan tanaman. K juga berperan dalam efisiensi penggunaan air, ini juga berkaitan dengan mengatur pembukaan dan penutupan stomata pada daun. Bersinergi dengan nitrogen K juga berperan dalam proses sintesis protein (Nieves-Cordones *et al.*, 2014).

### 4.3.3 Sulfur (S)

Sulfur yang ada di alam terdapat dalam bentuk anorganik dan organik, sebagian besar sulfur adalah dalam bentuk organik. Keberadaan keduanya saling berhubungan terkait dengan total S yang terkandung dalam tanah. Tanaman menyerap S dalam bentuk SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (sulfat) yang merupakan S anorganik, dan sebagian kecil sulfur diserap tanaman dari atmosfer dan tanah dalam bentuk gas SO<sub>2</sub>. Sulfur anorganik merupakan hasil dari penguraian senyawa-senyawa

organik yang mengandung S dari pupuk yang diberikan pada tanaman.

Peran S bagi tanaman terkait dengan sintesis protein, karena S terlibat dalam pembentukan asam amino metionin, sistin, tiamin, ko-enzim A, biotin, dan glutathionin. Hampir 90% dalam tanaman terdapat asam amino yang merupakan unsur utama yang menyusun protein. S juga berperan dalam proses fisiologi tanaman dan enzimatis sebagai regulator, aktivator, dan kofaktor. Selain itu, S terkait dengan proses pembentukan klorofil pada daun yang secara langsung berarti S juga berperan dalam proses fotosintesis dan ikut terlibat dalam reaksi metabolisme protein, karbohidrat dan lemak. Merangsang pembentukan dan pertumbuhan akar serta mengurangi serangan penyakit pada tanaman dilaporkan juga terkait dengan peran S (Tan, 2011).

Untuk menunjang pertumbuhan tanaman yang optimal maka dibutuhkan suplai S yang cukup bagi tanaman. Tiap tanaman memiliki kebutuhan yang berbeda akan unsur S, tanaman yang kekurangan S akan menunjukkan penurunan kadar klorofil daun yang ditandai dengan daun terlihat berwarna kuning pada daun yang lebih muda kemudian berlanjut pada daun yang lebih tua. Hal ini menunjukkan bahwa kekurangan unsur S dapat didiagnosis secara visual, selain itu juga dapat dilakukan dengan analisis tanah dan tanaman, serta ditinjau dari respon tanaman terhadap pemberian unsur S. Jika gejala kekurangan S dibiarkan tetap berlanjut maka akan mengakibatkan pertumbuhan tanaman terganggu dan akhirnya dapat menurunkan hasil produksi.

#### 4.3.4 Kalsium (Ca)

Kalsium merupakan salah satu unsur hara makro esensial sekunder, yang dibutuhkan dalam jumlah relative banyak namun lebih sedikit dibanding K dan N. Ca yang ada di tanah berasal dari mineral asal tanah tersebut terbentuk, biasanya dalam bentuk fraksi debu dan pasir. Terdapat beberapa sumber Ca di dalam tanah, diantaranya dolomit, gipsum, kapur tohor, kalsit, piroksen, dan anortit. Kandungan Ca dalam tanah tergantung pada jenis tanahnya, pada tanah tropika basah terdapat 0,1-0,3% dan pada tanah kapur yang beriklim kering mengandung Ca >25%. Tanaman menyerap Ca dalam bentuk ion  $\text{Ca}^{2+}$ .

Pada tanaman Ca berperan menjadi struktur penyusun dinding sel dan membran sel. Berperan dalam penyusunan dan pembelahan sel baru pemanjangan sel, dan menjaga struktur membran di dalam tanaman. Disamping itu, juga berperan penting dalam proses perkecambahan dan proses fotosintesis. Serapan Ca oleh tanaman diserap dalam bentuk kation divalent  $\text{Ca}^{2+}$ , awalnya melalui intersepsi akar dan aliran massa ion tersebut bergerak menuju akar. Setelah masuk ke dalam tanaman ion bergerak menuju xilem bersamaan dengan aliran air transpirasi (Ayeni dan Adeleye, 2011). Ion  $\text{Ca}^{2+}$  masuk pembuluh xilem lewat jalur apoplastik.

Ketersediaan Ca dipengaruhi oleh beberapa factor yaitu pH tanah, KTK tanah, tipe koloid tanah dan nisbah Ca terhadap kation lainnya. Gejala kekurangan unsur Ca ditandai dengan :

- 1) Pertumbuhan pucuk dan ujung akar terhenti
- 2) Pinggiran daun berubah menjadi coklat dan keriting
- 3) Pinggiran daun menempel/ menyatu dengan daun lainnya

- 4) Penurunan kualitas buah, ditandai dengan buah yang busul

Unsur Ca merupakan unsur yang bersifat tidak mobil, sehingga gejala kekurangan biasanya akan muncul pada daun-daun muda. Jumlah Ca yang tersedia bagi tanaman harus berada pada zona kecukupan, jika ketersediaan Ca terlalu tinggi maka akan menghambat proses penyerapan unsur hara yang lain diantaranya akan menghambat penyerapan unsur Mg dan K.

#### 4.3.5 Magnesium (Mg)

Magnesium merupakan hara makro yang diperlukan oleh tanaman untuk menuntaskan siklus hidupnya. Keberadaan Mg menduduki 1,93% dari bagian kerak bumi. Keberadaan Mg pada tanah tergantung pada jenis dan tekstur tanahnya, pada tanah bestekstur kasar Mg berkisar 0,1% dan pada tanah dengan tekstur halus berkisar 4%. Mineral yang mengalami dekomposisi akan menyebabkan Mg terbebas ke air di sekitarnya, kemudian Mg yang terbebas tersebut akan mengalami :

- 1) Mengalami penyerapan oleh makhluk hidup
- 2) Akan hilang bersama air perkolasi
- 3) Akan terjerap oleh mineral liat
- 4) Pengendapan oleh mineral sekunder

Beberapa factor yang mempengaruhi ketersediaan Mg dalam tanah yaitu kemasaman tanah (pH), kejenuhan Mg, tipe liat, dan keberadaan kation lain yang dapat menghambat penyerapan  $Mg^{2+}$  seperti  $Ca^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $NH_4^+$ . Tanaman menyerap Mg dalam bentuk kation divalen  $Mg^{2+}$ . Mg banyak terdapat pada organ daun yang

banyak terdapat klorofil, sehingga Mg sangat berperan penting dalam proses fotosintesis. Salah satu faktor yang menentukan optimalnya fotosintesis adalah jumlah klorofil yang terkandung dalam daun. Jumlah klorofil berkorelasi positif dengan hasil fotosintesis, semakin banyak klorofil yang terdapat pada daun maka hasil fotosintesis juga akan meningkat. Tisdale dan Nelson (1985) menyebutkan beberapa sumber unsur Mg bagi tanaman yaitu :

- 1)  $MgSO_4$
- 2)  $MgCl_2$
- 3) Mg-EDTA

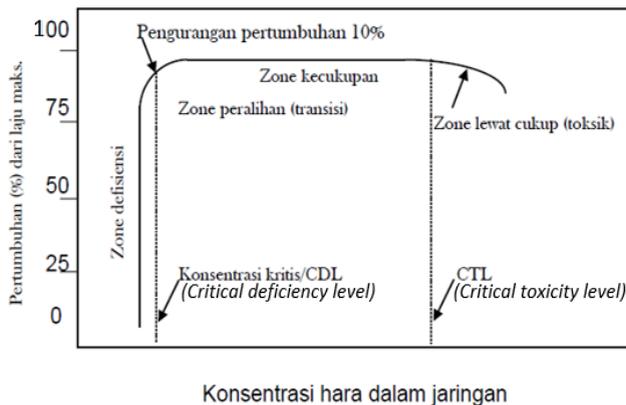
Keberadaan unsur Mg juga berkaitan dengan unsur lain salah satunya fosfat, unsur Mg diperlukan untuk pertukaran zat fosfat. Selain itu Mg juga berperan dalam proses respirasi/ pernafasan tanaman dan sebagai aktivator enzim dehidrogenase, transfosforilase, dan karboksilase. Mg merupakan unsur hara yang bersifat mobil, sehingga gejala kekurangan Mg pada tanaman biasanya akan terlihat pada daun yang lebih tua. Gejala defisiensi Mg pada tanaman ditandai dengan :

- 1) Warna daun berubah kekuningan atau disebut dengan klorosis interveinal (kekuningan muncul pada daerah antar tulang daun yang tua)
- 2) Pinggiran daun akan mengeriting, namun sisi pucuk dan sisi bawah daun akan tetap warna hijau
- 3) Pada gejala yang lebih berat, daun muda jika akan berubah warna menjadi kekuningan dan menjadi nekrotik pada tingkat defisiensi yang lebih parah.

- 4) Agar pertumbuhan tanaman optimal maka ketersediaan unsur Mg harus sesuai dengan jumlah yang dibutuhkan oleh tanaman. Ketersediaan Mg yang melebihi kebutuhan tanaman akan berdampak buruk bagi tanaman, hal tersebut akan mempengaruhi penyerapan kation lainnya. Jika Mg yang terkandung di dalam vakuola banyak maka akan mengakibatkan kekahatan Ca dan Kalium (McCauley *et al.*, 2011).

#### 4.4 Kebutuhan Unsur Hara yang Ideal bagi Tanaman

Pada dasarnya jumlah unsur hara yang terdapat di dalam tanaman akan mencerminkan jumlah unsur hara yang berada di dalam tanah. Hal tersebut menandakan unsur hara yang ada dalam tanah mempengaruhi pertumbuhan tanaman. Jika zat hara dalam jaringan tanaman rendah, maka pertumbuhan tanaman juga akan rendah begitu juga sebaliknya.



Gambar 1. Hubungan konsentrasi hara yang terkandung dalam jaringan tanaman dengan pertumbuhan tanaman (Baligar dan Duncan, 1990)

Kebutuhan tiap jenis tanaman akan berbeda terhadap masing-masing unsur hara yang ada. Jika diperhatikan pada Gambar 1 maka ketersediaan hara yang ideal bagi pertumbuhan tanaman adalah pada zona kecukupan. Jika lebih rendah dari zona tersebut maka tanaman mengalami defisiensi/ kekurangan hara dan jika lebih tinggi dari zona kecukupan maka tanaman mengalami kelebihan/ keracunan hara. Kedua hal tersebut akan menyebabkan pertumbuhan tanaman terganggu sehingga produksi tanaman juga tidak optimal (Tan, 2011).

## DAFTAR PUSTAKA

- Ayeni, L.S., dan E.O. Adeleye. 2011. Soil Nutrient Status and Nutrient Interactions as Influenced by Agro Wastes and Mineral Fertilizer in an Incubation Study in the South West Nigeria. *International Journal of Soil Science* 6(1):60-68.
- Baligar, V.C. and R.R. Duncan. 1990. *Crops as Enhancers of Nutrient Use*. Toronto. Academic Press. Inc. 574p.
- Hanafiah, K.A. 2005. *Dasar-Dasar Ilmu Tanah*. Jakarta. Raja Grafindo Persada.
- McCauley, A., C. Jones., and J. Jacobsen. 2011. Plant Nutrient Functions and Deficiency and Toxicity Symptoms. *Nutrient Management Module*. 9(9) p 1-16.
- Marschner, H. 1986. *Mineral Nutrition in Higher Plants*. London. Academic Press Inc. 674p.
- Mengel, K., and E.A. Kirkby. 1982. *Principles of Plants Nutrition*. Switzerland. International Potash Institute.
- Nieves-Cardones, M., F. Aleman, V. Martinez dan F. Rubio. 2014. K<sup>+</sup>Uptake in Germination and Seedling Performance of Ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam cv Borwoltra). *Journal Science Food Agriculture*. 61:155-160.
- Rosmarkam, A. dan N.W. Yuwono. 2012. *Ilmu Kesuburan Tanah*. Yogyakarta. Penerbit Karnisius.
- Sugito, Y. 2012. *Ekologi Tanaman: Pengaruh Faktor Lingkungan terhadap Pertumbuhan Tanaman dan Beberapa Aspeknya*. Semarang. Universitas Brawijaya press (UB Press).

- Tan, K.H. 2011. Principles of Soil Chemistry Fourth Edition. CRC Press Taylor and Francis Group. New York. p 195-222.
- Tisdale, S.L., and W.L. Nelson. 1985. Soil Fertility and Fertilizer. New York. McMillan.Pub. Co. Inc. p 164.

# **BAB 5**

## **PENGANGKUTAN BAHAN ORGANIK DALAM FLOEM**

Oleh Dian Diani Tanjung

### **5.1 Pendahuluan**

Tumbuhan mengembangkan organ tubuhnya seperti akar dan daun. Akar berfungsi sebagai penambat tubuh tumbuhan, mengambil air dan nutrisi dari dalam tanah. Daun menyerap energi cahaya radiasi matahari dan melakukan pertukaran gas di udara. Seiring bertambahnya ukuran tumbuhan, jarak antara akar dan daun semakin jauh terpisah. Dengan demikian, sistem transportasi pada tumbuhan untuk menempuh jarak tersebut kemudian berkembang sehingga memungkinkan daun dan akar bertukar material penyerapan dan asimilasinya secara efisien.

Transportasi material dan asimilasi di dalam tubuh tumbuhan melalui dua jaringan pembuluh yaitu xilem dan floem. Xilem adalah jaringan pembuluh yang mengangkut air dan nutrisi dari akar ke seluruh tubuh tumbuhan terutama daun. Floem adalah jaringan yang mentranslokasi hasil fotosintesis dari daun dewasa ke seluruh bagian tanaman yang bertujuan untuk pertumbuhan atau cadangan makanan. Selain itu, floem juga mendistribusikan kembali air dan berbagai senyawa ke seluruh tubuh tumbuhan.

Beberapa senyawa ini di antaranya tiba di daun dewasa melalui xilem kemudian dapat keluar dari daun tanpa modifikasi atau dimetabolisme terlebih dahulu.

Penelitian mengenai mekanisme jaringan floem telah banyak diteliti pada kelompok tumbuhan angiospermae, oleh karena itu, selanjutnya pembahasan translokasi pada floem akan banyak didiskusikan pada kelompok tumbuhan tersebut. Beberapa aspek translokasi pada floem yang telah diteliti secara luas dan dianggap telah dipahami dengan baik diantaranya bentuk dan struktur floem, jalur dan pola translokasi, bahan yang ditranslokasi di floem, pemuatan dan pembongkaran floem, alokasi dan partisi produk fotosintesis.

## 5.2 Bentuk dan struktur floem

Floem merupakan jaringan pengangkut fotosintat dari daun ke seluruh tubuh tumbuhan melalui jalur transpor jarak-jauh. Floem umumnya ditemukan di sisi luar jaringan pembuluh primer dan sekunder. Berbeda dengan xilem, floem tersusun dari sel-sel dewasa yang tetap mempertahankan fungsi beberapa organ selnya. Sel-sel floem memiliki bentuk yang terspesialisasi dengan beberapa bagian memiliki struktur yang memungkinkan zat-zat terlarut dapat ditranslokasikan ke berbagai bagian tubuh tumbuhan.

**Pembuluh tapis** (*sieve element*) merupakan sel-sel floem yang menghantarkan gula dan bahan organik lainnya ke seluruh tubuh tumbuhan. Pembuluh tapis adalah istilah komprehensif yang mencakup **anggota pembuluh-tapis** (*sieve tube element*) yang sangat terspesialisasi pada angiospermae dan **sel tapis** (*sieve cell*) yang relatif tidak terspesialisasi pada gymnospermae. Pembuluh tapis (sel tapis

maupun anggota pembuluh-tapis) mempunyai area tapis khusus pada dinding selnya dimana terdapat pori-pori yang menghubungkan antar selnya. Diameter pori-pori pada area tapis berkisar  $<1 \mu\text{m}$  hingga kira-kira  $15 \mu\text{m}$ . Tumbuhan angiospermae memiliki area tapis terdiferensiasi pada ujung dindingnya menjadi **lempengan tapis** (*sieve plate*). Lempengan tapis memiliki pori-pori yang lebih besar dibandingkan area tapis lainnya sehingga merupakan saluran terbuka yang memungkinkan terjadinya transpor antar sel. Diameter dan jumlah pori-pori tapis pada lempengan tapis sangat bervariasi antar spesies. Pori-pori tapis berukuran besar (diameter  $>10\mu\text{m}$ ) ditemukan pada *Cucurbita sp.* ( $10,3\mu\text{m}$ ), genus *Tertracera* ( $13,1 \mu\text{m}$ ), dan *Ailanthus altissima* ( $14,3 \mu\text{m}$ ) sedangkan banyak spesies lainnya memiliki pori-pori sekitar atau kurang dari  $1 \mu\text{m}$  (Kalmbach dan Helariutta, 2019). Masing-masing anggota pembuluh-tapis kemudian disatukan dan membentuk rangkaian memanjang yang disebut sebuah **tabung tapis** (*sieve tube*).

Sel-sel pembuluh tapis saat dewasa tidak memiliki banyak struktur yang biasanya ditemukan pada sel hidup tumbuhan. Selama masa perkembangannya, sel pembuluh tapis kehilangan inti sel dan tonoplas. Selain itu, tidak ditemukan mikrofilamen, mikrotubulus, badan golgi, dan ribosom pada sel pembuluh tapis dewasa. Saat dewasa, sel tersebut hanya mempertahankan membran plasma, mitokondria (termodifikasi), plastida, dan retikulum endoplasma halus. Pada tumbuhan angiospermae, jaringan floem juga mengandung sel pendamping (*companion cell*) dan sel parenkim (sel yang menyimpan dan melepaskan molekul makanan). Setiap anggota pembuluh-tapis dikaitkan dengan satu atau lebih sel pendamping (Taiz dan Zeiger, 2002).

Pembentukan anggota pembuluh-tapis dan sel pendampingnya berasal dari pembelahan sel induk tunggal. Oleh karenanya, terdapat banyak plasmodesmata yang menghubungkan antara dinding anggota pembuluh-tapis dengan sel pendampingnya. Hubungan erat secara fungsional ini memungkinkan terjadinya pertukaran zat terlarut antara kedua sel tersebut. Sel pendamping berperan dalam pengangkutan fotosintat dari sel *source* (sumber) pada daun dewasa ke pembuluh tapis pada urat-urat daun. Sel pendamping juga diyakini mengambil alih beberapa fungsi metabolisme penting seperti sintesis protein yang berkurang atau hilang selama diferensiasi pembuluh tapis (Bostwick *et al.* 1992).

Keberadaan mitokondria yang cukup banyak dalam sel pendamping dapat memasok energi dalam bentuk ATP ke pembuluh tapis. Setidaknya ada tiga jenis sel pendamping yang berbeda dalam vena kecil daun dewasa. Ketiga jenis sel tersebut memiliki sitoplasma padat dan mitokondria yang melimpah dan menjadi sangat penting dalam mekanisme translokasi di dalam floem. Ketiga jenis sel tersebut yaitu; Sel pendamping biasa (*ordinary companion cells*), sel transfer (*transfer cell*), dan sel perantara (*intermediary cell*).

Anggota pembuluh-tapis pada sebagian besar angiospermae kaya akan protein floem yang disebut protein-P, ditemukan di semua tumbuhan dikotil dan banyak monokotil serta tidak ada di gymnospermae. Bentuk protein-P berbeda (tubular, fibrillar, granular, dan kristal) tergantung pada spesies dan kematangan sel. Protein-P berperan dalam pertahanan terhadap luka akibat serangan serangga pemakan floem dan membantu menutup luka pada pembuluh tapis.

### 5.3 Jalur dan Pola Translokasi

Getah floem ditranslokasikan dari daerah pemasok yang disebut sumber (*source*) ke daerah metabolisme atau penyimpanan yang disebut *sink*. Sumber adalah organ tumbuhan yang merupakan penghasil gula yang berasal dari fotosintesis atau pemecahan pati dari organ penyimpan. *Sink* adalah organ yang merupakan mengkonsumsi gula atau menyimpan gula. Akar, tunas, batang, dan buah yang tumbuh merupakan penyerap gula. Organ-organ tersebut harus mengimpor gula untuk perkembangannya. Organ penyimpan, seperti umbi, dapat menjadi sumber atau *sink* tergantung musimnya. Saat menimbun gula di musim panas, organ tersebut menjadi *sink*. Setelah menghentikan dormansi pada musim semi, organ ini menjadi sumber gula karena patinya dipecah menjadi gula yang dibawa ke ujung pucuk yang sedang tumbuh.

Pola transpor di floem merupakan pergerakan gula dari sumber ke *sink*. Akan tetapi, jalur spesifik yang terlibat seringkali lebih kompleks. Hal ini dikarenakan tidak semua sumber dapat memasok gula keseluruh *sink* pada tumbuhan. Beberapa sumber hanya memasok gula ke *sink* tertentu berdasarkan ketentuan sebagai berikut;

1. *Proximity* (kedekatan). Semakin dekat jarak antara sumber dengan *sink*-nya maka gula akan ditransfer ke *sink* terdekat. Daun dewasa bagian atas akan memberikan gula ke pucuk yang sedang tumbuh dan daun muda. Daun bagian bawah sebagian besar menyuplai ke sistem akar.
2. *Development* (perkembangan). Suatu organ dapat menjadi *sink* berdasarkan tahap perkembangan tumbuhan. Ujung

akar dan pucuk biasanya menjadi *sink* utama selama masa pertumbuhan vegetatif. Sedangkan, buah umumnya menjadi *sink* utama selama masa perkembangan generatif, terutama dari daun-daun sumber di dekatnya.

3. *Vascular connections* (hubungan berkas pengangkut). Daun dewasa secara khusus akan memasok gula ke *sink* yang memiliki hubungan langsung dengan berkas pengangkutnya.
4. *Modification of translocation pathways* (modifikasi jalur translokasi). Gangguan pada jalur translokasi karena pelukaan atau pemangkasan (*prunning*) dapat mengubah pola pengiriman gula dari sumber ke *sink*. Penghilangan daun dewasa bagian bawah dapat mengubah translokasi daun dewasa bagian atas untuk mentranslokasi gula menuju akar. Sebaliknya, penghilangan daun dewasa bagian atas dapat memaksa daun dewasa bagian bawah mentranslokasikan gula ke arah pucuk tumbuhan.

## 5.4 Bahan yang Ditranlokasi dalam Floem

Getah floem memiliki pH tinggi (7–8) dan mengandung zat terlarut berkonsentrasi tinggi sekitar 15–25% bahan kering (Marschner, 2012). Air merupakan zat yang paling banyak diangkut dalam floem. Sedangkan zat yang terlarut dalam air seperti sukrosa, asam amino, hormon, dan beberapa ion anorganik dapat ditranslokasikan melalui floem. Kecepatan bahan yang ditranslokasikan dalam floem rata-rata sekitar 1 m per jam. Kecepatan transpor di floem ini jelas cukup tinggi dan jauh melebihi kecepatan difusi atau aliran sitoplasma.

### *Sukrosa*

Karbohidrat merupakan zat terlarut dalam air yang banyak ditranslokasikan dan umumnya merupakan gula non pereduksi yang bersifat kurang reaktif dibandingkan gula pereduksi (seperti glukosa dan fruktosa). Gula non-pereduksi seperti sukrosa, gugus keton atau aldehida direduksi menjadi alkohol atau digabungkan dengan gugus serupa pada gula lainnya. Alkohol gula yang ditranslokasi termasuk manitol dan sorbitol. Sukrosa adalah karbohidrat yang paling sering diangkut dalam pembuluh tapis sekitar 90% dari padatan. Sejumlah sukrosa selalu ditemukan dalam getah pembuluh tapis dan konsentrasinya dapat mencapai 0,3 hingga 0,9 M.

### *Nitrogen*

Nitrogen di floem sebagian besar dalam bentuk asam amino dan amida, terutama glutamat dan aspartat serta masing-masing amida, glutamin dan asparagin. Kadar asam amino dan asam organik yang ditemukan biasanya sangat bervariasi dan umumnya kadarnya lebih rendah dibandingkan dengan karbohidrat.

Nitrogen diangkut ke seluruh tanaman dalam bentuk anorganik atau organik, dengan bentuk utamanya bergantung pada beberapa faktor seperti jalur pengangkutan. Meskipun nitrogen diangkut di floem hampir seluruhnya dalam bentuk organik, di xilem nitrogen dapat diangkut sebagai nitrat atau sebagai bagian dari molekul organik. Spesies yang memiliki bintil akar pengikat nitrogen akan bergantung pada nitrogen di atmosfer sebagai sumber nitrogen utamanya dan bukan pada nitrat tanah. Setelah diubah menjadi bentuk organik, nitrogen ini diangkut dalam xilem ke pucuk, biasanya dalam bentuk amida atau ureida seperti alantoin, asam alantoat, atau sitrulin.

Kadar nitrogen pada daun dewasa cukup stabil, menunjukkan bahwa setidaknya sebagian dari kelebihan nitrogen yang terus menerus masuk melalui xilem didistribusikan kembali melalui floem ke buah atau daun yang lebih muda. Kadar senyawa nitrogen dalam floem cukup tinggi selama penuaan daun. Pada spesies berkayu, daun yang menua memobilisasi dan mengeksport senyawa nitrogen ke jaringan kayu untuk disimpan. Sedangkan pada tanaman herba, nitrogen umumnya dieksport ke biji. Zat terlarut lainnya, seperti ion mineral, didistribusikan ke sink nya dengan cara yang sama.

### ***Hormon***

Dalam pembuluh tapis ditemukan hampir semua hormon tumbuhan endogen, termasuk auksin, giberelin, sitokinin, dan asam absisat. Tunas menghasilkan ZPT seperti auksin yang dapat dengan cepat diangkut melalui floem ke akar, sedangkan akar menghasilkan sitokinin yang berpindah ke pucuk melalui xilem. Giberelin (GA) dan asam absisat (ABA) juga diangkut ke seluruh tubuh tumbuhan dalam sistem berkas pembuluh. Hormon tumbuhan berperan dalam mengatur hubungan sumber-*sink*. Hormon mempengaruhi partisi fotosintat dengan mengendalikan pertumbuhan *sink*, senesen daun, dan proses perkembangan lainnya.

## ***Protein***

Protein juga ditemukan di floem, termasuk protein-P berfilamen, protein yang terlibat dalam penutupan luka pada pembuluh tapis. Selain itu terdapat protein kinase (fosforilasi protein), tioredoksin (reduksi disulfida), ubiquitin (pergantian protein), chaperon (pelipatan protein), dan penghambat protease (perlindungan protein floem dari degradasi dan pertahanan terhadap serangga pemakan floem) (Schobert *et al.* 1995; Yoo *et al.* 2000). Protein yang disintesis di dalam sel pendamping dapat dengan mudah memasuki pembuluh tapis melalui plasmodesmata yang menghubungkan kedua jenis sel tersebut.

## ***Ion Anorganik***

Zat terlarut anorganik yang bergerak di floem antara lain kalium, magnesium, fosfat, dan klorida. Sebaliknya, nitrat, kalsium, belerang, dan besi relatif tidak bergerak di floem. Dari unsur hara tersebut, K biasanya terdapat dalam konsentrasi tertinggi, diikuti oleh P, Mg dan S. Konsentrasi sulfat dalam getah floem bisa setinggi konsentrasi fosfat. Sebaliknya, konsentrasi Ca dalam getah floem selalu sangat rendah, apapun jenis tumbuhannya. Ketersediaan kalium di apoplas akan meningkatkan aliran sukrosa ke dalam apoplas (*sucrose efflux*). Hal ini menunjukkan bahwa pasokan nutrisi tumbuhan sangat mempengaruhi pertumbuhan *sink*.

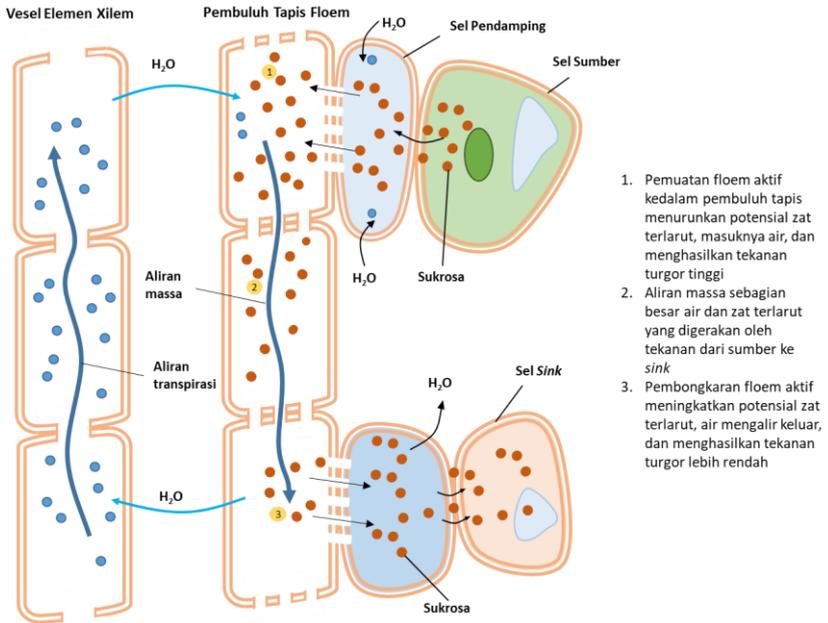
## **5.5 Mekanisme Translokasi Pada Floem**

Mekanisme translokasi floem pada angiospermae dijelaskan dengan model aliran tekanan. Model ini pertama kali diusulkan oleh Ernst Münch pada tahun 1930 yang menjelaskan translokasi floem sebagai aliran larutan dalam pembuluh tapis yang didorong

oleh gradien tekanan yang dihasilkan secara osmotik antara sumber dan *sink*. Dengan kata lain, pergerakan aliran ini dilakukan secara pasif. Akan tetapi, proses pemuatan sumber dimana fotosintat dari sel fotosintesis dipindahkan ke pembuluh tapis membutuhkan energi.

Di sumber, pemuatan floem yang digerakkan oleh energi menyebabkan akumulasi gula dalam pembuluh tapis. Kondisi ini menghasilkan potensial zat terlarut yang rendah (negatif) dan menyebabkan potensial air menurun tajam. Menanggapi gradien potensial air ini, maka air akan memasuki pembuluh tapis dan menyebabkan tekanan turgor meningkat.

Di bagian ujung jalur translokasi terjadi pembongkaran floem yang menyebabkan konsentrasi gula lebih rendah di ujung pembuluh tapis tersebut. Kondisi ini menyebabkan potensial zat terlarut lebih tinggi (lebih positif) dalam pembuluh tapis di jaringan *sink*. Ketika potensial air floem naik melebihi potensi xilem, maka air cenderung akan meninggalkan floem sebagai respons terhadap gradien potensial air, menyebabkan penurunan tekanan turgor pada pembuluh tapis *sink* (gambar 1).



**Gambar 5. 1. Aliran massa pada translokasi di floem**

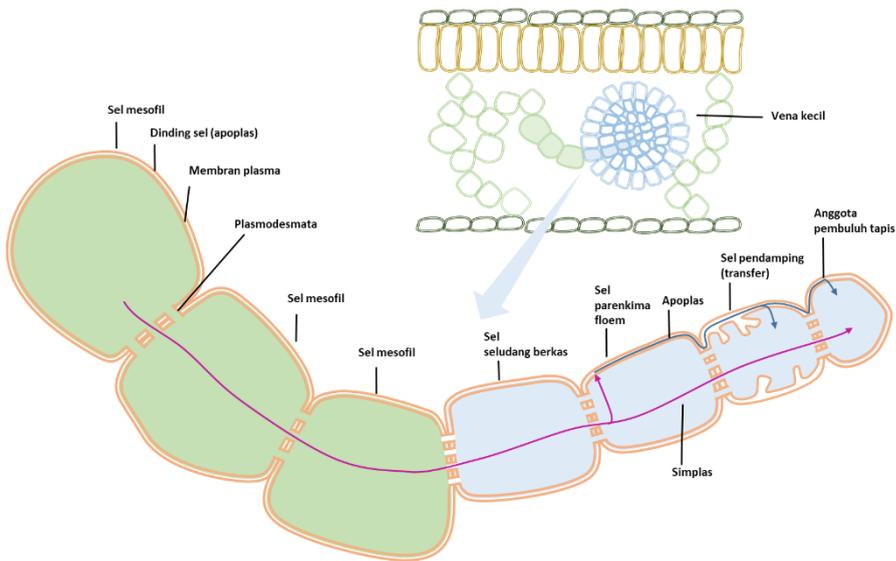
Pelat saringan sangat meningkatkan resistensi di sepanjang jalur translokasi dan membentuk serta memelihara gradien tekanan yang besar dalam pembuluh tapis antara sumber dan *sink*. Isi pembuluh tapis secara fisik didorong sepanjang jalur translokasi sebagai aliran massa (*bulk flow*). Aliran massa ini merupakan pergerakan terpadu berbagai molekul sebagai respons terhadap gradien tekanan.

Oleh karena itu, pergerakan air pada jalur translokasi didorong oleh gradien tekanan dan bukan oleh gradien potensial air. Translokasi jarak jauh dalam tabung tapis pada akhirnya bergantung pada mekanisme aktif yang membutuhkan energi, yaitu mekanisme transpor jarak-pendek saat proses pemuatan dan pembongkaran

floem. Mekanisme aktif akhirnya bertanggung jawab untuk mengatur gradien tekanan.

### ***Pemuatan floem***

Pada siang hari, triosa fosfat yang dihasilkan pada fotosintesis diangkut dari kloroplas ke sitosol dan diubah menjadi sukrosa. Sedangkan pada malam hari, karbon yang tersimpan dalam bentuk pati keluar dari kloroplas dan diubah menjadi sukrosa. Sukrosa pada sel mesofil kemudian berpindah ke sekitar pembuluh tapis pada urat terkecil daun melalui jalur traspor jarak-pendek. Pergerakan sukrosa atau zat terlarut lainnya dari mesofil kloroplas ke pembuluh tapis daun dewasa merupakan proses pemuatan floem (*floem loading*).



**Gambar 5. 2. Pengisian sukrosa ke dalam floem**

Pembuluh tapis dan sel pendampingnya merupakan unit fungsional yang disebut kompleks pembuluh tapis-sel pendamping. Selama proses pemuatan, sukrosa diangkut ke dalam kompleks pembuluh tapis-sel pendamping melalui simplas melintasi

plasmodesmata sehingga sukrosa menjadi lebih terkonsentrasi pada kompleks tersebut (gambar 2). Pada banyak spesies, sukrosa keluar dari sel ke dalam apoplas disekitar kompleks pembuluh tapis-sel pendamping agar dapat dipindahkan ke dalam pembuluh tapis. Kompleks pembuluh tapis-sel pendamping yang saat ini kaya akan sukrosa dan zat terlarut lainnya, kemudian di ekspor melalui jaringan vaskuler ke organ *sink*. Proses ini disebut tranpor jarak-jauh. Proses pemuatan di sumber dan pembongkaran di *sink* memberikan kekuatan pendorong yang menghasilkan gradien tekanan. Gradien tekanan ini kemudian mendorong getah floem bergerak dalam transpor jarak-jauh.

Beberapa spesies memiliki sel pendamping termodifikasi yang disebut sel transfer. Sel transfer memiliki pertumbuhan dinding ke arah dalam yang dapat meningkatkan pemindahan sukrosa serta zat terlarut antara apoplas dan simplas. Oleh karenanya, sukrosa yang keluar dari sel mesofil dapat mencapai kompleks pembuluh tapis-sel pendamping melalui kombinasi lintasan simplas dan apoplas. Spesies yang menggunakan jalur apoplas, melakukan pemuatan sukrosa secara aktif ke dalam kompleks pembuluh tapis-sel pendamping oleh transporter selektif yang digerakan oleh energi pada membran plasma sel-sel tersebut.

Konsentrasi sukrosa yang lebih tinggi pada kompleks pembuluh tapis-sel pendamping dibandingkan di sel sekitarnya menunjukkan bahwa sukrosa diangkut secara aktif melawan gradien potensial kimianya. Oleh karena itu, terdapat simpporter sukrosa- $H^+$  yang memediasi pengangkutan sukrosa dari apoplas ke dalam kompleks pembuluh tapis-sel pendamping. Energi yang digunakan merupakan energi ATP dimana *ATP-ase* pemompa proton

ditemukan pada membran plasma sel transfer (tanaman kacang panjang) dan sel pendamping (tanaman *Arabidopsis*).

Keterlibatan simpporter dalam pemuatan floem secara apoplas menunjukkan terdapat mekanisme selektivitas karena terdapat simpporter spesifik untuk molekul gula tertentu. Sebaliknya, pemuatan secara simplas bergantung pada difusi gula dari sel-sel mesofil ke pembuluh tapis melalui plasmodesmata. Pada beberapa spesies menunjukkan penggunaan jalur simplas dan apoplas dalam pembuluh tapis yang berbeda pada vena daun yang sama atau pada vena daun dengan ukuran yang berbeda (Turgeon dkk. 2001). Akan tetapi, metabolit lainnya, seperti asam organik dan hormon, dapat memasuki pembuluh tapis secara pasif.

### ***Pembongkaran floem***

Proses transpor getah floem ke organ *sink* merupakan proses impor. Getah floem yang diangkut dari pembuluh tapis ke organ *sink* melalui serangkaian langkah transpor disebut pembongkaran floem (*phloem unloading*). Langkah transpor yang terjadi yaitu;

- Pembongkaran (*unloading*) pembuluh tapis. Merupakan proses dimana gula yang di impor meninggalkan pembuluh tapis pada jaringan sink.
- Transportasi jarak-pendek. Setelah pembongkaran pembuluh tapis, gula di transpor ke sel di dalam *sink* melalui jalur transpor jarak-pendek. Jalur ini juga disebut *post-sieve element transport*.
- Penyimpanan dan metabolisme. Pada langkah ini, gula kemudian akan disimpan atau digunakan untuk metabolisme di sel *sink*.

Struktur dan fungsi *sink* sangat bervariasi bergantung pada organ *sink*-nya sehingga tidak ada skema tunggal dalam pembongkaran floem. Gula di *sink* dapat bergerak seluruhnya dengan cara simplas melalui plasmodesmata atau apoplas. Pembongkaran secara simplas diketahui terjadi pada daun muda tanaman dikotil (gula bit dan tembakau), juga ditemukan pada daerah meristematik dan pemanjangan pada ujung akar primer. Pada beberapa organ *sink* lainnya, sebagian jalur pembongkaran floem bersifat apoplastik. Langkah apoplastik diperlukan dalam perkembangan benih karena tidak ada koneksi simplastik antara jaringan maternal dan jaringan embrio.

Pembongkaran floem secara simplas juga dimanfaatkan dalam pertumbuhan daun, akar, dan organ penyimpan dimana karbon disimpan dalam bentuk pati atau protein. Gula transpor yang dikirim pada *sink* tersebut akan digunakan sebagai substrat untuk respirasi dan dimetabolisme menjadi senyawa yang dibutuhkan untuk pertumbuhan. Metabolisme sukrosa akan menyebabkan konsentrasi sukrosa di sel *sink* rendah sehingga membentuk gradien konsentrasi untuk penyerapan gula (*sugar uptake*) kembali. Dengan begitu, gula akan terus bergerak dari pembuluh tapis yang memiliki konsentrasi gula tinggi ke sel *sink* yang memiliki konsentrasi gula rendah. Akibat gradien konsentrasi gula ini, molekul gula berdifusi dari floem ke dalam jaringan *sink* dan air mengikuti melalui osmosis (Campbell, 2021).

Daun dikotil seperti tomat atau buncis memulai perkembangannya sebagai organ *sink*. Selanjutnya, ketika daun melebar sekitar 25% terjadi peralihan dari status *sink* ke statusnya menjadi sumber. Transisi ini kemudian selesai ketika daun melebar 40 hingga 50%. Selama masa transisi, bagian ujung daun

mengekspor gula sedangkan bagian pangkalnya mengimpor gula dari sumber lain. Ekspor gula dimulai ketika pemuatan floem telah mengakumulasi cukup fotosintat dalam pembuluh tapis untuk mendorong translokasi keluar dari daun.

## 5.6 Alokasi dan Partisi Fotosintat

Ikatan pembuluh pada tumbuhan membentuk sistem pipa yang dapat mengarahkan aliran fotosintat ke berbagai organ *sink*. Daun sumber memungkinkan berkomunikasi dengan banyak sink karena sistem pembuluh umumnya saling berhubungan. Komunikasi ini memungkinkan penentuan tingkat kebutuhan suatu organ *sink* tertentu pada suatu waktu dengan *sink* lainnya, sehingga tumbuhan akan membagi dan mengirimkan jumlah karbon terfiksasi (dalam bentuk pati maupun sukrosa) tidak sama antara suatu sink dengan sink lainnya. Regulasi diversifikasi karbon terfiksasi ke dalam berbagai jalur metabolisme disebut **alokasi**. Sedangkan distribusi diferensial fotosintat dalam tumbuhan disebut **partisi**.

Sumber dapat mengalokasikan karbon terfiksasi untuk penyimpanan, metabolisme, dan transportasi. Pati pada sebagian besar spesies merupakan bentuk senyawa penyimpanan utama tumbuhan yang disintesis dan disimpan di dalam kloroplas. Karbon terfiksasi juga dapat dimanfaatkan dalam metabolisme sel untuk memenuhi kebutuhan energi sel atau menyediakan kerangka karbon dalam sintesis senyawa tertentu. Karbon terfiksasi juga dapat dimasukkan ke dalam gula transpor untuk di ekspor ke berbagai jaringan *sink* dimana sebagian transpor gula juga dapat disimpan sementara di vakuola.

Alokasi juga merupakan proses kunci dalam jaringan *sink*. Gula transpor yang telah dibongkar dan memasuki sel *sink* dapat tetap seperti itu atau diubah menjadi berbagai senyawa lainnya. Dalam *sink*-penyimpanan, karbon terfiksasi dapat terakumulasi sebagai sukrosa atau heksosa dalam vakuola atau sebagai pati dalam amiloplas. Dalam *sink*-pertumbuhan, gula dapat digunakan untuk respirasi dan sintesis molekul lain yang diperlukan untuk pertumbuhan.

Semakin besar kemampuan suatu *sink* untuk menyimpan atau memetabolisme gula impor (proses alokasi), semakin besar pula kemampuannya bersaing untuk mendapatkan fotosintat yang diekspor dari sumbernya. Persaingan ini kemudian akan menentukan distribusi transpor gula di antara berbagai jaringan *sink* tanaman (partisi fotosintat). Partisi atau distribusi gula akan menentukan pola pertumbuhan antara tunas dan akar. Komunikasi antara sumber dan *sink* bisa dalam bentuk sinyal kimiawi mencakup hormon dan nutrisi tumbuhan seperti kalium dan fosfat. Transpor gula itu sendiri juga dapat menjadi sebuah komunikasi dengan adanya tekanan turgor pada pembuluh tapis.

Peningkatan laju fotosintesis akan meningkatkan laju translokasi dari sumber ke *sink*. Sedangkan pola translokasinya bergantung pada; posisi *sink* dengan sumbernya, koneksi berkas pengangkut antara sumber dengan *sink*-nya, dan persaingan antar sesama *sink*. *Sink* yang paling kuat akan lebih mudah menguras kandungan gula dari pembuluh tapis sehingga meningkatkan gradien tekanan dan laju translokasi ke arah *sink* tersebut. Kekuatan *sink* (*sink strength*), merupakan kemampuan *sink* untuk memobilisasi fotosintat menuju dirinya sendiri. Kekuatan *sink* bergantung pada dua faktor yaitu ukuran *sink* (*sink size*) dan

aktivitas sink (*sink activity*). Ukuran sink adalah berat total jaringan sink, dan aktivitas sink adalah laju serapan atau uptake fotosintat per satuan berat jaringan sink.

## DAFTAR PUSTAKA

- Bostwick, D. E., Dannenhoffer, J. M., Skaggs, M. I., Lister, R. M., Larkins, B. A., and Thompson, G. A. 1992. Pumpkin phloem lectin genes are specifically expressed in companion cells. *Plant Cell* 4: 1539–1548.
- Campbell NA, dkk. 2021. Biologi. Edisi Kedua belas. Hoboken: Pearson Education, Inc.
- Kalmbach, L., and Helariutta, Y. 2019. Sieve Plate Pores in the Phloem and the Unknowns of Their Formation. *Plants* 8:1-13
- Marschner, P. 2012. Mineral Nutrition of Higher Plants. Third Edition. San Diego: Academic Press.
- Schobert, C., Grossmann, P., Gottschalk, M., Komor, E., Pecsvaradi, A., and zur Nieden, U. 1995. Sieve-tube exudate from *Ricinus communis* L. seedlings contains ubiquitin and chaperones. *Planta*. 196: 205–210.
- Taiz, L. and E. Zeiger. 2002. Plant Physiology. Sinauer Associates, Inc., Publisher. Sunderland, Massa-chusetts.
- Turgeon, R., Medville, R., and Nixon, K.C. 2001. The evolution of minor vein phloem and phloem loading. *Am. J. Bot.* 88:1331–1339
- Yoo, B.-C., Aoki, K., Xiang, Y., Campbell, L. R., Hull, R. J., Xoconostle-Cazares, B., Monzer, J., Lee, J.-Y., Ullman, D. E., and Lucas, W.J. 2000. Characterization of *Cucurbita maxima* phloem serpin-1 (CmPS-1): A developmentally regulated elastase inhibitor. *J. Biol. Chem.* 275: 35122–35128.



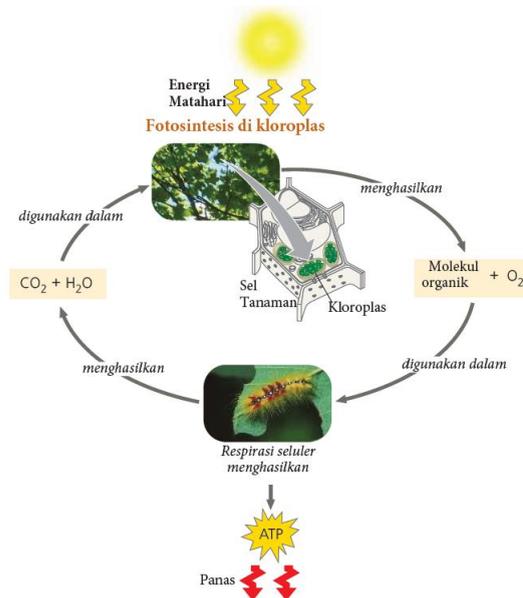
# BAB 6

## PROSES FOTOSINTESIS

Oleh Ulfah Anis

### 6.1 Fotosintesis

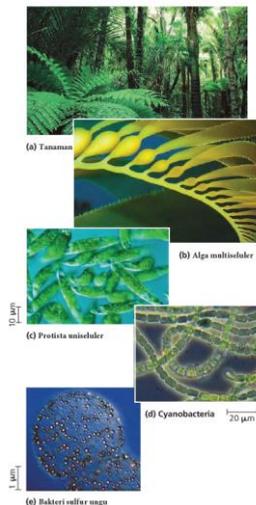
Fotosintesis merupakan proses kimia yang berkaitan dengan konversi bahan organik dari bahan anorganik melalui energi yang berasal dari sinar matahari. Proses fotosintesis secara singkat dapat dilihat pada Gambar 6.1. Proses fotosintesis dapat menghasilkan bahan organik yang menjadi sumber nutrisi bagi organisme untuk hidup. Bahan organik dalam proses tersebut yaitu gula.



Gambar 6. 1. Proses Fotosintesis secara singkat (Urry et al., 2020)

Suatu organisme dapat dikelompokkan menjadi 2 kelompok yaitu autotroph dan heterotroph. Autotroph adalah kelompok organisme yang dapat menghasilkan makanan sendiri, sedangkan heterotroph adalah kelompok organisme yang tidak mampu menghasilkan makanan sendiri. Kelompok heterotroph hidup dari senyawa yang dihasilkan dari organisme lainnya. Kelompok heterotroph dikenal sebagai organisme pengurai.

Tumbuhan termasuk kelompok autotroph karena mampu menghasilkan makanan sendiri. Tumbuhan bersifat autotroph karena mampu memanfaatkan energi sinar matahari untuk menyusun molekul organik dari sumber anorganik. Secara spesifik tumbuhan disebut fotoautotrof karena dapat menghasilkan makanan sendiri dengan bantuan cahaya matahari (fotosintesis) (Gambar 6.1). Fotosintesis terjadi pada tumbuhan, alga multiseluler, *cyanobacteria*, bakteri sulfur ungu, dan protista uniseluler (Gambar 2).



**Gambar 6. 2.** Contoh beberapa organisme fotoautotrof yang mengalami proses fotosintesis (Urry et al., 2020)

Cahaya energi digunakan oleh organisme-organisme pada Gambar 6.2, untuk mendorong sintesis molekul organik dari karbondioksida dan air. Organisme-organisme tersebut memperoleh makanan dan mengatur kehidupan di dunia ini oleh mereka sendiri. Pada gambar 6.2(a) tumbuhan di darat memproduksi makanan untuk kehidupan mereka sendiri, sedangkan di lingkungan perairan, organisme fotoautotrof adalah alga multiseluler seperti rumput laut (Gambar 6.2b). Beberapa protista uniseluler bukan alga, seperti Euglena (Gambar 6.2c). Organisme lainnya yaitu Cyanobacteria, yang tergolong prokariot (Gambar 6.2d). Prokariot lainnya yaitu bakteri sulfur (belerang) ungu yang menghasilkan belerang (Gambar 6.2e). Belerang tersebut berada di dalam sel dan membentuk gumpalan kuning.

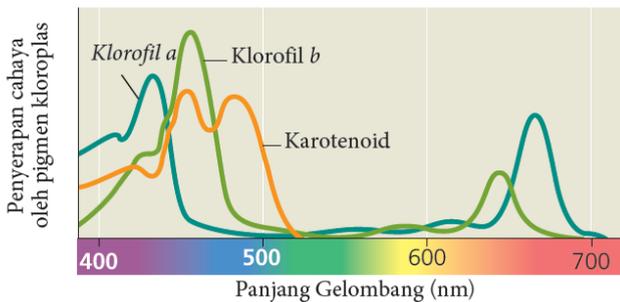
## 6.2 Tempat Fotosintesis pada Tumbuhan

Tumbuhan yang berwarna hijau memiliki kloroplas disetiap bagiannya, baik batang maupun daunnya. Bagian daun adalah bagian yang menjadi tempat paling banyak untuk proses fotosintesis tumbuhan. Bagian daun atau organel tempat fotosintesis pada tumbuhan dapat dilihat pada Gambar 6.5.

Gambar 6.5 menunjukkan bila daun diiris secara melintang maka dapat dilihat bagian kloroplas, tempat terjadinya fotosintesis. Bagian kloroplas memiliki pigmen berwarna hijau yang disebut **klorofil**. Klorofil tersebut yang menyebabkan bagian pada tumbuhan berwarna hijau. Klorofil bukan satu-satunya pigmen yang ada di kloroplas. Ada pigmen lainnya yang terdapat dalam kloroplas misalnya karotenoid. **Karotenoid** merupakan pigmen

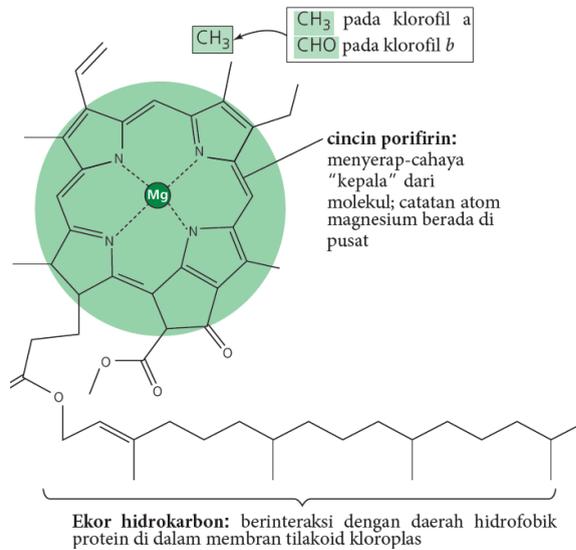
oranye dan kuning. Karoten yang terdapat dalam kloroplas bersama klorofil adalah karotenoid.

Gambar 6.3 menjelaskan penyerapan spectra oleh klorofil a dan klorofil b, serta karotenoid. Penyerapan yang dimaksud merupakan penyerapan cahaya oleh pigmen kloroplas. Pigmen kloroplas tersebut yaitu klorofil a, klorofil b, dan karotenoid. Ketiga kurva menunjukkan panjang gelombang yang diserap oleh ketiga jenis kloroplas tersebut. Kurva berwarna hijau tua untuk gelombang klorofil a, sedangkan untuk klorofil b kurva berwarna hijau muda. Warna kurva oranye untuk pigmen karotenoid. Klorofil a dan klorofil b memiliki perbedaan pada satu gugus fungsinya.



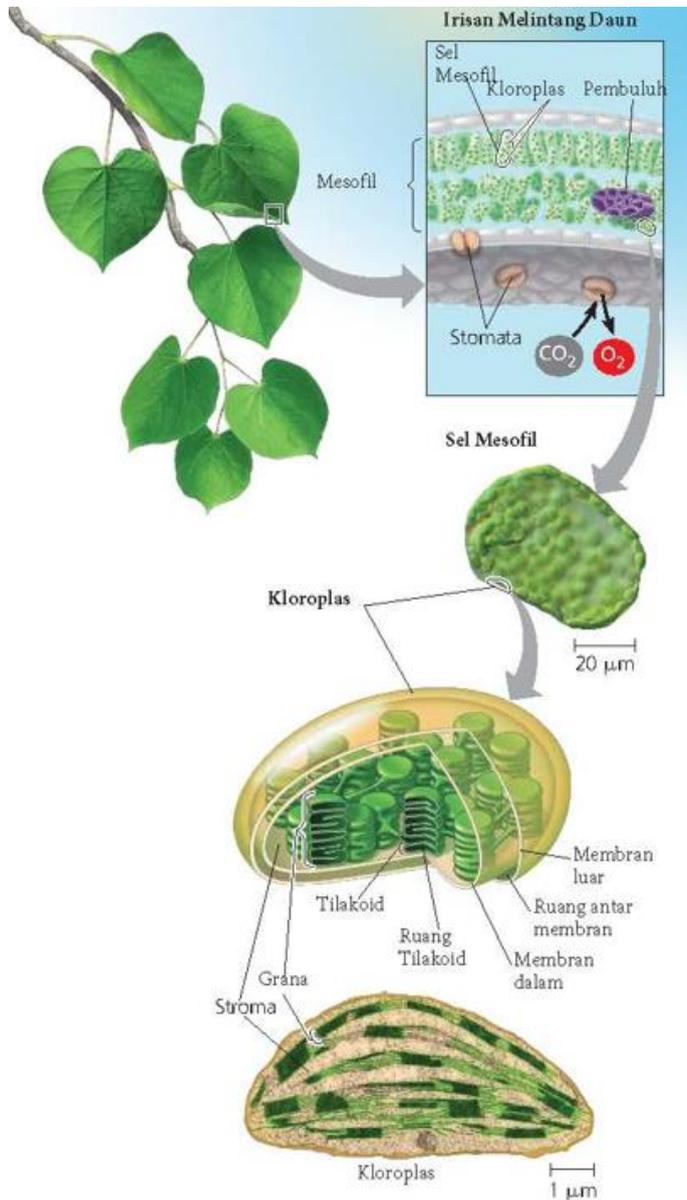
**Gambar 6. 3. Penyerapan spectra (Urry et al., 2020)**

Perbedaan klorofil a dan b terlihat jelas pada satu gugus fungsinya. Klorofil a memiliki gugus fungsi  $\text{CH}_3$ , sedangkan klorofil b gugus fungsinya adalah  $\text{CHO}$  (Gambar 6.4). Ekor hidrokarbon yang berinteraksi dengan daerah hidrofobik protein di dalam membrane tilakoid kloroplas. Daerah hidrofobik merupakan daerah yang tidak suka air.

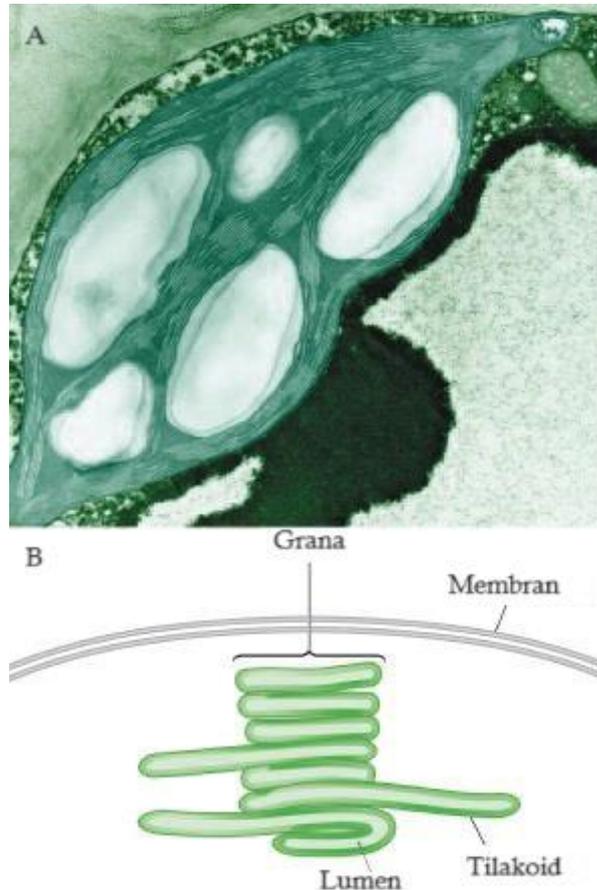


**Gambar 6. 4. Perbedaan struktur klorofil a dan klorofil b (Urry et al., 2020)**

Gambar 6.5 di bawah menjelaskan bagian-bagian dari organel tempat fotosintesis serta perbandingan ukurannya. Bagian lain dari kloroplas yaitu stroma, granum, ruang tilakoid, membrane dalam, membrane luar, dan ruang antarmembran. Bagian dari daun yang diambil dengan ukuran yang sangat kecil, maka akan terdapat sel mesofil. Sel mesofil tersebut dapat dibandingkan dengan ukuran 20 mikrometer ( $\mu\text{m}$ ). Kloroplas merupakan bagian kecil dari sel mesofil tersebut. Perbandingan ukuran kloroplas tersebut dengan ukuran 1  $\mu\text{m}$ .



**Gambar 6. 5. Organel tempat fotosintesis (Urry et al., 2020)**



**Gambar 6. 6.** (A) Struktur internal kloroplas bila dilihat dari mikroskop electron (B) Grana, tilakoid dan lumen yang dapat dilihat lebih jelas (Hopkins, 2006)

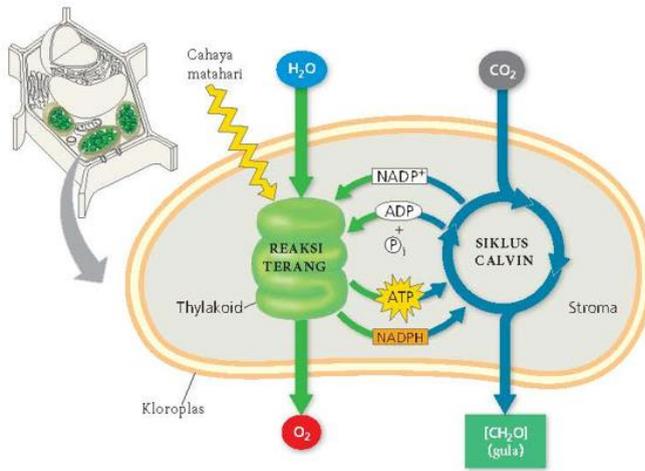
Fungsi masing-masing bagian dari kloroplas yaitu, **membran luar** adalah membrane yang paling luar berfungsi melindungi bagian dalam. Membran luar dan membrane dalam dihubungkan oleh **ruang antarmembran**. Bagian lain yang terdapat dalam kloroplas adalah **stroma**, yaitu cairan kental di dalam kloroplas. Bagian lainnya yaitu tilakoid. **Tilakoid** menyerupai tumpukan

kepingan uang logam (Gambar 6.6). Tilakoid memiliki fungsi memisahkan stroma dan bagian lainnya yaitu ruang tilakoid. Tilakoid merupakan tempat dapat ditemukannya klorofil.

### **6.3 Tahapan Fotosintesis**

Fotosintesis terjadi dalam dua tahapan yaitu reaksi terang dan siklus calvin. Kedua tahapan tersebut terjadi di dalam kloroplas. Di dalam kloroplas terdapat membran tilakoid dan stroma. Membran tilakoid merupakan tempat terjadinya reaksi terang yang berwarna hijau pada Gambar 7. Reaksi terang merupakan tahapan pertama dalam proses fotosintesis. Tahapan keduanya adalah siklus Calvin. Siklus Calvin terjadi di stroma yang berwarna abu-abu (Gambar 7).

Reaksi terang merupakan reaksi pembuatan ATP dan NADPH yang melibatkan energi dari cahaya matahari. Energi matahari mereduksi  $\text{NADP}^+$  menjadi NADPH dengan menambahkan sepasang electron bersama dengan  $\text{H}^+$ . Reaksi terang menghasilkan ATP, menggunakan kemiosmosis untuk menggerakkan penambahan gugus fosfat ADP. Proses tersebut disebut fosforilasi. ATP dan NADPH yang dihasilkan dari reaksi terang selanjutnya digunakan pada siklus Calvin (Gambar 6.7).



**Gambar 6. 7. Reaksi terang dan Siklus Calvin pada Fotosintesis (Urry et al., 2020)**

Siklus Calvin dimulai dengan penggabungan  $CO_2$  dari udara ke molekul organik yang sudah ada dalam kloroplas. Proses awal penggabungan karbon ke dalam senyawa organik tersebut disebut fiksasi karbon. Siklus Calvin kemudian mereduksi karbon menjadi karbohidrat dengan penambahan electron. Daya reduksi berasal dari  $NADPH$ , yang didapat muatan elektronnya dalam reaksi terang. Untuk mengubah  $CO_2$  selain karbohidrat, Siklus Calvin juga membutuhkan bahan kimia dalam bentuk  $ATP$ , yang dihasilkan dari reaksi terang. Oleh karena itu, gula dihasilkan oleh Siklus Calvin (Gambar 7). Akan tetapi proses produksi gula hanya dapat dilakukan dengan adanya  $NADPH$  dan  $ATP$  yang dihasilkan oleh reaksi terang. Siklus Calvin sering disebut reaksi gelap karena pada prosesnya tidak membutuhkan cahaya matahari secara langsung.

## 6.4 Perkembangan Kloroplas

Kloroplas mengalami perkembangan mulai dari pembentukan daun sampai perubahan daun menjadi berwarna kuning. Perkembangan kloroplas dari proplastid selama pembentukan daun dan perubahan selanjutnya dari kloroplas menjadi gerontoplas (penuaan kloroplas) selama daun menguning. Proses yang terkait perkembangan dan penuaan kloroplas dikoordinasikan dan diatur oleh gen.

Pembentukan kloroplas selama perkembangan daun secara singkat diawali dengan transformasi proplastid menjadi kloroplas melibatkan pembentukan tumpukan tilakoid matang dari prekursor membrane sederhana secara structural. Perubahan structural tersebut terkait dengan akumulasi dari pigmen fotosintesis. Daun yang menghijau adalah tanda akumulasi klorofil dalam pengembangan kloroplas.

Biosintesis melibatkan beberapa langkah termasuk pembentukan 5-ALA dan cincin pirol dengan system ikatan konjugasi, penyisipan magnesium, sintesis protoklorofilida, dan reduksi selanjutnya menjadi klorofilida diikuti dengan fitilasi. Sebagian besar enzim terlibat dalam jalur biosintesis tersebut. Salah satu enzimnya adalah NADPH-protoklorofilida oksidoreduktase (POR). Selain berperan dalam biosintesis klorofil, POR juga disebut berperan dalam proses dan transformasi precursor tilakoid ke bentuk dewasanya selama perkembangan organel fotosintesis. Pada biosintesis pigmen, enzim akan berfungsi sebagai perantara atau memediasi ketergantungan cahaya fotoreduksi protoklorofilida menjadi klorofilida.

Proses penuaan daun melibatkan menurunnya gen fotosintesis dan peningkatan gen terkait penuaan. Beberapa gen terkait penuaan dapat dilihat pada Tabel 1. Kloroplas merupakan sumber utama protein dan nutrisi lain pada tanaman hijau. Oleh sebab itu, pembongkaran atau penghancurannya selama penuaan daun memiliki pengaruh yang signifikan secara fisiologis terutama dalam proses pengamanan nutrisi.

**Tabel 6. 1. Klasifikasi Gen terkait Penuaan**

Metabolisme terkait Penuaan	Gen Terkait Penuaan	Referensi
Degradasi protein	Homolog gen untuk protease serin Homolog gen untuk protease sistein dan protease aspartik Homolog gen untuk ubiquitin	(Roberts et al., 2003)
Mobilisasi Nitrogen	Glutamin sintatase dan asparagin sintatase	(Biswal et al., 2003; Buchanan-Wollaston, 1997)
Metabolisme karbohidrat	Homolog gen untuk b-glukosidase, piruvat-O, fosfat dikinase, dan b-galaktosidase	
Metabolisme dan mobilisasi lipid	Homolog gen untuk fosfolipase-D, fosfoenaol piruvat karboksikinase, NAD-malat dehydrogenase, isositrat liase, dan malat sintase	
Metabolisme pertahanan	Homolog gen untuk PR seperti protein, berbagai metaloteonin	

Sumber: (Pessaraki, 2005).

Kloroplas terbongkar seiring dengan degradasi komponen seluler lainnya. Degradasi makromolekul, selanjutnya konversi menjadi bentuk nutrisi yang dapat digunakan dan transportasi untuk pertumbuhan bagian dari tanaman untuk digunakan kembali dengan baik. Gen yang mengatur untuk proses-proses tersebut, termasuk di dalamnya adalah proses-proses dikodekannya protease, lipase, dan protein oengatur yang berkaitan untuk transport dapat dilihat pada Tabel 1. Daun tua hanya dapat melakukan proses-proses tersebut bila kondisi daun tua tersebut sehat. Kondisi sehat yang dimaksud yaitu dapat secara efektif melakukan mekanisme pertahanan terhadap serangan pathogen dan lingkungan yang tidak mendukung.

Gen yang diatur untuk memberikan perlindungan pada sel tua terhadap kondisi yang tidak menguntungkan (Tabel 1). Tabel 1 menjelaskan gen yang bertanggung jawab untuk konversi lipid dan metabolit lainnya ke substrat pernafasan untuk menyediakan energi pada proses penuaan atau *senescence*.

Selain hilangnya protein dan klorofil, kadar karotenoid juga menurun selama daun mengalami penuaan. Akan tetapi, karotenoid terdegradasi secara perlahan bila dibandingkan dengan klorofil. Pola kinetic hilangnya pigemn dan membrane protein kurang lebih sama karena menunjukkan kesamaan dalam mekanisme degradasinya. Pigmen membentuk kompleks dengan protein, sehingga kerusakan pigmen atau kerusakan protein dapat menghancurkan kompleks tersebut.

Degradasi klorofil sebagai penyebab utama disorganisasi tilakoid selama penuaan daun. Enzim klorofilase merupakan enzim yang terlibat dalam degradasi bertahap pigmen. Enzim tersebut

bersifat hidrofobik protein, menghidrolisis klorofil menjadi klorofilida dan fitol. Tahapan tersebut merupakan tahapan awal pemecahan pigmen. Tahapan selanjutnya, enzim Mg-deketalase pada klorofilida bekerja menghilangkan  $Mg^{2+}$  yang akhirnya membentuk pheophorbida. Enzim Mg-deketalase terikat pada membrane organel.

Pheophorbida selanjutnya dikatalis oleh enzim pheophorbide oksigenase, yang dalam kombinasi dengan enzim lain, katabolit klorofil merah reductase (RCC reductase). RCC reductase tersebut berperan dalam pembukaan struktur cincin pigmen dan membentuk produk RCC. Pembelahan cincin menghasilkan hilangnya warna hijau pada pigmen. Produk RCC selanjutnya diubah menjadi katabolit klorofil fluorosent (FCC). Katabolit klorofil fluorosent tersebut mengalami proses modifikasi dan konjugasi sehingga membentuk katabolit klorofil nonfluorosent (NCC). Penyelesaian atau pembuangan akhir katabolit klorofil NCC dapat terjadi di sitoplasma.

Enzim yang berperan dalam degradasi pigmen karotenoid belum banyak diketahui. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa terdapat perubahan kualitatif pembentukan ester karotenoid dan epoksida seperti pigmen. Akan tetapi, kemungkinan keterlibatan enzim, identifikasi enzim dan mekanisme hilangnya pigmen-pigmen secara kuantitatif sudah dijelaskan oleh Biswal et al. (2003).

## DAFTAR PUSTAKA

- Biswal, U.C., Biswal, B., Raval, M.K., 2003. Chloroplast Biogenesis: From Proplastid to Gerontoplast. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Buchanan-Wollaston, V., 1997. The molecular biology of leaf senescence. *J. Exp. Bot.* 48, 181–199. <https://doi.org/https://doi.org/10.1093/jxb/48.2.181>
- Hopkins, W.G., 2006. The Green World: Photosynthesis and Respiration. Infobase Publishing, New York.
- Pessaraki, M., 2005. Handbook of Photosynthesis (Books in Soils, Plants, and The Environment), Second Ed. ed. Taylor & Francis, Boca Raton.
- Roberts, I.N., Murray, P.F., Caputo, C.P., Passeron, S., Barneix, A.J., 2003. Purification and characterization of a subtilisin like serine protease induced during the senescence of wheat leaves. *Physiol. Plant.* 118, 483–490. <https://doi.org/DOI:10.1034/j.1399-3054.2003.00142.x>
- Urry, L.A., Cain, M.L., Wasserman, S.A., Minorsky, P. V., Orr, R.B., 2020. Campbell Biology, Twelfth ed. ed. Pearson, New York.

# **BAB 7**

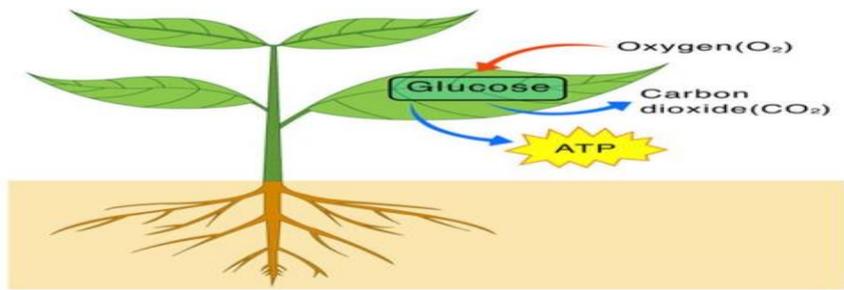
## **PROSES RESPIRASI**

Oleh Eka Susila N

### **7.1 Pengertian Respirasi**

Respirasi merupakan proses yang sangat penting bagi kehidupan organisme termasuk tumbuhan. Respirasi artinya “bernafas” merupakan proses masuknya oksigen dan keluaranya karbondioksida sebagai hasil proses respirasi. Proses respirasi juga menghasilkan energi yang merupakan hasil perombakan nutrisi organic seperti glukosa menjadi energi yang dapat digunakan untuk pertumbuhan dan perkembangan. Tanpa proses respirasi, tumbuhan tidak dapat melakukan aktivitas metabolisme bahkan tidak mampu bertahan hidup.

Hewan, manusia dan tumbuhan memiliki system pernafasan yang sama, namun melibatkan organ yang berbeda. Proses respirasi pada tumbuhan terjadi di mitokondria yang memiliki fungsi di dalam sel sebagai penghasil energi (ATP). Oleh karena itu proses ini disebut juga sebagai proses respirasi seluler. Novitasari (2017) mengatakan bahwa proses respirasi adalah serangkaian reaksi kimia yang terjadi di dalam sel untuk menghasilkan energi.



**Gambar 7. 1. Respirasi pada tumbuhan sebagai proses masuknya masuknya Oksigen ( $O_2$ ) dan dilepaskannya karbondioksida ( $CO_2$ ) melalui alat pernafasan tumbuhan yang paling penting (stomata) (Sumber gambar: <https://asset.kompas.com/.jpg> )**

Respirasi pada tumbuhan terdiri dari dua tahap utama, yaitu respirasi eksternal dan respirasi internal. **Respirasi eksternal** terjadi di stomata, yaitu struktur kecil yang terdapat di permukaan daun dan batang tumbuhan yang berfungsi untuk pertukaran gas. Stomata merupakan salah satu alat pernafasana yang penting pada tumbuhan (Ruben, 2016). Oksigen dari udara diambil melalui stomata dan karbon dioksida yang dihasilkan selama respirasi dilepaskan ke udara. **Respirasi internal** pada tumbuhan mirip dengan respirasi internal pada hewan. Proses ini terjadi di dalam sel-sel tumbuhan dan melibatkan penguraian glukosa dengan bantuan oksigen menjadi energi, karbon dioksida, dan air. Menurut Campbell *et al.*, (2012), energi yang dihasilkan dari proses ini digunakan oleh tumbuhan untuk berbagai proses metabolik, seperti pertumbuhan, reproduksi, perbaikan jaringan dan aktivitas hidup lainnya.

Untuk lebih jelasnya mari kita lihat pengertian respirasi secara menyeluruh (Salisbury, 1985).

- Respirasi adalah reaksi katabolisme yang memecah molekul gula menjadi molekul anorganik, seperti karbondioksida (CO<sub>2</sub>) dan air (H<sub>2</sub>O)
- Tumbuhan mengambil oksigen (O<sub>2</sub>) melalui organ pernapasan untuk memecah senyawa organik menjadi CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, dan energi.
- Respirasi melibatkan reaksi redoks, di mana oksigen dioksidasi menjadi CO<sub>2</sub>, sementara O<sub>2</sub> berperan sebagai oksidator dan berubah menjadi H<sub>2</sub>O.
- Energi kimia yang dilepaskan selama respirasi digunakan untuk menghasilkan adenosine triphosphate (ATP), yang merupakan penggerak utama proses respirasi.

Respirasi merupakan rangkaian banyak reaksi dari komponen-komponen yang masing-masing dikatalisasi oleh enzim yang berbeda. Menurut Susantiningih (2013), dalam metabolisme diperlukan suatu biokatalisator enzim. Enzim merupakan biomolekul yang mengkatalis reaksi kimia, dimana hampir semua enzim adalah protein. Reaksi kimia proses respirasi (Salisbury, 1985) dilambangkan dengan rumus berikut :



Respirasi terdiri dari beberapa substrat atau senyawa organik yang dioksidasikan dalam prosesnya. Substrat respirasi antara lain: karbohidrat, pati, lipid, asam organik dan protein (pada beberapa spesies) dan berbagai macam gula seperti glukosa, fruktosa, dan sukrosa. Menurut Paramita (2010), protein dan lemak dapat pula berperan sebagai substrat dalam proses respirasi.

Respirasi pada tumbuhan terjadi setiap waktu (siang ataupun malam hari). Namun, pada siang hari proses respirasi terjadi bersamaan dengan proses fotosintesis (proses di mana tumbuhan menggunakan energi matahari untuk mengubah karbon dioksida dan air menjadi glukosa dan oksigen). Kondisi ini menyebabkan tumbuhan pada siang hari dapat menghasilkan oksigen lebih banyak daripada yang digunakan. Pada malam hari, ketika tidak ada cahaya matahari untuk melakukan fotosintesis, tumbuhan bergantung sepenuhnya pada respirasi untuk memperoleh energi. Bagian-bagian tumbuhan yang paling aktif melakukan respirasi yaitu kuncup bunga, tunas, biji yang mulai tumbuh atau muncul akar, ujung batang dan ujung akar.

## 7.2. Tahapan Proses Respirasi pada Tumbuhan

Respirasi tumbuhan mirip dengan respirasi hewan, namun ada beberapa perbedaan dalam prosesnya. Pada tumbuhan, sebagian besar proses respirasi terjadi di mitokondria sel-selnya, meskipun sebagian kecil proses ini juga terjadi di sitoplasma. Selama proses respirasi, molekul glukosa dan senyawa organik lainnya diuraikan menggunakan oksigen. Hasil akhir dari respirasi adalah produksi energi yang disimpan dalam bentuk ATP (Adenin trifosfat) serta karbon dioksida dan air sebagai produk sampingan yang dilepaskan ke lingkungan. Proses respirasi terdiri dari dua tahapan, yaitu respirasi eksternal dan internal. Tahapan pada proses respirasi eksternal yang dilalui sebelum masuk proses respirasi internal, yaitu

- **Penangkapan oksigen:** tumbuhan (menggunakan stomata) menangkap oksigen dari udara bebas di lingkungan.

- **Proses transportasi gas:** oksigen ( $O_2$ ) masuk ke dalam sel tumbuhan secara keseluruhan melalui ruang antar sel, sitoplasma, dan membran sel melalui proses difusi. Karbondioksida ( $CO_2$ ) sebagai hasil proses respirasi juga dikeluarkan melalui proses difusi.

Setelah oksigen diambil, mulailah proses respirasi internal. Proses respirasi internal melibatkan beberapa tahapan, yaitu **glikolisis, dekarboksilasi oksidatif, siklus asam sitrat (siklus Krebs), dan rantai transpor electron** (Novitasari, 2017). Adapun tahapan proses respirasi dijabarkan dibawah ini:

### 1. Glikolisis

Glikolisis merupakan tahapan Dimana glukosa dipecah menjadi senyawa yang lebih sederhana, yaitu dua molekul asam piruvat (beratom C3). Peristiwa ini terjadi di sitosol. Pada tahap glikolisis ini menghasilkan 2 molekul ATP sebagai energi dan 2 molekul NADH yang digunakan untuk transpor elektron. Asam piruvat selanjutnya diproses dalam tahap dekarboksilasi oksidatif. Pada respirasi anaerob, asam piruvat akan diubah menjadi karbondioksida ( $CO_2$ ) dan etil alkohol. Pada respirasi anaerob jumlah ATP yang dihasilkan hanya dua molekul untuk satu molekul glukosa. Namun jumlahnya masih sangat jauh dari ATP yang dihasilkan respirasi aerob yaitu sebanyak 36 ATP (Gambar 7.2). Enzim-enzim yang berperan dalam glikolisis yaitu enzim heksokinase, aldolase, triosa fosfat isomerase, fosfoheksokinase, fosfofruktokinase, enolase, fosfat dehidrogenase, piruvat kinase dan fosfoglisero mutase (Salisbury, 1985; Campbell *et al*, 2012).

Fungsi dari tahapan Glikolisis, yaitu; 1) mereduksi 2 molekul NAD<sup>+</sup> menjadi NADH, 2) merombak molekul heksosa dan dihasilkan 2 molekul ATP, 3) dihasilkan senyawa senyawa antara yang dapat menjadi bahan baku sintesis berbagai senyawa dalam tumbuhan.

## 2. Dekarboksilasi Oksidatif

Dekarboksilasi oksidatif yaitu pengubahan asam piruvat menjadi asetil KoA dengan melepaskan CO<sub>2</sub>. Persitiwa ini terjadi di sitosol. Selain Asetil KoA hasil lainnya adalah NADH. Asetil KoA akan diproses dalam siklus Krebs (siklus asam sitrat) sedangkan NADH akan digunakan dalam transpor elektron.

## 3. Siklus Krebs

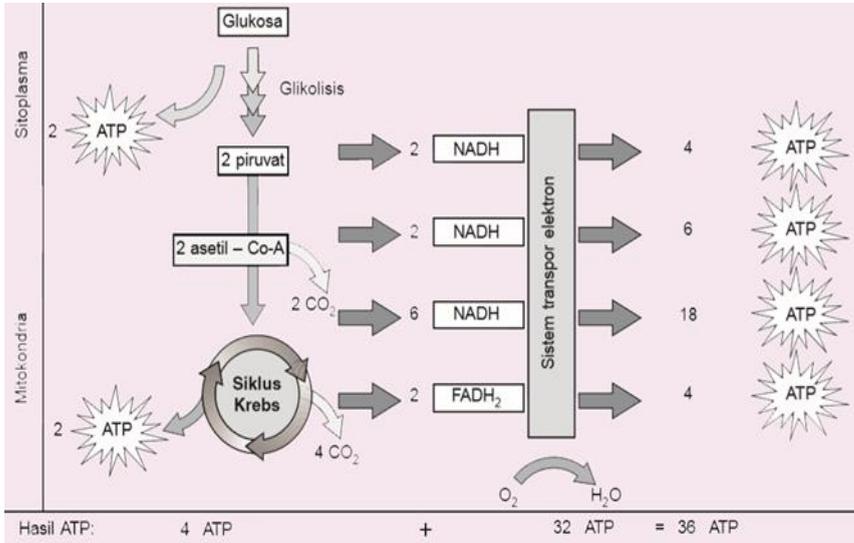
Siklus krebs atau disebut juga daur krebs atau siklus asam sitrat atau daur trikarboksilat. Pada tahap ini, Asetil-KoA memasuki siklus Krebs. Di dalam mitokondria, molekul ini berpartisipasi dalam serangkaian reaksi yang menghasilkan dua ATP sebagai energi, dua FADH<sub>2</sub> dan enam molekul NADH yang digunakan dalam transport electron serta empat molekul karbondioksida. Siklus krebs ini terjadi di dalam matriks membran mitokondria.

Fungsi utama dari siklus krebs ini adalah : 1) mengurangi NAD<sup>+</sup> dan FAD menjadi NADH dan FADH<sub>2</sub> yang kemudian dioksidasi membentuk ATP, 2) sebagai tempat sintesis ATP secara langsung, 3) pembentukan kerangka carbon dalam sintesis asam amino tertentu dan kemudian dikonversi membentuk senyawa yang lebih besar serta 4) dari

siklus krebs akan dihasilkan elektron dan ion  $H^+$  lalu dibawa sebagai  $NADH_2$  dan  $FADH_2$  kemudian dioksidasi dari sistem pengangkutan elektron dan terbentuk  $H_2O$  sebagai hasil sampingan respirasi. Oleh karena itu hasil dari respirasi adalah  $CO_2$  dan  $H_2O$ . Produk sampingan tersebut kemudian dibuang keluar tubuh melalui stomata pada tumbuhan melalui proses difusi.

#### **4. Rantai Transpor electron**

Transfer elektron merupakan rangkaian reaksi yang melibatkan pembawa elektron. Proses ini terjadi di membran mitokondria. Rantai Transport Elektron:  $NADH$  dan  $FADH_2$  yang dihasilkan selama glikolisis dan siklus Krebs mengalami oksidasi di rantai transport elektron. Ini menghasilkan gradien elektrokimia yang digunakan untuk menghasilkan ATP melalui fosforilasi oksidatif. Enzim yang berperan pada proses ini adalah ATP sintase (sitokrom, quinon, piridoksin, dan flavoprotein) dengan menggunakan gradien elektrokimia yang ada. Reaksi transfer inilah yang menghasilkan  $H_2O$ .



**Gambar 7. 2. Tahapan proses respirasi Aerob; Glikolisis, dekarboksilasi oksidatif, siklus Krebs dan rantai electron (sumber Gambar: <https://ohlappetlah.blogspot.com>).**

### 7.3 Jenis Respirasi pada Tumbuhan

Teradapat dua jenis respirasi pada tumbuhan, yaitu;

#### 1. Respirasi Aerobik

Respirasi aerob merupakan proses respirasi yang membutuhkan oksigen dari udara dalam prosesnya. Seperti yang sudah dijabarkan diatas merupakan respirasi aerob. Tahapan proses respirasi aerob ini meliputi: penyerapan oksigen, pemecahan senyawa organik seperti glukosa menjadi CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O, pembebasan energi sebagai pengatur suhu dan proses kehidupan, pembebasan CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O.

Seperti yang sudah dijabarkan sebelumnya, pada respirasi aerob dari 1 molekul glukosa dapat menghasilkan 36 ATP, lebih banyak dibandingkan ATP yang dihasilkan pada respirasi anaerob. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat hasil ATP yang dapat dihasilkan pada respirasi aerob pada Tabel 7.1.

**Tabel 7. 1. Energi berupa ATP yang dapat dihasilkan pada respirasi aerob.**

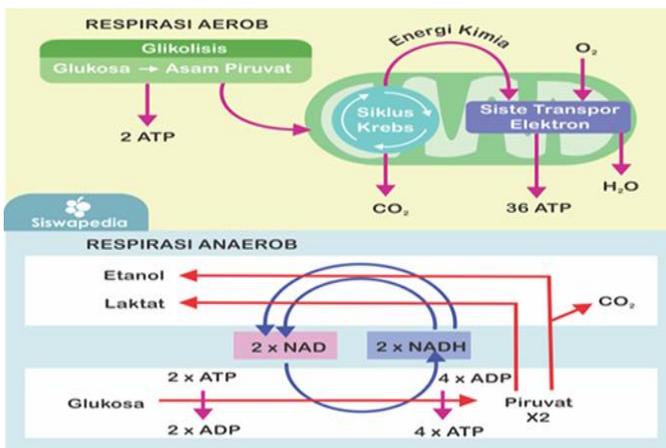
Tahapan	Tempat	Subtrat	Hasil
Glikolisis	Sitoplasma	Glukosa	2 asam piruvat 2 ATP 2 NADH
Dekarboksilasi Oksidatif	Matriks mitokondria	2 asam piruvat	2 asetil Ko. A 2 NADH 2 CO <sub>2</sub>
Siklus Krebs	Matriks mitokondria	2 asetil Ko. A	6 NADH 2 ATP 2 FADH 4 CO <sub>2</sub>
Transport elektron	Krista mitokondria	NADH = 3 ATP FADH = 2 ATP	32 ATP H <sub>2</sub> O

## 2. Respirasi Anaerobik

Respirasi anaerob merupakan proses respirasi yang berlangsung tanpa membutuhkan oksigen dalam prosesnya. Respirasi ini sering disebut proses fermentasi. Tujuan fermentasi sama dengan tujuan respirasi yaitu untuk memperoleh energi. Perbedaan dengan respirasi aerobik melibatkan oksigen dan menghasilkan sejumlah besar ATP. Namun, jika oksigen tidak tersedia (seperti dalam kondisi anaerobik-tanaman dalam kondisi stress karena tergenang air),

sel dapat melakukan respirasi anaerob dengan mengubah piruvat menjadi karbondioksida ( $\text{CO}_2$ ) dan etil alkohol (etanol) pada tahap glikolisis. Pada respirasi ini jumlah ATP yang dihasilkan hanya dua molekul untuk satu molekul glukosa. Namun jumlahnya masih sangat jauh dari ATP yang dihasilkan respirasi aerob yaitu sebanyak 36 ATP (Irawan, 2007; Lakitan 2008) (Gambar 7.2).

Respirasi anaerob pada tumbuhan terjadi ketika oksigen tidak tersedia. Proses ini melibatkan glikolisis, seperti pada respirasi aerobik, tetapi tidak melibatkan siklus Krebs atau rantai transport elektron. Sebagai gantinya, piruvat diubah menjadi etanol atau asam laktat, yang kemudian dilepaskan ke lingkungan. Hasil respirasi anaerob pada tanaman tingkat tinggi yaitu asam sitrat, asam malat, asam oksalat, asam laktat, asam susu dan sedikit energi (Lovelies, 1997). Kadar  $\text{O}_2$  dalam respirasi ini sangat minimum Untuk lebih lengkap perbedaannya dapat dilihat pada Gambar 7.3.



Gambar 7. 3. Jenis respirasi pada tumbuhan (Sumber: <https://dosenBiologi.com>)

## 7.4 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Laju Respirasi

Faktor-faktor yang mempengaruhi laju proses respirasi diantaranya adalah suhu, jenis dan jumlah substrat, kelembaban, jumlah oksigen serta tipe dan usia tumbuhan (Salisbury, 1985).

### 1. Suhu

Suhu sangat mempengaruhi laju respirasi. Semakin tinggi suhu maka laju respirasi akan semakin tinggi. Terkait factor  $Q_{10}$ , semakin naik suhu  $10^{\circ}\text{C}$ , maka laju respirasi akan meningkat 2 kali lipat. Namun hal ini juga tergantung dari masing masing spesies untuk peningkatan laju respirasinya (Lakitan, 2008).

### 2. Jenis dan Jumlah Substrat

Proses respirasi sangat berkaitan erat dengan proses fotosintesis. Substrat hasil proses fotosintesis pada tumbuhan merupakan bahan penting dalam proses respirasi. Jika kandungan substrat rendah maka laju respirasi juga akan rendah. Demikian sebaliknya jika kandungan substrat tinggi maka laju respirasi juga meningkat. Perombakan substrat seperti asam organik dan gula terjadi selama aktivitas respirasi pada tumbuhan. Hasil perbandingan dari nilai laju respirasi karbondioksida terhadap laju respirasi oksigen menghasilkan nilai "Respiratory Quotient" (RQ) yang dapat menunjukkan jenis substrat yang terpakai selama respirasi. Iqbal *et al.*, (2009), nilai RQ sayur segar bervariasi antara 0.7-1.3 untuk respirasi secara aerobik dan nilai RQ sebesar 1.0 apabila substrat karbohidrat. Sebagai tambahan, nilai RQ kurang dari 1 dapat terjadi apabila sumber substrat berupa lemak dan nilai RQ lebih dari 1 apabila substrat berupa asam organik.

Ditambahkan dari hasil penelitian oleh Gomes *et al.*, (2010), nilai RQ pada buah pear berkisar 1.2-1.4 pada respirasi aerobik.

### **3. Kelembaban**

Sama halnya dengan suhu, kelembaban mempengaruhi laju respirasi. Tingkat kelembaban tanaman dipengaruhi oleh suhu. Suhu yang rendah menyebabkan tingkat kelembaban tanaman tinggi, demikian sebaliknya. Semakin tinggi tingkat kelembaban tanaman maka laju respirasi akan semakin cepat, sebaliknya semakin rendah kelembaban maka laju respirasi juga semakin rendah. Hasil penelitian Yuniarto *et al.* (2021), bahwa suhu dan kelembaban mempengaruhi laju respirasi pada penyimpanan (toples kedap udara) belimbing wuluh. Hasil penelitian menunjukkan bahwa laju kecepatan respirasi paling cepat pada periode 1 jam penyimpanan dengan nilai laju respirasi oksigen ( $RO_2$ ) 28,60 ml  $[O_2]$   $kg^{-1}$   $jam^{-1}$  dan laju respirasi karbondioksida ( $RCO_2$ ) 56,64 ml  $[CO_2]$   $kg^{-1}$   $jam^{-1}$ .

### **4. Jumlah Oksigen**

Laju respirasi juga dipengaruhi oleh ketersediaan oksigen. Namun pada kondisi fluktuasi normal kandungan oksigen di udara tidak banyak mempengaruhi laju respirasi tumbuhan. Hal ini disebabkan ketersediaan oksigen di udara umumnya lebih banyak dibandingkan yang dibutuhkan oleh tanaman untuk proses respirasi.

### **5. Tipe dan Usia Tumbuhan**

Setiap tumbuhan memiliki perbedaan metabolisme. Proses metabolisme dan respirasi berbanding lurus. Pada tumbuhan yang masih muda laju respirasi tinggi karena laju metabolismenya juga tinggi dalam masa pertumbuhan.

Sedangkan pada tumbuhan yang tua laju respirasinya lebih rendah. Hasil penelitian yang dilaporkan oleh Hutubessy dan Tungga (2009) bahwa sawi putih memiliki laju respirasi lebih tinggi dibandingkan kedua sayuran (bayam dan kol) disebabkan sawi putih memiliki kerapatan stomata lebih tinggi. Dari hasil penelitian tersebut disarankan juga untuk memperhatikan umur tumbuhan agar dapat melihat keragaman produksi CO<sub>2</sub> yang berbeda pula.

## **7.5 Hubungan Fotosintesis dan Respirasi**

Perlu dijabarkan kaitan antara fotosintesis dan respirasi. Fotosintesis dan respirasi merupakan proses metabolisme primer pada tumbuhan. Fotosintesis adalah proses di mana tumbuhan menggunakan energi cahaya matahari untuk mengubah karbondioksida (CO<sub>2</sub>) dan air (H<sub>2</sub>O) menjadi glukosa (gula) dan oksigen (O<sub>2</sub>). Proses fotosintesis terjadi di kloroplas sel tumbuhan, terutama di daun. Tumbuhan melakukan fotosintesis bertujuan untuk menghasilkan makanan (glukosa) dan mengeluarkan oksigen sebagai produk sampingan.

Respirasi adalah proses di mana tumbuhan (dan makhluk hidup lainnya) memecah glukosa yang dihasilkan melalui fotosintesis menjadi energi kimia ATP. Proses respirasi terjadi di mitokondria sel tumbuhan. Tumbuhan melakukan respirasi bertujuan menyediakan energi yang diperlukan untuk berbagai aktivitas seluler, termasuk pertumbuhan, reproduksi, dan pemeliharaan sel.

Proses Fotosintesis dan respirasi saling terkait dalam siklus karbon. Glukosa sebagai produk fotosintesis digunakan dalam respirasi untuk menghasilkan energi dalam bentuk ATP, dan karbondioksida sebagai produk respirasi digunakan dalam fotosintesis. Oleh karena itu tumbuhan sangat bergantung pada fotosintesis untuk menghasilkan makanan, namun juga memerlukan respirasi untuk mengubah makanan menjadi energi yang dapat digunakan. Dapat disimpulkan bahwa fotosintesis menghasilkan makanan dan oksigen, sementara respirasi mengubah makanan menjadi energi. Keduanya saling melengkapi dalam kehidupan tumbuhan.

## **7.6 Zat Penghambat Respirasi**

Respirasi sangat penting untuk pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan, serta membantu mempertahankan homeostasis dan beradaptasi dengan perubahan lingkungan. Setelah dijabarkan factor-faktor yang dapat mempengaruhi laju respirasi, maka perlu diketahui juga yang menjadi penghambat respirasi. Ada beberapa zat kimia yang dapat menjadi penghambat proses respirasi, diantaranya yaitu: Sianida, Fluoride, CO diberikan pada jaringan, Iodo asetat, Eter, aseton, kloroform. Zat- zat tersebut merupakan zat yang juga bisa mempengaruhi tumbuh kembang tanaman apabila terpapar olehnya.

## 7.7 Penutup

Respirasi pada tumbuhan merupakan proses penting yang memungkinkan mereka untuk bernafas. Pengambilan oksigen ( $O_2$ ) melalui organ pernafasan kemudian digunakan untuk pemecahan senyawa organik hasil proses fotosintesis menjadi karbondioksida ( $CO_2$ ) dan air ( $H_2O$ ) dan energi dalam bentuk ATP. Proses respirasi yang membutuhkan oksigen dari udara dalam prosesnya disebut respirasi aerob. Proses respirasi aerobik terdiri dari beberapa tahapan, yaitu: glikolisis, dekarboksilasi oksidatif, siklus Krebs, dan rantai transport electron.

Jika oksigen tidak tersedia (kondisi anaerobic atau kondisi lingkungan yang tidak memiliki oksigen yang cukup), sel dapat melakukan respirasi anaerob. Respirasi anaerob (biasa disebut proses fermentasi) merupakan proses respirasi yang berlangsung tanpa membutuhkan oksigen dalam prosesnya. Pada proses respirasi anaerobik melibatkan glikolisis tetapi tidak melibatkan siklus Krebs atau rantai transport elektron. Perbedaan dengan respirasi aerobik melibatkan oksigen dan menghasilkan sejumlah besar ATP, sedangkan pada respirasi anaerob dapat mengubah piruvat menjadi karbondioksida ( $CO_2$ ) dan etil alkohol (etanol) pada tahap glikolisis. Pada respirasi anaerob jumlah ATP yang dihasilkan hanya dua molekul untuk satu molekul glukosa. Jumlahnya masih sangat jauh dari ATP yang dihasilkan respirasi aerob yaitu sebanyak 36 ATP.

## DAFTAR PUSTAKA

- Campbell et al. 2012. Biologi Jilid 1. Erlangga. Jakarta.
- DosenBiologi.com.2017. Respirasi pada Tumbuhan: Proses, Manfaat, Jenis, Faktor dan Zat Penghambat. <https://dosenbiologi.com/tumbuhan/respirasi-pada-tumbuhan>
- Helena, G., M., Randolph, M.B. Domingos, P.F. Almeida and F.X. Malcata. 2010. “Modelling Respiration of Packaged Fresh-Cut ‘Rocha’ Pear as Affected by Oxygen Concentration and Temperature.” *Journal of Food Engineering* 96(1):74–79.
- Hutubessy, J.I.B dan Tungga, D. 2009. Produksi Karbondioksida (CO<sub>2</sub>) sebagai Indikator Respirasi pada Berbagai Sayuran. *J. Agrica* Vol. 2(1): 36-38  
<https://ohlappetlah.blogspot.com/2021/07/proses-respirasi-dalam-tumbuhan.html>)
- Iqbal, T., F.A.S. Rodrigues, P.V. Mahajan and J.P. Kerry. 2009. Mathematical Modeling of the influence of Temperature and Gas Composition on the Respiration Rate of Shredded Carrots. *Journal of Food Engineering* 91(2):325–32.
- Irawan, M. Anwari. 2007. “Glukosa dan Metabolisme Energi”. *Polton Sports Science & Performance Lab. Volume 01. No. 06*
- Kompas.com. 2022. Respirasi Tumbuhan: Pengertian, Proses, dan Jenis-jenisnya. <https://www.kompas.com/skola/respirasi-tumbuhan--pengertian-proses-dan-jenis-jenisnya>.
- Lakitan, B. 2008. *Dasar-dasar Fisiologi Tumbuhan*. Edisi 1. Jakarta: PT. Raja Grafindo Persada.

- Loveles.A.R.1997. Prinsip-prinsip Ekologi tumbuhan untuk daerah tropic. PT.Gramedia Jakarta.
- Novitasari, R. 2017. Proses respirasi seluler pada tumbuhan. Prosiding Seminar Nasional Pendidikan Biologi dan Biologi Jurusan Pendidikan Biologi, Fakultas MIPA, Universitas Negeri Yogyakarta.  
<http://seminar.uny.ac.id/sembiouny2017>
- Paramita, O. 2010. Pengaruh Memar terhadap Perubahan Pola Respirasi, Produksi Etilen dan Jaringan Buah Mangga (*Mangifera Indica* L) Var Gedong Gincu pada Berbagai Suhu Penyimpanan. *Jurnal Kompetensi Teknik*. Vol.2 (1)
- Ruben. 2016. Pernafasan pada Tumbuhan, Jenis dan Prosesnya. <https://dosenbiologi.com/tumbuhan/pernapasan-pada-tumbuhan>
- Salisbury, F.B. and C.W. Ross. 1985. *Plant Physiology*. Third Edition. Wadsworth Publishing Co.Belmont, California. 540 p.
- Susantiningih, T. 2013. Peran Enzim dalam Metabolisme. *Jurnal Kedokteran*. Vol. 3 (1)
- Yuniarto, K., Latriyanto, A., Muvianto, C.M.O., Nurtiti. 2021. Studi Respirasi Belimbing Wuluh pada Kondisi Penyimpanan Udara Termodifikasi Udara Pasif. *jTEP Jurnal Keteknikan Pertanian*. Vol 9 (2):57-64.



# **BAB 8**

## **METABOLISME NITROGEN DAN SULFUR**

Oleh Nurul Huda Panggabean

### **8.1. Pendahuluan**

Tumbuhan sebagai makhluk hidup memiliki kemampuan atau kapabilitas sel – sel dalam mengambil makanan sebagai suplai energi, absorpsi dari senyawa kimia yang diperlukan disebut nutrient. Mekanisme dalam tubuh tumbuhan yang mengkonversi unsur hara menjadi material seluler agar dapat digunakan sebagai sumber energi disebut metabolisme. Tumbuhan membutuhkan unsur esensial, unsur ini mencakup nutrisi yang digunakan sebagai bahan pokok untuk proses metabolisme yang diperlukan dalam aktivitas enzim. Unsur esensial tersebut merupakan unsur yang harus ada untuk siklus hidup yang normal dari organisme dan tidak dapat digantikan dengan senyawa kimia lainnya. Kategori unsur esensial dapat diuraikan sebagai berikut :

1. Jika tanaman kekurangan unsur tersebut maka tanaman tersebut tidak dapat menyelesaikan seluruh siklus hidupnya
2. Defisiensi unsur hara sangat spesifik dan tidak dapat digantikan dengan unsur lain
3. Unsur tersebut terlibat langsung dalam metabolisme dan proses enzimatik (Nurhayati, 2021)

Proses pertumbuhan dan perkembangan pada tumbuhan tentunya sangat bergantung dari tercukupinya unsur hara yang terkandung pada media tumbuh sebagai sumber nutrisi, secara umum unsur hara tumbuhan terbagi atas unsur hara makro dan unsur hara mikro. Unsur hara makro merupakan unsur hara yang dibutuhkan dalam jumlah cukup banyak seperti Nitrogen (N), Posfor (P), Kalium (K) dan Magnesium (Mg). Unsur hara mikro yaitu unsur hara yang dibutuhkan tumbuhan dalam jumlah sedikit contohnya Boron (B), Zinc (Zn), Natrium (Na) dan Fe, walaupun unsur hara mikro dibutuhkan dalam jumlah sedikit namun memiliki peran yang sangat penting.

Unsur hara dalam tanah harus dalam jumlah cukup dan komposisi seimbang, sebab bila salah satu unsur berkurang maka dapat mengakibatkan pertumbuhan tanaman menjadi tidak wajar. Tiap unsur hara memiliki peran tertentu dan tidak ada satu unsur harapun yang dapat menggantikan unsur hara lainnya secara sempurna. Secara umum fungsi hara mikro antara lain : sebagai penyusun jaringan tanaman, sebagai katalisator/stimulant, mempengaruhi proses oksidasi dan reduksi tanaman, membantu kadar asam, dan mempengaruhi nilai osmotik tanaman (Sudarmi, 2013). Berikut dijelaskan mengenai peranan dari unsur hara makro dan unsur hara mikro pada tanaman dalam tabel 1 dan tabel 2.

**Tabel 8. 1. Fungsi unsur hara makro dan bentuk yang tersedia bagi tanaman**

Unsur Hara	Fungsi Fisiologis	Bentuk Tersedia
Carbon (C)	Sebagai komponen dasar molekuler karbohidrat, protein, lipid dan asam nukleik	$\text{CO}_2$
Oksigen (O)	Merupakan penyusun senyawa – senyawa organik tanaman	$\text{O}_2$
Hidrogen (H)	Memegang fungsi sentral dalam proses metabolisme tanaman. Penting dalam keseimbangan ion dan sebagai unsur pereduksi utama ( <i>reducing agent</i> ) misalnya terlibat dalam proses reduksi nitrat menjadi amoniak	$\text{H}_2\text{O}$ $\text{NH}_4^+$ dan $\text{NO}_3^-$
Nitrogen (N)		
Posfor (P)	Komponen penyusun banyak senyawa organik penting di dalam tanaman (protein, enzim, Vitamin B complex, hormone dan klorofil)	$\text{H}_2\text{PO}_4^-$ dan $\text{HPO}_4^{2-}$
Kalium (K)	Berfungsi dalam transfer energi, metabolisme karbohidrat dan protein serta transport karbohidrat di dalam sel daun	$\text{K}^+$

Unsur Hara	Fungsi Fisiologis	Bentuk Tersedia
Kalsium (Ca)	Sebagai kofaktor dan activator enzim – enzim dalam metabolisme karbohidrat dan protein, serta membantu mengatur tekanan osmotik dan keseimbangan ion di dalam tanaman	$Ca^{2+}$
Magnesium (Mg)	Menyusun lamella tengah, menjaga kestabilan integritas membrane dan terlibat dalam proses pembelahan sel	$Mg^{2+}$
Sulfur (S)	Komponen penyusun klorofil, bertindak sebagai kofaktor pada banyak reaksi enzimatik, berfungsi mengatur pH sel tanaman dan menjadi unsur perantara ( <i>bridging element</i> ) pada sintesis protein. Menyusun protein, terlibat dalam masalah energi sel tanaman	$SO_4^{2+}$ dan $SO_2$

Sumber : *Wiraatmaja, 2016*

**Tabel 8. 2. Fungsi unsur hara mikro dan bentuk yang tersedia bagi tanaman**

Unsur Hara	Fungsi Fisiologis	Bentuk Yang Tersedia
Zat Besi (Fe)	Sebagai komponen penyusun enzim, terlibat dalam proses metabolisme N, fotosintesis dan transfer elektron	$Fe^{2+}$ dan $Fe^{3+}$
Seng (Zn)	Komponen esensial beberapa enzim seperti dehydrogenase, proteinase, carbonic anhidrase, alcohol dehydrogenase, glutamic dehydrogenase, malic dehidrogenase	$Zn^{2+}$ $Mn^{2+}$
Mangan (Mn)		
Tembaga (Cu)	Terlibat dalam sistem penyusunan $O_2$ pada proses fotosintesis dan sebagai komponen enzyme arginase dan fosfottransferase	$Cu^{2+}$
Boron (B)	Sebagai penyusun beberapa enzyme diantaranya cytochrom oksidase, ascorbic acid oksidase, dan laccase	$H_3BO_3$
Khlor (Cl)	Dibutuhkan dalam proses asimilasi N dalam tanaman, sebagai komponen esensial enzim nitrat reduktase dan nitrogenase (enzim fiksasi $N_2$ ).	$Cl^-$

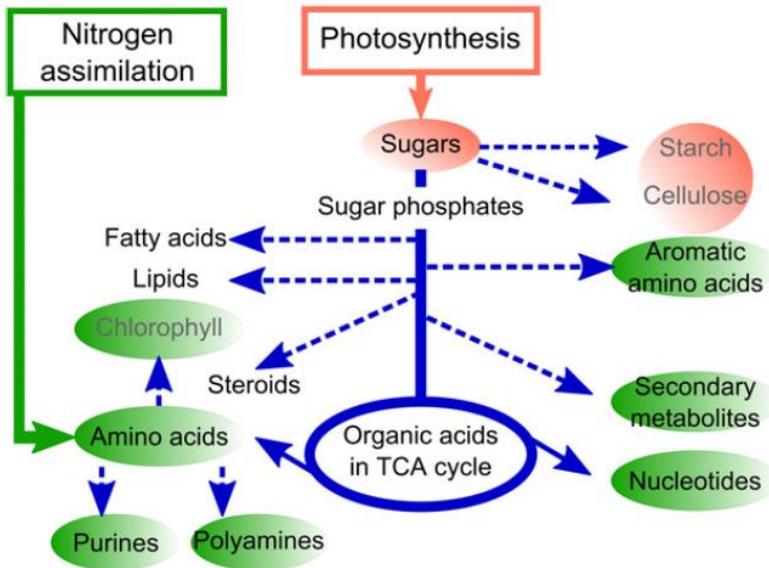
Unsur Hara	Fungsi Fisiologis	Bentuk Yang Tersedia
	Befungsi sebagai aktifator enzim-enzim yang menguraikan air dalam proses fotosintesis, berfungsi dalam menjaga dan mengatur tekanan osmosis sel tanaman yang tumbuh pada kondisi tanah yang memiliki salinitas tinggi.	

Sumber : *Wiraatmaja, 2016*

Menurut Mengel dan Kirkby (1982) unsur hara tanaman dikelompokkan dalam 4 kelompok menurut sifat biokimia dan fungsi fisiologis mereka yakni kelompok 1 yang terdiri dari C,H,O,N dan S yang merupakan unsur utama bahan organik dan terlibat langsung dalam proses enzimatik dan proses oksidasi - reduksi. Kelompok 2 terdiri dari unsur P dan B yang terlibat dalam reaksi transfer energi dan esterifikasi dengan gugus - gugus alcohol di dalam tanaman. Kelompok 3 terdiri dari K,Ca,Mg,Mn dan Cl, yang berperan dalam osmotic dan keseimbangan ion dan juga memiliki fungsi - fungsi yang spesifik dalam konfirmasi enzyme dan katalisis, kelompok 4 terdiri dari Fe, Cu, Zn dan Mo yang hadir sebagai *chelate structural* dan memungkinkan terjadinya transportasi electron melalui perubahan valensi.

## 8.2 Metabolisme Nitrogen

Tumbuhan dapat mengasimilasi sumber nitrogen (N) anorganik menjadi nitrogen organik seperti asam amino. Nitrogen adalah unsur hara mineral terpenting yang dibutuhkan tanaman dan metabolismenya terkoordinasi erat dengan metabolisme karbon (C) dalam proses dasar yang memungkinkan pertumbuhan tanaman. Peningkatan pemahaman tentang regulasi nitrogen dapat memberikan wawasan penting bagi pertumbuhan tanaman dan peningkatan kualitas tanaman, hal ini dikarenakan metabolisme nitrogen dan karbon merupakan komponen fundamental kehidupan tanaman. Nitrogen dibutuhkan untuk sintesis asam amino, protein, klorofil, asam nukleat, lipid dan berbagai macam metabolit lain yang mengandung unsur N di dalamnya. Sebagai langkah awal, tumbuhan mengasimilasi nitrat atau ammonium sebagai sumber utama untuk mendapatkan unsur N, selanjutnya N yang diasimilasi digunakan untuk menghasilkan asam amino, sementara karbon dioksidasi dan difiksasi untuk mensintesis gula. Interaksi kompleks terjadi melalui proses biokimia, dimana metabolisme N melibatkan serapan nitrogen dan regulasi, reduksi dan pensinyalan nitrogen, metabolisme asam amino dan transportasi, metabolisme interaksi antara N dan C serta translokasi dan remobilisasi N.



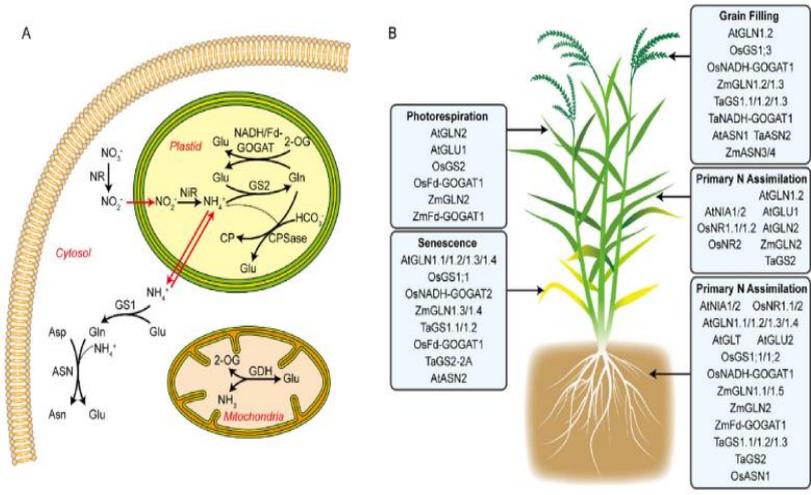
Gambar 8. 1. Produksi metabolit melalui metabolisme N dan C di tumbuhan. Tumbuhan mengasimilasi C dan N anorganik menjadi asam amino dan gula melalui proses asimilasi N dan fotosintesis. Elips berwarna hijau melambangkan metabolit yang mengandung N, sedangkan elips berwarna merah menunjukkan metabolit fotosintesis. Sejak N dan C metabolisme terkoordinasi erat dalam jalur metabolisme, tingkat metabolit yang termasuk dalam jalur metabolisme seharusnya dipengaruhi oleh status N dan C. Namun karena jumlahnya banyak reaksi reversibel dan kompleks, khususnya pada metabolisme sentral, seringkali sulit untuk mengamati perubahan besar dalam tingkat metabolit (Kusano *et al*, 2011).

Pada tumbuhan, nitrat dan ammonium adalah dua sumber nitrogen anorganik. Nitrat setelah diambil oleh akar maka akan tereduksi terlebih dahulu menjadi nitrit oleh nitrat reductase di sitoplasma, kemudian nitrit diangkut ke dalam plastida dan direduksi menjadi ammonium oleh reductase nitrit di plastida. Kelompok reductase nitrit pada tumbuhan berbeda dan bervariasi. Asimilasi ammonium dikatalisis oleh Glutamin Sintetase (GS)/ Glutamin-2-oksoglutarat amino transferase (GOGAT) atau dikenal dengan glutamate sintase, dimana N anorganik diubah menjadi N organik.

Dalam siklus ini, GS mengkatalisis Glutamin (Gln) sintesis dengan memasukkan molekul ammonium ke dalam glutamate (Glu) melalui ketergantungan pada adenosin triphosfat dan GOGAT, menghasilkan dua molekul Glu melalui reaksi yang mentransfer urea dari Gln ke 2-Oxoglutarat (Gambar 2). Pada tumbuhan tingkat tinggi, terdapat dua jenis glutamin sintetase dengan lokalisasi subseluler yang berbeda antara lain : GS1 sitosol, dikodekan oleh tiga hingga lima gen tergantung pada spesiesnya dan GS2 Plastidik, dikodekan oleh satu gen (AtGLN2 di Arabidopsis, OsGS2 pada beras, ZmGLN2 pada jagung, dan TaGS2 pada gandum). Ada juga dua jenis GOGAT: nikotinamida adenin dinukleotida (NADH)-GOGAT, menggunakan NADH sebagai reduktor (AtGLT di Arabidopsis, OsNADH-GOGAT1 dan OsNADH-GOGAT2 pada beras, ZmNADHGOGAT1 pada jagung, dan TaNADH-GOGAT1 pada gandum), dan ferredoxin (Fd)-GOGAT, menggunakan Fd sebagai reduktor (AtGLU1 dan AtGLU2 pada Arabidopsis, OsFd-GOGAT1 pada beras, ZmFd-GOGAT1 pada jagung, dan TaFd-GOGAT1 dalam gandum); keduanya terletak di plastid dan dikodekan oleh satu atau dua gen.

Selain itu, asparagine sintetase (ASN), yang mentransfer gugus Amida Gln atau  $\text{NH}_4^+$  menjadi aspartat (Asp) menjadi membentuk asparagine (Asn) dan Glu, glutamat dehidrogenase (GDH), yang mengkatalisis aminasi 2-OG dengan amonia membentuk Glu sebagai serta deaminasi Glu untuk membentuk amonia dan 2-OG, dan karbamoil fosfat sintetase (CPSase), yang menggunakan bikarbonat ( $\text{HCO}_3^-$ ) dan amonium, atau gugus Amida dari Gln untuk membentuk karbamoil fosfat (CP) dan Glu, juga terkait dengan asimilasi N.

Sebagian besar nitrat yang diserap oleh akar akan diangkut ke tunas dan berkurang pada sel mesofil, dan bisa juga direduksi menjadi amonium di akar. Pada tumbuhan, sumber amonium untuk asimilasi primer termasuk amonium yang berasal dari reduksi nitrat dan ammonium langsung diserap oleh akar.



**Gambar 8. 2. Asimilasi nitrogen pada tumbuhan. A: Diagram asimilasi N. B: Enzim yang terlibat dalam asimilasi N berpartisipasi dalam berbagai proses biologis. Terkait asimilasi N enzim dalam Arabidopsis, beras, jagung, dan gandum dirangkum. Proses biologis terlibat dalam asimilasi N primer di akar dan pucuk (reduksi nitrat, ammonium asimilasi), metabolisme N selama fotorespirasi, penuaan dan pengisian biji-bijian. NR, nitrat reduktase; NiR, nitrit reduktase; GS, glutamin sintetase; GOGAT, glutamin-2-oksoglutarat aminotransferase; ASN, asparagin sintetase; CPSase, sintetase karbamoilfosfat; GDH, glutamat dehidrogenase; Glu, glutamat; Gln, glutamin; 2-OG, 2-oksoglutarat; Asp, aspartat; Asn, asparagin; CP, karbamoilfosfat (Liu *et al*, 2022).**

Pada tumbuhan, metabolisme C dan N berinteraksi erat, energi dan kerangka C dari metabolisme C sangat penting untuk pemanfaatan N, dan N organik yang dihasilkan oleh asimilasi N,

seperti asam amino yang merupakan komponen protein, termasuk protein yang sangat diperlukan untuk C dalam reaksi metabolisme. Oleh karena itu, keseimbangan internal C dan N adalah penting bagi pertumbuhan tanaman. HY5 adalah faktor transkripsi kunci yang mengintegrasikan metabolisme C dan N dengan mengatur ekspresi gen tidak hanya terkait dengan fotosintesis, tetapi juga terlibat dalam asimilasi N, seperti AtNIA2. Menariknya, dengan cahaya, protein HY5 disintesis di tunas bergerak ke akar dan meningkatkan penyerapan nitrat dengan mengaktifkan Ekspresi AtNRT2.1 (Chen et al., 2016), yang membuat HY5 berfungsi sebagai sinyal untuk mediasi keseimbangan C/N. 2-OG, merupakan substrat dari GOGAT, katalis GDH, dan kerangka karbon untuk asam amino sintesis, adalah asam organik kunci dari siklus asam trikarboksilat, pembuatan peran penting GS/GOGAT, dan GDH dalam keseimbangan metabolisme N dan C. Pada cyanobacterial, 2-OG bertindak sebagai indikator C/N yang lebih tinggi rasio, dan mengatur aktivitas penekan transkripsional untuk berubah ekspresi gen yang terkait dengan metabolisme karbon (Jiang *et al*, 2018).

### 8.3 Metabolisme Sulfur

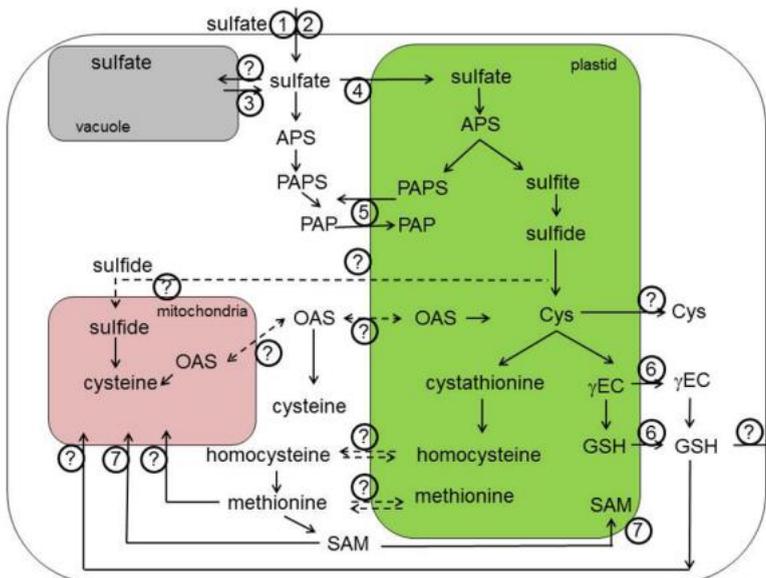
Belerang merupakan unsur hara makro paling sedikit jumlahnya yang ditemukan pada tumbuhan, hanya berkisar 0,1% pada bahan kering dibandingkan dengan 1,5% nitrogen dan 45% persen untuk karbon. Berbeda dengan karbon dan nitrogen, belerang umumnya tidak bersifat structural komponen biomolekul. Belerang hamper selalu terlibat langsung dalam fungsi katalitik atau elektrokimia dari molekul yang merupakan komponennya, karena fungsi biologis belerang sangat banyak, hanya yang paling signifikan

yang dapat digunakan (Leustek *et al*, 2000). Belerang (S) berperan sebagai unsur hara makro yang penting bagi pertumbuhan, perkembangan, dan respons tanaman terhadap perubahan lingkungan. Itu diperlukan untuk biosintesis protein, ko-enzim, gugus prostetik, vitamin, asam amino seperti Cystein dan Metionin, Glutathione, dan sekunder metabolit seperti glukosinolate dan sulfoflavonoid. Memahami metabolisme belerang pada tumbuhan sangat penting untuk nutrisi manusia karena Metionin adalah asam amino esensial dan banyak S yang mengandung metabolit sekunder dan peptida khusus [yaitu, Glutathione dan Pitochelatine] penting untuk interaksi biotik dan abiotik tanaman dan hasilnya.

Penyerapan dan distribusi belerang dikontrol secara ketat sebagai respons terhadap perubahan nutrisi yang disebabkan oleh perkembangan atau lingkungan. Meskipun jalur asimilasi sulfur primer dan sekunder dapat dijelaskan, jaringan metabolisme dan fluks metabolit ini masih kurang dipahami. Belerang yang diserap dari tanah, sulfat dimasukkan ke dalamnya adenosin-5-fosfosulfat diikuti dengan reduksi menjadi sulfit dan kemudian biosintesis sulfida dan Cystein. Secara paralel, adenosin-5-fosfosulfat dapat difosforilasi lebih lanjut menjadi 3-fosfoadenosin-5-fosfosulfat, yang digunakan untuk reaksi sulfasi. Cystein merupakan metabolit kunci dalam sintesis yang mengandung senyawa sulfur dalam tumbuhan, sedangkan sumber utama belerang adalah tidak disimpan dalam protein melainkan peptida glutathione yang mengandung Cystein. Glutathione adalah molekul universal, yang berperan penting dalam tanaman termasuk pertahanan seluler, status redoks, transduksi sinyal dan detoksifikasi. Glutathione membentuk konjugat dengan senyawa elektrofilik seperti ion logam berat, metabolit sekunder



Pengangkut sulfat adalah kelompok pengangkut metabolit S yang paling menonjol dalam tanaman karena sulfat merupakan sumber utama belerang yang diambil dari tanah dan karena sulfat merupakan yang metabolit paling melimpah pada sel tumbuhan. Oleh karena itu, yang gen cloning pertama untuk pengangkut metabolit belerang pada tumbuhan adalah gen untuk SULTR. SULTR dapat dibagi menjadi tiga kelompok besar menurut mekanismenya, bergantung pada ATP Transporter tipe ABC, simpporter  $\text{Na}^+(\text{H}^+)/\text{sulfat}$ , dan sulfat/anion ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ , oksalat) antiporter. Pada tumbuhan tingkat tinggi, hanya  $\text{H}^+/\text{SULTR}$  yang ada, sedangkan pada alga hijau dan banyak gen mikroalga yang terdapat pada ketiga kelompok tersebut, SULTR tipe ABC diketahui mengimpor sulfat ke plastida ganggang hijau tetapi ternyata tidak terdapat pada lumut dan tanaman berbiji.

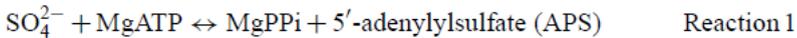


**Gambar 8. 4. proses transportasi pada asimilasi sulfur primer. Sulfat diambil oleh sel akar dengan bantuan SULTR1;1 (1) dan SULTR1;2 (2).**

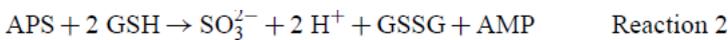
Setelah melintasi membran plasma epidermis dan akar kortikal sel, sulfat diangkut melalui rangkaian pengangkut sulfat (SULTR) yang berada pada berbagai membran dalam tumbuhan. SULTR4;1 dan SULTR4;2 penting untuk aliran efflux dari vakuola ke dalam sitoplasma (3). Pengangkut yang penting untuk masuknya sulfat ke dalam vakuole masih tidak diketahui. Pemasukan sulfat ke dalam kloroplas mungkin terjadi karena SULTR3;1 dan mungkin anggota subfamili SULTR3 lainnya (4) PAPS diproduksi baik di kloroplas dan sitoplasma dan dapat pertukaran antara kompartemen ini dengan transporter PAPST/TAAC (5). Yang diketahui transporter tiol (GSH/Gluthation dan  $\gamma$ EC) adalah transporter yang resistan terhadap klorokuin (CRT)-seperti protein atau CRL (6). Namun, sistem transportasi alternative karena tiol dalam membran plastida diharapkan ada. Dengan cara yang sama, Pengangkut GSH ke mitokondria masih menunggu penemuan. S-adenosil metionin transporter1 (SAMT1; 7) adalah protein kloroplasida terlibat dalam pertukaran SAM dengan S-adenosil homo sistein, itu produk sampingan dari reaksi metilasi yang harus diregenerasi menjadi SAM di sitoplasma. Hal ini juga terjadi pada plasmalemma yang merupakan tempat transporter dari S-methylmethionine (SMM) dan GSH/Gluthatione, yang berperan penting untuk mereduksi sulfur sehingga perlu dikeluarkan dari sel. APS, adenosine 5-phosphosulfate; Cys, cysteine; OAS, O-acetylserine;  $\gamma$ EC,  $\gamma$ -glutamylcysteine; GSH, glutathione; SAM, S-adenosylmethionine; PAPS, 3-phosphoadenosine-5-phosphosulfate; PAP, 3-phosphoadenosine 5-phosphate. Garis putus-putus menunjukkan secara teoritis kemungkinan jalur transportasi.

### 8.3.1 Assimilasi Sulfat

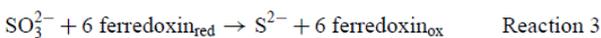
Begitu berada di dalam sel, sulfat dapat disimpan dalam vakuola, dan dapat berfungsi sebagai pengatur air utama komponen sitoplasma, atau dapat memasuki aliran metabolisme. Metabolisme dimulai oleh reaksi adenilasi yang dikatalisis oleh ATP sulfurylase.



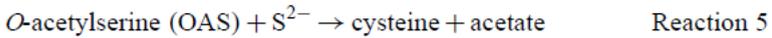
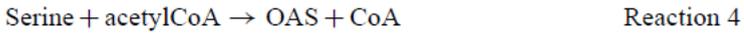
Enzim ini terlokalisasi terutama di plastida tetapi ada juga di sitosol dalam jumlah sedikit. Pada tumbuhan berpembuluh yang telah dipelajari suatu famili gen mengkodekan isoenzim ATP sulfurylase, tetapi hanya satu gen yang ada di alga hijau *Chlamydomonas reinhardtii*. Produk reaksi 5'-adenylylsulfate (APS) merupakan titik cabang perantara yang dapat disalurkan menuju reduksi atau sulfasi. Reduksi sulfat merupakan jalur asimilasi yang dominan dan dilakukan secara eksklusif dalam plastida (Gambar 8.4). Hal ini dilakukan dalam dua langkah. Yang pertama langkahnya, APS reduktase mentransfer dua elektron ke APS untuk menghasilkan sulfit (Reaksi 2). Bukti terbaik sejauh ini adalah bahwa elektron berasal dari GSH (5).



Pada reaksi kedua, sulfit reduktase mentransfer 6 elektron dari ferredoxin menghasilkan sulfide



sulfide kemudian bereaksi dengan O-acetylserine (OAS) untuk membentuk sistein, dikatalisasi oleh serine asetiltransferase dan OAS Thiol liase.



Dan saat ini tampak jelas bahwa interaksi antara serine acetyltransferase dan OAS thiol liase memegang peranan utama dalam sintesis sistein.

## DAFTAR PUSTAKA

- Chen, X., Yaou, Q., Gao, X., Jiang, C., Harberd, N.P., Fu, X. 2016. Shoot-To-Root Mobile Transcription Factor HY5 Coordinate Plant Carbon And Nitrogen Acquisition. *Current Biology*. Cell Press. Volume 26 Pages 640 – 646.
- Gigolashvili, T and Kopriva S. 2014. Transporter In Plant Sulfur Metabolism. *Frontiers In Plant Science*. Vol.5.pp 1 – 16
- Jiang, Y.L., Wang, X.P., Sun, H., Zhou, C.Z. Coordinating carbon and nitrogen metabolic signaling through the cyanobacterial global repressor NdhR. *Proceedings of The National Academy of Sciences* , 115 (2). PP.403 - 408
- Kusano, M., Fukushima, A., Redestig, H., Saito, K. 2011. Metabolomic approaches toward understanding nitrogen metabolism in plants. *Journal of Experimental Botany*. Vol.62 No.4.pp 1439 – 1453
- Leustek, T., Melinda, M., Bick, J.,Davies, J.2000. Pathways And Regulation Of Sulfur Metabolism Revealed Through Molecular And Genetic Studies. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 51: pp. 141 - 165
- Liu, X., Hu, B., Chu, C. Nitrogen Assimilation In Plants : Current Status And Future Prospects. *Journal Of Genetics and Genomics*. Vol.49. pp 394 - 404
- Nurhayati, D.R. 2021. Pengantar Nutrisi Tanaman. UNISRI Press. Surakarta

Sudarmi. 2013. Pentingnya Unsur Hara Mikro Bagi Pertumbuhan Tanaman. Widyatama

Wiratmaja, I. 2016. Pergerakan Hara Mineral Dalam Tanaman (Bahan Ajar). Program Studi Agroekoteknologi. Universitas Udayana. Denpasar

# BAB 9

## LIPID / LEMAK

Oleh Sapto Priyadi

### 9.1 Pengantar Lipid dalam Tanaman

#### 9.1.1 Definisi dan Fungsi Lipid

Lipid atau lemak adalah kelompok senyawa organik yang terdiri dari karbon, hidrogen, dan oksigen; larut dalam pelarut nonpolar seperti pelarut organik, tetapi tidak larut dalam air. Lipid dan lemak merupakan dua istilah yang sering digunakan secara bergantian, tetapi sebenarnya memiliki perbedaan. Berikut persamaan dan perbedaan antara lipid dan lemak.

**Persamaan:** secara komponen struktural lemak merupakan salah satu jenis lipid (bagian dari lipid), dan berdasarkan fungsinya lipid maupun lemak memiliki peran dalam menyimpan energi dan sebagai komponen struktural dalam sel.

**Perbedaan:** 1) Lemak merupakan subkelas lipid yang terdiri dari ester gliserol dan satu atau lebih asam lemak, dan umumnya ditemukan dalam bentuk padat pada suhu kamar. Lipid merupakan kelompok molekul yang meliputi berbagai substansi (lemak, sterol, fosfolipid, dan sebagainya). 2) Bentuk fisiknya lemak berbentuk padat pada suhu kamar; sedangkan lipid dapat berbentuk padat, cair, atau bahkan gas tergantung pada struktur kimianya. 3) Struktur kimia lemak terdiri dari gliserol yang terikat pada satu, dua, atau

tiga asam lemak melalui ikatan ester; sedangkan lipid struktur kimianya bervariasi tergantung pada jenis lipid (lemak, sterol, dan fosfolipid). 4) Berdasarkan sumbernya lemak ditemukan dalam makanan seperti minyak, mentega, dan lemak hewani; sedangkan lipid ditemukan dalam berbagai jenis makanan termasuk lemak, fosfolipid sel, dan sterol. 5) Sifat lemak lebih cenderung menjadi sumber energi jangka panjang; sedangkan lipid memiliki berbagai fungsi sebagai struktur sel, sinyal seluler, dan penyimpanan energi. Dengan kata lain, lemak merupakan salah satu jenis lipid yang memiliki sifat-sifat tertentu; sedangkan lipid sebagai kategori lebih luas yang meliputi berbagai jenis molekul dengan fungsi dan struktur yang berbeda (Steimle et al., 2016).

Lapisan lilin pada daun, buah, dan kutikula kulit mengandung lipid, terutama cutin dan wax. Fungsinya antara lain: 1) Perlindungan: Lapisan lilin membantu melindungi tanaman dari kehilangan air karena mengurangi penguapan melalui kutikula. 2) Perlindungan terhadap organisme pengganggu tanaman (hama dan patogen/penyakit): Lapisan lilin dapat berperan sebagai penghalang fisik, mencegah masuknya hama dan patogen/penyakit ke dalam tanaman. 3) Melawan ultra violet (UV): Lilin dapat melindungi tanaman dari kerusakan akibat sinar UV. 4) Mencegah perekatan air: Lapisan lilin dapat mencegah air menempel pada permukaan daun atau buah, membantu tanaman menghindari patogen/penyakit (jamur) akibat kelembaban mikro iklim (di sekitar tanaman) yang tinggi. 5) Memberikan kilau pada mahkota bunga (Mamode Cassim et al., 2019).

Gliserol dikenal sebagai gliserin merupakan senyawa triol yang berfungsi sebagai penyusun utama lemak dan minyak. Struktur kimia gliserol memiliki tiga gugus hidroksil (-OH) yang terikat pada tiga atom karbon yang berbeda. Rumus kimia gliserol ( $C_3H_8O_3$ ) dengan struktur  $HO-CH_2-CHOH-CH_2-OH$ . Dalam konteks lemak, gliserol bergabung dengan asam lemak membentuk molekul yang disebut monoasilgliserol, diasilgliserol dan triasilgliserol atau trigliserid.

- Monoasilgliserol (MAG), merupakan molekul yang terdiri dari satu molekul asam lemak yang teresterifikasi dengan satu molekul gliserol. Dalam fisiologi tanaman monoasilgliserol berperan sebagai intermediate dalam pembentukan lipid (seperti: fosfolipid dan trigliserida). Proses pembentukan monoasilgliserol disebut dengan hidrolisis atau pemecahan lemak oleh enzim lipase (Subroto et al., 2021).
- Diasilgliserol (DAG), merupakan molekul yang terdiri dari dua molekul asam lemak yang teresterifikasi dengan satu molekul gliserol. Dalam fisiologi tanaman, merupakan intermediate penting dalam metabolisme lipid, terlibat dalam jalur sintesis dan degradasi lipid. DAG juga berperan dalam transduksi sinyal seluler, termasuk dalam proses seperti jalur fosfatidilinositol (PI) yang terlibat dalam respons hormonal (Subroto et al., 2021).
- Triasilgliserol (TAG) atau trigliserida merupakan molekul yang terdiri dari tiga molekul asam lemak yang teresterifikasi dengan satu molekul gliserol. Dalam tanaman, trigliserida adalah bentuk penyimpanan utama dari lemak. Molekul ini disimpan dalam bentuk minyak pada biji dan buah untuk menyediakan sumber energi selama periode pertumbuhan awal tanaman atau untuk mendukung ketersediaan energi selama kondisi stres atau

kekurangan nutrisi. Ketiga senyawa ini memiliki peran penting dalam metabolisme lipid tanaman, baik sebagai sumber energi maupun sebagai komponen struktural dalam membran sel (Maraschin et al., 2019).

### **9.1.2. Struktur Lipid**

Lipid memainkan peran integral dalam memelihara struktur dan fungsi normal sel tumbuhan serta berkontribusi pada adaptasi sel tumbuhan terhadap kondisi lingkungan yang berubah. Lipid dalam fisiologi tanaman berperan penting dalam pengangkutan nutrisi dan energi, yaitu terlibat dalam pembentukan membran sel yang memfasilitasi transportasi nutrisi melalui membran sel tanaman. Selain itu, lipid menyimpan energi dalam bentuk lemak yang dapat dioksidasi untuk menyediakan energi selama proses metabolisme. Proses fotosintesis memerlukan lipid, khususnya dalam pembentukan kloroplas dan sintesis pigmen fotosintesis. Terkait dengan keterlibatan lipid dalam: pembentukan membran sel, penyedia energi dalam metabolisme, pembentukan kloroplas dan pigmen fotosintesis, maka lipid berperan dalam pengangkutan nutrisi dan energi dalam tanaman. Membran plasma adalah lapisan ganda lipid dengan protein integral dan protein perifer. Berdasarkan sifat kimianya, lipid membran plasma dapat difraksinasi menjadi phospholipids (PLs), lipid netral/neutral lipids (NLs), dan glycolipid (GL). PL termasuk asam fosfatidat/phosphatidic acid (PA), phosphatidylethanolamine (PE), phosphatidylcholine (PC), phosphatidylserine (PS), phosphatidylinositol (PI), dan phosphatidylglycerol (PG); Lipid netral dibentuk oleh berbagai sterol bebas/free sterol (FS), sedangkan GL meliputi steril glukosida/steryl glucosides (SG), steril glukosida terasilasi/acylated

steryl glucosides (ASG), dan serebrosida/cerebrosides (CER). Komposisi lipid pada membran plasma dan tonoplast tumbuhan tingkat tinggi sangat berbeda dengan komposisi lipid pada membran sel lainnya, karena terdapat banyak sterol (dalam bentuk bebas maupun glukosilasi) dan serebrosida/cerebrosides. Membran plasma dari oat, bayam, kentang, dan barley telah dikarakterisasi, proporsi PL, CER, dan sterol menunjukkan variasi yang cukup besar di antara keduanya (Chen et al., 2020).

Lipid dalam struktur sel tumbuhan, meliputi:

1) Komponen membran sel

Lipid merupakan komponen utama membran sel tumbuhan; fosfolipid merupakan salah satu tipe lipid yang membentuk lapisan ganda dalam membran sel, menciptakan lingkungan hidrofobik yang memisahkan kompartemen sel dari lingkungan eksternal (Reszczyńska & Hanaka, 2020).

2) Energi cadangan

Triasilgliserol merupakan bentuk penyimpanan lemak yang berfungsi sebagai sumber energi cadangan dalam sel tumbuhan. Lipid disimpan dalam bentuk droplet lipid pada biji dan jaringan penyimpanan lainnya (Maraschin et al., 2019).

3) Pembentukan dinding sel

Sebagian besar dinding sel tumbuhan terdiri dari suatu lapisan yang disebut membran seluler, yang terdiri dari berbagai jenis lipid. Lipid membantu membentuk struktur dan memberikan dukungan mekanis pada sel tumbuhan (Reszczyńska & Hanaka, 2020).

4) Peran dalam transport

Lipid terutama fosfolipid berperan dalam proses transport melalui membran sel. Molekul lipid membentuk lapisan ganda yang memungkinkan difusi selektif zat-zat tertentu melintasi membran (LaBrant et al., 2018).

5) Sinyal seluler

Lipid berpartisipasi dalam transduksi sinyal seluler. Molekul lipid seperti fosfatidilinositol memainkan peran penting dalam jalur sinyal dan transduksi sinyal di dalam sel (Okazaki & Saito, 2014) (Turnbull & Hemsley, 2017).

6) Proteksi terhadap stres lingkungan

Beberapa lipid seperti fosfolipid khusus dan sterol dapat memberikan perlindungan terhadap stres lingkungan seperti suhu ekstrem atau tekanan oksidatif. Fosfolipid yang memiliki peran dalam melindungi sel terhadap stres lingkungan adalah fosfatidilserin. Fosfatidilserin merupakan salah satu jenis fosfolipid yang mengandung asam amino serin. Fosfolipid tersebut terdapat dalam lapisan ganda membran sel dan berperan penting dalam mengatur fluiditas membran serta fungsi sel secara keseluruhan (J. Li et al., 2020).

Fosfatidilserin dapat berpartisipasi dalam respons sel terhadap stres oksidatif dan stres lingkungan lainnya. Sebagai contoh, fosfatidilserin dapat berinteraksi dengan enzim-enzim antioksidan dan molekul-molekul yang melibatkan pertahanan sel terhadap radikal bebas atau tekanan oksidatif; dengan demikian fosfatidilserin dapat membantu melindungi integritas membran sel dan menjaga

keseimbangan fisiologis sel di bawah kondisi stres lingkungan tertentu (Okazaki & Saito, 2014).

Fungsi lipid dalam tumbuhan, bersifat kompleks dan saling terkait mendukung berbagai aspek kehidupan seluler dan respons terhadap lingkungan. Lipid berfungsi sebagai sumber energi yang penting dalam tumbuhan, disimpan dalam bentuk minyak dan lemak sebagai cadangan energi yang dapat digunakan saat dibutuhkan, seperti selama fase pertumbuhan atau kurangnya sumber energi eksternal. Fungsi lipid sebagai sumber energi dalam tanaman, meliputi:

1. Simpanan energi, tanaman menyimpan energi dalam bentuk lipid, khususnya minyak dan lemak yang dapat dioksidasi menghasilkan energi untuk memenuhi kebutuhan metabolisme.
2. Respirasi, lipid digunakan dalam proses respirasi selular tanaman untuk menghasilkan energi melalui oksidasi asam lemak, yang terjadi dalam mitokondria.
3. Fotosintesis, meskipun lipid bukan komponen utama dalam fotosintesis, namun berkontribusi pada pembentukan membran tilakoid yang penting dalam tahap fosforilasi oksidatif fotosintesis. Membran tilakoid adalah struktur esensial dalam kloroplas sel tumbuhan dan alga, yang berperan penting dalam tahap fosforilasi oksidatif fotosintesis. Membran tilakoid merupakan sistem membran tipis dan melipat di dalam kloroplas yang mengandung pigmen fotosintesis seperti klorofil. Struktur tersebut berperan utama dalam konversi energi matahari menjadi energi kimia yang dapat digunakan oleh sel tumbuhan atau alga. Membran tilakoid berperan dalam pembentukan grana dan stroma

thylakoid, yang bersama-sama menciptakan lingkungan optimal untuk proses fotosintesis. Selama tahap fosforilasi oksidatif, energi yang terkumpul selama penangkapan cahaya digunakan untuk mentransfer elektron melalui sistem transport elektron, menghasilkan gradien elektrokimia yang mengarah pada produksi ATP (Kobayashi et al., 2020).

Beberapa lipid memiliki peran dalam sistem pertahanan tumbuhan terhadap patogen, dan terlibat dalam respons imun terhadap serangan penyakit. Pada sistem pertahanan tanaman terhadap patogen, terdapat lipida yang berperan dalam respons pertahanan tanaman adalah asam oleat. Asam oleat merupakan komponen dari lipid (asam lemak), dan terlibat dalam pembentukan senyawa oksilipin. Oksilipin adalah senyawa yang dihasilkan oleh tanaman sebagai respons terhadap serangan patogen. Asam oleat melalui oksidasi enzimatis membentuk oksilipin, dan berfungsi sebagai sinyal untuk mengaktifkan respons pertahanan tanaman, seperti produksi senyawa-senyawa antimikroba atau peningkatan aktivitas sistem pertahanan lainnya. Fosfolipid (seperti fosfatidilinositol) dapat berperan dalam respons pertahanan tanaman. Fosfolipid ini terlibat dalam regulasi jalur sinyal yang memicu reaksi pertahanan terhadap patogen (Turnbull & Hemsley, 2017).

Beberapa lipid (seperti minyak esensial/atsiri) yang mengandung terpenoid, berkontribusi pada produksi wewangian dan aroma khas pada tumbuhan, yang memainkan peran dalam daya tarik bagi serangga penyerbuk dan memberikan karakteristik/aroma khas (flavor) pada tumbuhan. Ester lipida dihasilkan dari asam lemak dan alkohol juga dapat memberikan

aroma khas pada tumbuhan, dan sering dihasilkan selama proses pematangan buah serta memberikan karakteristik aroma buah tersebut. Penting untuk dicatat bahwa aroma khas tumbuhan adalah hasil dari interaksi kompleks antara berbagai senyawa kimia, termasuk senyawa lipid, dan faktor-faktor genetik serta lingkungan, sehingga diperlukan riset secara mendalam bagaimana senyawa lipid berkontribusi pada pembentukan aroma khas pada berbagai jenis tumbuhan (Topçu et al., 2013).

## **9.2 Klasifikasi dan Distribusi Lipid**

### **9.2.1 Jenis Lipid Utama (lemak, fosfolipid dan sterol)**

Dalam konteks fisiologi tumbuhan, klasifikasi lipid mencakup beberapa jenis utama, yakni lemak, fosfolipid, dan sterol. Dalam fisiologi tumbuhan, lipid-lipid ini memiliki peran yang sangat penting. Lemak memberikan cadangan energi yang diperlukan selama periode pertumbuhan atau kurangnya sumber energi lainnya. Fosfolipid membentuk dasar struktural membran sel, sementara sterol mengatur struktur membran dan berkontribusi pada regulasi hormon dan respons tumbuhan terhadap lingkungan.

Berikut penjelasan lebih rinci mengenai jenis-jenis lipid tersebut:

#### 1) Trigliserida

Struktur dasarnya terdiri dari satu molekul gliserol yang terikat dengan tiga rantai asam lemak melalui ikatan ester. Fungsinya sebagai cadangan energi yang disimpan dalam biji dan buah, serta sebagai isolator termal dan membantu melindungi organ tumbuhan dari kekeringan. Trigliserida merupakan bentuk utama dari lemak, dan dikenal sebagai

triasilgliserol atau triasilgliserida. Di tanaman, trigliserida berperan sebagai penyimpanan energi yang penting. Mereka terutama terdapat dalam biji dan biji-bijian, yang berfungsi sebagai sumber energi untuk pertumbuhan bibit saat tumbuhan mulai tumbuh. Trigliserida dalam tanaman juga berperan dalam perlindungan dan isolasi, yaitu membantu melindungi biji dari kekeringan dan memberikan isolasi termal selama fase dormansi, ketika bibit menunggu kondisi yang sesuai untuk berkecambah. Proses penyerapan trigliserida dari biji oleh embrio selama perkecambahan juga membantu menyediakan energi yang diperlukan untuk pertumbuhan awal. Trigliserida dapat dipecah menjadi asam lemak dan gliserol untuk digunakan sebagai sumber energi atau untuk membangun struktur lipid lainnya yang dibutuhkan oleh sel (Maraschin et al., 2019).

## 2) Fosfolipid

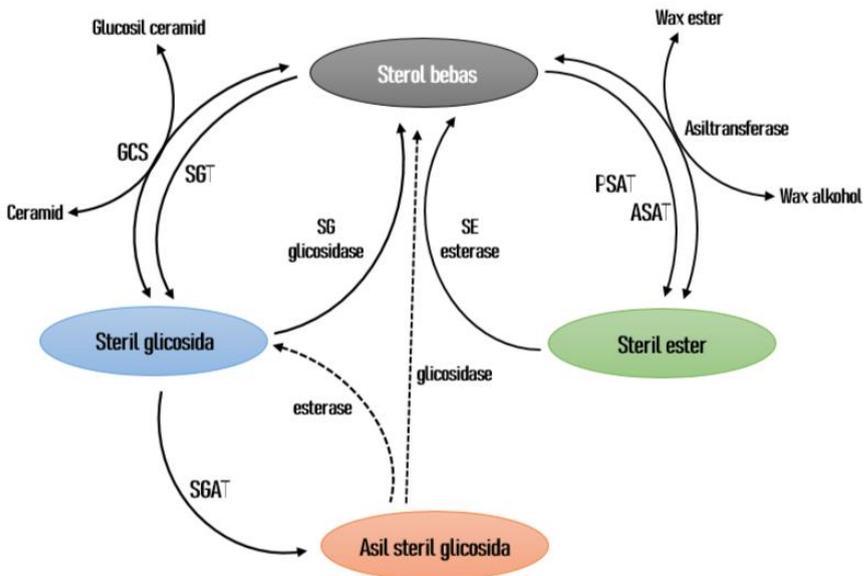
Fosfolipid dalam tumbuhan memiliki struktur dasar yang serupa dengan lemak, tetapi salah satu asam lemak pada gliserolnya digantikan oleh gugus fosfat yang berikatan dengan gugus polar. Fosfolipid terdiri dari kepala polar dan ekor nonpolar. Dalam membran sel tumbuhan, gugus polar fosfolipid menghadap ke luar, menjauh dari inti membran lipid ganda, sementara ekor nonpolar menyusun inti membran. Gugus polar ini dapat terdiri dari gliserol, fosfat, dan kepala polar yang beragam, seperti asam amino dan etanolamin. Fosfatidilserin struktur umumnya meliputi gliserol, dua ekor asam lemak nonpolar, dan satu gugus fosfat dengan kepala polar serin. Ketika fosfolipid tersebut terdapat

dalam membran sel, kepala polar dengan serin menghadap ke luar, dan berinteraksi dengan air di luar sel; di sisi lain ekor nonpolar asam lemak menyusun inti membran lipid ganda (menghadap ke plasma sel) untuk molekul-molekul nonpolar. Fungsinya menjaga sifat impermeabilitas membran sel terhadap molekul-molekul nonpolar untuk integritas struktural dan fungsional sel (Ferrer et al., 2017).

### 3) Sterol

Struktur sterol dalam tumbuhan (fitosterol), memiliki cincin struktural kompleks dan memiliki gugus hidroksil; berbeda dengan sterol yang ditemukan pada hewan (kolesterol). Fungsi sterol dalam tumbuhan memodulasi fluiditas membran sel dan dapat berfungsi sebagai prekursor untuk sintesis senyawa-senyawa penting, termasuk beberapa hormon tumbuhan. Pada tumbuhan, keberadaan sterol tidak hanya sebagai sterol bebas/free sterols (FS) tetapi juga terkonjugasi dalam bentuk steril ester (SE), steril glikosida (SG) dan asil steril glikosida (ASG). Metabolisme sterol terkonjugasi pada tanaman melibatkan enzim acyl CoA:sterol acyltransferase (ASAT), phospholipid:sterol acyltransferase (PSAT), uridine diphosphate/UDP-SGT (glukosa:sterol glycosyltransferase); steryl glycoside acyltransferase (SGAT), glucosylceramide synthase (GCS); metabolisme sterol disajikan pada (gambar 1). Dalam steril ester, gugus hidroksil pada posisi C3 diesterifikasi dengan asam lemak. Steril glikosida dicirikan dengan memiliki gula yang terikat pada gugus hidroksil C3 dari bagian sterol melalui ikatan  $\beta$ -glikosidik. Asil steril glikosida merupakan turunan dari steril glikosida yang

gugus hidroksilnya pada posisi C6 dari gugus gula diesterifikasi dengan asam lemak. Pada beberapa tanaman (terutama sereal), sterol ditemukan terkonjugasi dalam bentuk steryl ferulates. Asam ferulat adalah turunan hidroksilasi dari asam sinamat, suatu zat antara metabolisme dalam jalur fenilpropanoid (Ferrer et al., 2017).



**Gambar 9. 1. Skema metabolisme sterol terkonjugasi pada tanaman, dan enzim yang terlibat: acyl CoA:sterol acyltransferase (ASAT), fosfolipid: sterol acyltransferase (PSAT), uridine diphosphate (UDP)-glucosa:sterol glycosyltransferase (SGT), steryl glycosida acyltransferase (SGAT), dan glucosylceramida synthase (GCS).**

4) Jenis lipid lainnya: Very Long Chain Fatty Acids (VLCFA)

Lemak dalam tanaman sering kali mengandung asam lemak yang sangat panjang atau dikenal sebagai very long chain fatty acids (VLCFA). Struktur kimia dari VLCFA ini mencakup rantai karbon yang lebih panjang dari 18 atom karbon, yang memberikan sifat khusus pada lipid tersebut. Biosintesis VLCFA dalam tanaman terjadi melalui serangkaian reaksi enzimatik yang kompleks, dimulai dari asam lemak rantai panjang yang disintesis di dalam plastid; kemudian, melalui proses elongasi, enzim-enzim yang terlibat menambahkan unit karbon ke rantai asam lemak. VLCFA molekul penting yang memainkan peran fisiologis dan struktural penting pada tanaman. Very-Long-Chain Fatty Acids (VLCFA) secara spesifik terdapat beberapa lipid membran dan penting untuk homeostasis membran. Akumulasi spesifiknya dalam sphingolipid pada lembaran luar membran plasma sangat penting untuk berfungsinya komunikasi antar sel dengan benar. VLCFA ditemukan di fosfolipid, terutama di fosfatidilserin dan fosfatidiletanolamin, di mana mereka dapat berperan dalam organisasi domain membran dan penggandengan interleaflet (Batsale et al., 2021).

Very-Long-Chain Fatty Acids (VLCFA) yang terdiri dari 20 karbon atau lebih dapat diderivatisasi dan dimodifikasi menjadi komponen yang sangat fleksibel dan merupakan prekursor berbagai lipid penting. VLCFA diperlukan di semua sel tumbuhan untuk sintesis lipid membran esensial seperti fosfolipid dan sphingolipid serta digunakan sebagai prekursor lilin kutikula pelindung dan suberin pada epidermis daun dan

akar. VLCFA tanaman merupakan prekursor lipid yang terlibat dalam berbagai proses fisiologis seperti transportasi membran, pembelahan dan diferensiasi sel, pencegahan kehilangan air non-stomata, atau penyimpanan energi (Zhukov & Shumskaya, 2020).

### **9.2.2 Distribusi Lipid**

Distribusi lipid dalam tumbuhan tidak homogen dan dapat bervariasi antar jenis jaringan. Daun, biji dan buah seringkali menjadi lokasi utama penyimpanan lipid, sementara lipid dalam bentuk fosfolipid tersebar di seluruh membran sel dalam tumbuhan, dan berikut penjelasan mengenai distribusi dan peran lipid dalam tumbuhan. Tumbuhan menyimpan energi dalam bentuk lipid, terutama dalam bentuk minyak. Selama fotosintesis, tumbuhan menghasilkan glukosa dan kemudian mengubahnya menjadi asam lemak melalui proses lipogenesis (F. Lu et al., 2018). Asam lemak diubah menjadi trigliserida, yang merupakan bentuk penyimpanan utama lipid dalam tumbuhan, dan disimpan dalam biji, buah, daun, akar, batang dan kulit batang. Setiap tumbuhan memiliki keunikan dalam komposisi lipidnya, masing-masing memberikan karakteristik khas baik untuk keperluan industri maupun pengobatan tradisional (Maraschin et al., 2019).

Lipid dalam tanaman dapat memiliki berbagai manfaat, termasuk aroma, kesehatan, dan kegunaan industri tertentu, beberapa contoh lipid yang terdapat dalam jaringan beberapa tanaman:

a) Lipid pada biji

Contoh tanaman di mana lipid disimpan dalam jaringan biji adalah kacang kedelai (*Glycine max*), dan kelapa (*Cocos nucifera*) memiliki kandungan minyak yang tinggi dalam bijinya.

b) Lipida pada buah

Kelapa sawit (*Elaeis guineensis*), contoh tanaman di mana lipid disimpan dalam buahnya, minyak diekstraksi dari buahnya dan digunakan dalam berbagai produk pangan dan bahan bakar ramah lingkungan.

c) Lipid pada daun

- Daun tanaman kayu putih (*Melaleuca alternifolia*), mengandung minyak esensial yang mengandung lipid. Minyak ini terkenal karena memiliki sifat antiseptik dan digunakan dalam berbagai produk kesehatan dan kecantikan.
- Daun tanaman nilam (*Ocimum basilicum*), mengandung minyak esensial dan termasuk komponen eugenol. Minyak nilam sering digunakan dalam industri parfum dan obat-obatan.

d) Lipid pada batang

- Batang tanaman gaharu (*Aquilaria spp.*) atau agarwood, contoh tanaman di mana lipid disimpan dalam batangnya. Komponen minyak atsiri yang terbentuk sebagai respons

terhadap infeksi jamur, digunakan dalam produksi wewangian dan obat-obatan tradisional.

- Batang tanaman cendana (*Santalum album*), mengandung minyak esensial dan dikenal karena aromanya yang khas, digunakan dalam industri parfum dan pengobatan tradisional.

e) Lipid pada akar

- Akar Wangi (*Vetiveria zizanioides*), dikenal sebagai vetiver mengandung minyak esensial yang merupakan campuran kompleks lipid. Minyak ini memiliki aroma yang khas dan digunakan dalam industri parfum dan kosmetik.
- Akar silakan/galanga (*Kaempferia galanga*), mengandung minyak atsiri yang menyimpan sejumlah lipid, dan sering digunakan dalam pengobatan tradisional dan masakan Asia Tenggara.

f) Lipida pada kulit batang

Kayu manis (*Cinnamomum verum* atau *Cinnamomum cassia*), contoh tanaman di mana lipid disimpan dalam kulit batangnya, minyak esensial yang ditemukan dalam kulit batang kayu manis mengandung sejumlah lipid (cinamaldehyde, eugenol, dan linalool). Minyak kayu manis sering digunakan dalam industri makanan, minuman, dan parfum; juga memiliki potensi manfaat kesehatan, seperti sifat antioksidan, antiinflamasi, dan antimikroba.

## 9.3 Biosintesis dan Penyimpanan Lipid

### 9.3.1 Proses Pembentukan Lipid

Biosintesis lipid merupakan proses di mana tanaman membuat molekul-molekul lipid yang diperlukan untuk berbagai fungsi seluler (pembentukan membran sel, penyimpanan energi, dan sinyal seluler). Proses ini melibatkan beberapa jalur biosintesis yang berbeda, termasuk sintesis asam lemak, pembentukan gliserolipid, dan pembentukan sphingolipid. Tahapan utama dalam proses biosintesis lipid:

1. Sintesis asam lemak

Sintesis dimulai dengan pembentukan asam lemak dari prekursor asam asetat melalui serangkaian reaksi enzimatik. Enzim-enzim (asam lemak sintase) terlibat dalam menambahkan unit-unit karbon ke rantai asam lemak yang sedang tumbuh. Berikut disajikan sintesis asam lemak dan zat antara yang dihubungkan dengan ujung sulfhidril dari gugus fosfopantethein, yang selanjutnya terikat pada residu serin dari  $\beta$ -ketoacyl-acyl carrier protein (ACP). Fase pemanjangan sintesis asam lemak dimulai dengan pembentukan asetil-ACP dan malonil-ACP yang dikatalisis oleh asetil transasilase dan malonil transasilase (Chandel, 2021).



## 2. Pembentukan gliserolipid

Asam lemak yang dihasilkan kemudian digunakan untuk menyusun molekul gliserolipid, yang merupakan komponen utama membran sel. Glycerol-3-phosphate merupakan prekursor utama dalam pembentukan gliserolipid. Asam lemak dihubungkan ke molekul ini untuk membentuk gliserolipid (seperti: fosfatidil asam lemak dan fosfatidilgliserol). lipase menghidrolisis triacylglycerol untuk gliserol dan asam lemak yang dikonversi menjadi gula dan mendukung pertumbuhan tanaman muda. Beberapa reaksi (hidrolisis, gliserolisis, asidolisis, dan transesterifikasi) dikatalisis enzim lipase untuk menghasilkan gliserol, asam lemak bebas, ester, sebagian gliserida dan lemak yang dimodifikasi atau di esterifikasi. Penguraian lemak atau trigliserida oleh molekul air disebut hidrolisa, menjadi asam-asam lemak bebas dan gliserol (Nugroho et al., 2022).

## 3. Sintesis sphingolipid

Sphingolipid merupakan kelompok lipid lain yang terlibat dalam berbagai fungsi, termasuk struktur membran dan sinyal seluler. Sphingosina, prekursor sphingolipid, dihasilkan dari asam amino serin melalui serangkaian reaksi biosintesis (Liu et al., 2021). Sphingolipid paling banyak terdapat di sitoplasma dan membran vakuolar, terutama bersama dengan sterol yang membentuk mikrodomain membran (lipid rafts), yang penting untuk aktivitas permukaan sel dan perdagangan protein ke membran plasma (Hou et al., 2016). Sintesis sphingolipid pada tanaman merupakan proses biokimia kompleks yang terjadi dalam

berbagai organel sel tanaman, terutama dalam sitosol dan retikulum endoplasmik. Sphingolipid merupakan salah satu jenis lipid yang penting dalam struktur membran sel, serta memiliki peran penting dalam regulasi sinyal seluler dan respons terhadap stres lingkungan (Ali et al., 2018). Proses sintesis sphingolipid dimulai: 1) Pembentukan asam amino serin dalam sitosol. 2) Serin kemudian diubah menjadi 3-ketodihydrosphingosin melalui serangkaian reaksi biokimia yang melibatkan enzim-enzim spesifik. 3) 3-ketodihydrosphingosin diubah menjadi dihydrosphingosin dan kemudian kefingosin oleh enzim-enzim seperti dihydrosphingosin reductase dan seramida sintase. 4) Modifikasi lanjutan pada kefingosin, seperti penambahan gugus fosfat untuk membentuk sphingomielin atau penambahan gugus gula untuk membentuk gangliosida (Liu et al., 2021).

Sphingolipid juga dapat diproduksi melalui jalur *de novo* di dalam retikulum endoplasmik, yang melibatkan serangkaian reaksi enzimatik yang berbeda. Sintesis sphingolipid ini merupakan proses penting dalam regulasi komposisi membran sel, serta dalam respons terhadap berbagai faktor lingkungan seperti stres biotik dan abiotik. Dalam tanaman, sphingolipid juga telah terbukti berperan dalam regulasi pertumbuhan dan perkembangan, respons terhadap patogen, dan toleransi terhadap kondisi lingkungan yang ekstrem (Ali et al., 2018). Sphingolipid tanaman terutama terdiri dari glycosylated inositolphosphoryl ceramides (GIPCs) atau glucosylceramides (GlcCers)). Mesin dasar untuk sintesis sphingolipid adalah biosintesis *de novo* yang terjadi di

retikulum endoplasmik dan dimulai dari kondensasi serin dengan palmitoyl-CoA oleh serine palmitoyl transferase/serine palmitoyl transferase (SPT) yang menghasilkan long-chain base (LCB) berbeda. LCB dihubungkan dengan asam lemak oleh sphingosine N-acyltransferase dan selanjutnya dimodifikasi untuk membentuk ceramide sebagai tulang punggung sphingolipid yang lebih kompleks. Pada tumbuhan, ceramide disintesis di retikulum endoplasmik dan selanjutnya diangkut ke golgi untuk dimodifikasi dengan menempelkan kelompok kepala polar yang berbeda membentuk glycosylated inositolphosphoryl ceramides (GIPCs), glucosylceramides (GlcCers), dan inositolphosphates ceramides (Hou et al., 2016).

#### 4. Modifikasi dan transport

Lipid yang dihasilkan dapat mengalami modifikasi tambahan, seperti penambahan gugus fosfat, gula, atau asam amino. Lipid yang sudah terbentuk kemudian diangkut ke tempat-tempat yang dibutuhkan dalam sel atau disimpan sebagai cadangan energi (Flügge et al., 2011).

Biosintesis lipid melibatkan sejumlah enzim dan jalur metabolik yang kompleks dan saling terkait, menciptakan jaringan biosintesis lipid dalam sel tanaman. Proses ini penting untuk memenuhi kebutuhan sel tanaman akan berbagai jenis lipid yang mendukung fungsi biologisnya.

Beberapa enzim dan jalur metabolisme kunci yang terlibat dalam biosintesis lipid:

1) Jalur metabolik sintesis asam lemak

- Enzim yang berperan Acetyl-CoA Carboxylase (ACC), berperan dalam mengubah asetil-KoA menjadi malonil-KoA, merupakan langkah awal dalam sintesis asam lemak.
- Proses dimulai dengan konversi asetil-KoA menjadi malonil-KoA oleh ACC. Malonil-KoA kemudian digunakan untuk membangun rantai karbon asam lemak (Singh et al., 2005).

2) Jalur metabolik sintesis triasilgliserol

- Enzim yang berperan Glicerol-3-Fosfat Asetiltransferase (GPAT), 1-Asilgliserol-3-Fosfat Asetiltransferase (AGPAT), dan Diasilgliserol Asetiltransferase (DGAT).
- Enzim GPAT dan AGPAT bertanggung jawab untuk langkah awal sintesis triasilgliserol, sedangkan DGAT memfasilitasi langkah terakhir.
- Glicerol-3-fosfat dan asam lemak diubah menjadi triasilgliserol melalui serangkaian reaksi yang melibatkan GPAT, AGPAT, dan DGAT (J. Lu et al., 2020).

3) Jalur metabolik sintesis fosfolipid

- Enzim yang berperan Cytidine Diphosphate-Diacylglycerol (CDP-DAG), merupakan molekul antara dalam sintesis lipid, berfungsi sebagai

prekursor dalam pembentukan berbagai fosfolipid, termasuk fosfatidil inositol.

- Inositol 3-Phosphatidyltransferase, merupakan enzim yang bertanggung jawab untuk memindahkan grup fosfat dari inositol 3-fosfat ke molekul CDP-DAG, membentuk fosfatidil inositol.
- Enzim tersebut memainkan peran kunci dalam sintesis fosfatidil inositol (PI).
- Fosfatidil Inositol (PI) merupakan hasil akhir dari sintesis tersebut, dan merupakan fosfolipid yang berperan penting dalam struktur membran sel tanaman. PI juga merupakan prekursor untuk sintesis beberapa senyawa biologis yang penting, antara lain fosfatidilinositol 4,5-bisfosfat (PIP<sub>2</sub>); merupakan fosfolipid membran sel yang terbentuk dari fosfatidilinositol dengan penambahan gugus fosfat pada posisi 4 dan 5, yang berperan dalam transduksi sinyal seluler (Nakamura, 2017).

#### 4) Jalur metabolik sintesis sterol (fitosterol)

- Enzim yang berperan Squalene Epoksidase, Lanosterol Sitokrom P450 Monooksigenase
- Enzim-enzim ini terlibat dalam langkah-langkah kunci biosintesis sterol tanaman.
- Acetil-KoA diubah menjadi sterol melalui serangkaian reaksi yang melibatkan squalene dan lanosterol (Chandel, 2021).

### 9.3.2 Penyimpanan Lipid

Transportasi lipid dalam fisiologi tanaman melibatkan pergerakan molekul-molekul lemak atau lipid dari suatu jaringan tanaman ke jaringan lainnya. Transportasi lipid mendukung fungsi biologis utama dalam tanaman, termasuk biosintesis lipid di plastida, akumulasi dalam organel lemak, transportasi antar sel melalui plasmodesma, penggunaan protein transfer lipid, serta peran pentingnya dalam pertumbuhan, perkembangan, dan respons terhadap stres lingkungan.

Dalam fisiologi tanaman, mekanisme transportasi lipid yang terlibat dalam pergerakan molekul-molekul lemak di dalam tanaman merupakan peran lipid dalam proses biologis. Mekanisme transportasi lipid dalam tanaman mencakup berbagai tahapan yang penting untuk fungsi biologis yang beragam dalam tanaman, mulai dari pertumbuhan dan perkembangan hingga adaptasi terhadap lingkungan.

Mekanisme transportasi lipid dalam tanaman dapat dijelaskan sebagai berikut.

- 1) Biosintesis lipid, mekanisme transportasi lipid dimulai dengan proses biosintesis lipid di dalam sel tanaman. Mekanisme tersebut terutama terjadi di dalam plastida, termasuk kloroplas dan lemak. Lipid disintesis dari prekursor yang berasal dari jalur metabolisme primer tanaman, sebagaimana jalur asam lemak yang telah dibahas sebelumnya.
- 2) Akumulasi dalam plastida, lipid yang disintesis dapat diakumulasi dalam plastida, terutama di dalam organel lemak. Dalam plastida lipid disimpan sebagai cadangan energi dan

digunakan saat dibutuhkan untuk pertumbuhan, perkembangan, atau respons terhadap stres.

- 3) Transportasi antar sel, setelah sintesis dan akumulasi, lipid dapat diangkut antar sel melalui proses terstruktur yang disebut plasmodesma, yaitu jalur komunikasi antar sel tanaman. Lipid berpindah dari satu sel ke sel lainnya melalui plasmodesma.
- 4) Protein transfer lipid, dalam beberapa kasus transportasi lipid melibatkan protein khusus (fosfolipid transfer protein) yang bertindak sebagai pembawa lipid melintasi membran sel (memfasilitasi perpindahan lipid antar sel). Regulasi transportasi lipid, transportasi lipid dalam tanaman dapat diatur oleh berbagai faktor internal dan eksternal termasuk hormon dan kondisi lingkungan. Hormon asam absisat dapat mempengaruhi ekspresi gen yang terlibat dalam metabolisme lipid, yang pada gilirannya dapat memengaruhi transportasi lipid.
- 5) Peran dalam pertumbuhan, perkembangan, dan respons terhadap stres, transportasi lipid memiliki peran penting dalam berbagai aspek kehidupan tanaman. Lipid diperlukan untuk pembentukan membran sel, sintesis hormon, serta sebagai sumber energi selama kondisi tertentu, termasuk respons terhadap stres lingkungan seperti kekeringan atau suhu ekstrem.

Dalam fisiologi tanaman, akumulasi dan penyimpanan lipid merupakan proses penting yang memainkan peran kunci dalam siklus hidup tanaman. Lipid terutama lemak, diakumulasi dan

disimpan dalam berbagai bagian tanaman untuk berbagai tujuan. Akumulasi dan penyimpanan lipid dalam tanaman tidak hanya mendukung pertumbuhan dan perkembangan, tetapi juga memberikan ketahanan terhadap kondisi lingkungan yang berfluktuasi. Tanaman mengakumulasi lipid sebagai sumber energi cadangan dan bahan bangunan untuk pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Proses akumulasi lipid dapat terjadi dalam bentuk trigliserida, fosfolipid, atau sterol, tergantung pada jenis tanaman dan kondisi lingkungan (Benning, 2009).

Lipid disimpan dalam berbagai jaringan tanaman, termasuk biji, akar, daun, dan buah. Biji seringkali mengandung konsentrasi lipid yang tinggi sebagai cadangan makanan untuk mendukung pertumbuhan awal tanaman setelah perkecambahan. Akar dan batang juga dapat menyimpan lipid untuk menyediakan sumber energi selama masa kekurangan nutrisi atau kondisi lingkungan yang tidak mendukung fotosintesis. Selama periode ketidakaktifan (musim dingin atau musim kering), lipid berfungsi sebagai sumber energi, atau ketika tanaman tidak dapat melakukan fotosintesis dengan efisien. Oksidasi lemak menghasilkan energi yang dibutuhkan untuk memenuhi kebutuhan dasar tanaman selama kondisi lingkungan yang tidak mendukung fotosintesis (N. Li et al., 2016).

Menurut (N. Li et al., 2016), lipid merupakan molekul organik yang penting dalam fisiologi tanaman, tempat akumulasi lipid dapat bervariasi antara jenis tanaman, dan beberapa tanaman dapat memiliki struktur khusus atau sel yang didedikasikan untuk menyimpan lipid. Lipid dalam tanaman memiliki peran utama sebagai sumber energi, penyimpanan energi, pembentukan membran sel, dan sebagai prekursor berbagai senyawa biologis.

Tempat akumulasi lipid disajikan sesuai dengan kategori utama lipid dalam tanaman (trigliserida, fosfolipid, dan sterol).

- Trigliserida (triacylglycerol), terakumulasi dalam bentuk minyak pada biji, buah, dan daun, fungsinya sebagai sumber utama penyimpanan energi dalam tanaman.
- Fosfolipid terutama ditemukan dalam membran sel tanaman, fungsinya membentuk struktur membran sel, berperan dalam transportasi molekul melalui membran.
- Sterol umumnya terdapat dalam membran sel, khususnya dalam sitoplasma. Fungsinya mempertahankan kestabilan membran sel dan sebagai prekursor senyawa lain seperti hormon.

Tempat akumulasi lipid dalam tanaman: 1) Biji tanaman merupakan tempat utama akumulasi trigliserida (minyak), sebagai sumber utama energi untuk pertumbuhan bibit ketika tumbuhan mulai tumbuh. 2) Buah mengandung lipid dalam bentuk minyak, yang dapat berperan dalam memberikan energi tambahan dan nutrisi bagi tanaman muda saat benih ditanam. 3) Beberapa tanaman menyimpan lipid dalam bentuk minyak dalam daun, terutama dalam sel-sel khusus yang disebut sel oleos. 4) Akar cenderung mengandung lebih sedikit lipid dibandingkan dengan biji atau buah, beberapa akar tanaman memiliki kapasitas untuk menyimpan lipid sebagai cadangan energi. 5) Kutikula, lapisan pelindung yang melapisi permukaan daun, dapat mengandung lapisan tipis lipid. Ini membantu dalam mencegah kehilangan air dan melindungi tanaman dari kondisi lingkungan yang keras (Benning, 2009).

## 9.4 Interaksi Lipid dengan Faktor Lingkungan

Interaksi lipid dengan faktor lingkungan merupakan aspek penting yang memengaruhi pertumbuhan, perkembangan, dan respons tumbuhan terhadap perubahan kondisi di sekitarnya. Lipid, yang meliputi berbagai molekul seperti fosfolipid, sterol, dan trigliserida, berpartisipasi dalam berbagai proses fisiologis dan menyediakan respons terhadap faktor lingkungan. Komposisi dan struktur lipid pada membran sel sangat memengaruhi permeabilitas, fleksibilitas, dan integritas membran. Faktor lingkungan (suhu, kelembaban, dan tekanan osmotik) dapat memengaruhi sifat fisik lipid membran, yang pada gilirannya mempengaruhi respons tumbuhan terhadap perubahan lingkungan (Singer et al., 2016).

Lipid terlibat dalam regulasi reaksi biokimia yang terjadi dalam tumbuhan sebagai respons terhadap stres lingkungan. Proses sinyal lipid, seperti pembentukan asam jasmonat atau fosfatidilinositol fosfat, dapat memediasi respons tumbuhan terhadap serangan patogen, kekeringan, atau suhu ekstrem. Penting untuk memahami interaksi lipid dengan faktor lingkungan karena hal ini dapat memberikan wawasan tentang mekanisme adaptasi tumbuhan terhadap kondisi yang berubah secara dinamis di lingkungannya. Studi mendalam tentang bagaimana lipid memainkan peran dalam merespons faktor lingkungan dapat membuka pintu untuk pengembangan strategi pertanian yang lebih efisien dan ketahanan tanaman terhadap stres lingkungan (Ali et al., 2018).

Dalam konteks fisiologi tanaman, perubahan lingkungan dapat signifikan memengaruhi kandungan lipid dalam jaringan tanaman. Faktor-faktor seperti suhu, kelembaban, cahaya, dan

keberadaan polutan dapat berdampak pada sintesis, akumulasi, dan komposisi lipid dalam sel-sel tanaman.

### 1) Suhu

Suhu merupakan faktor lingkungan yang paling signifikan memengaruhi kandungan lipid dalam tanaman. Perubahan suhu dapat mempengaruhi jenis dan konsentrasi lipid yang diproduksi oleh tanaman. Pada suhu yang berbeda, komposisi lipid dalam membran sel dapat berubah, yang pada gilirannya memengaruhi sifat fisik membran dan respons tumbuhan terhadap kondisi termal yang berubah. Suhu rendah, tanaman cenderung menghasilkan lebih banyak lipid jenuh untuk menjaga fleksibilitas membran (Singer et al., 2016).

### 2) Kelembaban

Tingkat kelembaban lingkungan memengaruhi produksi lipid dalam tanaman. Tumbuhan sering merespons kekeringan dengan meningkatkan sintesis lipid sebagai cadangan energi. Lipid berperan sebagai sumber energi yang penting dalam menanggapi stres kekeringan. Penyimpanan lipid dalam bentuk kantung minyak di dalam sel-sel tanaman dapat menjadi cadangan energi yang tersedia saat tumbuhan membutuhkannya selama kondisi kekeringan.

### 3) Cahaya

Intensitas cahaya dan durasi pencahayaan juga berperan dalam regulasi metabolisme lipid dalam tanaman. Cahaya matahari memainkan peran penting dalam fotosintesis, yang merupakan proses utama dalam pembentukan lipid dalam tanaman. Variasi dalam intensitas cahaya dan durasi

penyinaran dapat mempengaruhi laju fotosintesis dan produksi lipid. Intensitas cahaya berperan dalam regulasi metabolisme lipid, terutama dalam fotosintesis yang berkontribusi pada pembentukan lipid. Polutan lingkungan (ozon atau logam berat), dapat memicu respons tanaman yang mengubah metabolisme lipid sebagai upaya adaptasi terhadap stres polutan.

#### 4) Polusi Lingkungan

Polutan lingkungan seperti ozon, logam berat, atau senyawa kimia lainnya juga dapat memengaruhi metabolisme lipid dalam tanaman. Tanaman dapat merespons stres polutan dengan mengubah metabolisme lipid sebagai upaya adaptasi terhadap stres lingkungan yang disebabkan oleh polutan. Tanaman yang terpapar ozon dapat meningkatkan produksi lipid tertentu sebagai respons terhadap kerusakan yang disebabkan oleh ozon.

### **9.4.1 Perubahan Lingkungan terhadap Komposisi Lipid**

Lipid merupakan suatu komponen utama sel hidup dengan beragam fungsi, mulai sebagai membran penghalang fisik hingga komponen pemberi sinyal (Islam, et al., 2020). Tumbuhan merasakan rangsangan (tekanan/stres/cekaman) dari luar dan mentransduksi sinyal tersebut menjadi respons biologis, yang umumnya disebut sumber sinyal lipid. Sinyal biasanya dihasilkan dengan memodifikasi lipid oleh enzim seperti fosfolipase, lipid kinase atau fosfatase. Molekul pemberi sinyal terakumulasi secara sementara dan memiliki pergantian yang cepat. Lipid pemberi sinyal antara lain: asam fosfatidat (PA), fosfoinositida (PI),

sfingolipid, lisofosfolipid, oksilipin, N-asiletanolamin, dan asam lemak bebas (Hou et al., 2016).

Tanaman apabila menerima tekanan abiotik (contoh: suhu, garam, logam berat, kekeringan) dan biotik (contoh: hama, penyakit dan herbivora); maka tanaman mengubah komposisi dan fluiditas lipid membran. Mono galaktosil diasil gliserol (MGDG), di-galaktosil diasil gliserol (DGDG), rasio lipid jenuh, tak jenuh memainkan peran penting dalam kelangsungan hidup tanaman dan toleransi terhadap stres (Islam et al., 2020).

Temuan berbasis lipid, baru-baru ini menunjukkan peran yang lebih dari asam lemak dan produk turunannya dalam menginduksi/memodulasi berbagai aspek pertahanan tanaman (misalnya dalam merespon/melawan hama, penyakit); merespon stress oksidasi akibat polutan logam berat (Pretorius et al., 2021). Pengaturan sintesis asam lemak sangat penting untuk menjaga fungsi membran dan dianggap sebagai mekanisme adaptif bagi tanaman yang mengalami stres oksidatif (KISA & ÖZTÜRK, 2019). Sinyal berbasis lipid dan hubungannya dengan pertahanan tanaman terhadap tekanan mekanis, patogen, dan herbivora telah banyak diketahui selama beberapa tahun terakhir dan masih menjadi bidang yang semakin diminati. Kelompok turunan asam lemak oksilipin jelas memainkan peran penting sebagai sumber senyawa pemberi sinyal dalam reaksi stres abiotik dan biotik (Mithöfer et al., 2004).

Ketika tanaman menghadapi perubahan lingkungan, secara langsung atau tidak langsung akan merusak membran sel, sehingga pemeliharaan struktur lipid membran atau penyesuaian profil lipid sangat penting untuk adaptasi tanaman terhadap suatu

tekanan/stres/cekaman yang terjadi. Selain komponen struktural lipid membran, fosfolipid juga berfungsi sebagai molekul pemberi sinyal dalam berbagai situasi lingkungan yang merugikan. Asam lemak memiliki kontribusi yang luar biasa dalam kelangsungan hidup tanaman di bawah berbagai tekanan melalui remodeling fluiditas membran, menggunakan aktivitas lipase dan melepaskan asam alfa-linolenat (Islam et al., 2020).

Lipid merupakan molekul yang kaya energi, dan proses konversinya terjadi melalui metabolisme seluler, proses utama yang terlibat meliputi beta-oksidasi dan siklus asam sitrat. Proses penguraian lipid untuk memperoleh energi dalam tanaman melibatkan serangkaian reaksi biokimia yang dikenal sebagai beta-oksidasi.

### **1. Beta-oksidasi lipid**

Perubahan struktur lipid ini merupakan salah satu mekanisme penting dalam metabolisme energi tanaman. Beta-oksidasi adalah serangkaian reaksi biokimia yang terjadi dalam mitokondria sel untuk menguraikan asam lemak menjadi asetil-KoA, proses tersebut merupakan bagian dari metabolisme lipid, yang bertujuan untuk menghasilkan energi dari lemak. Tahapan dalam reaksi beta-oksidasi:

#### **1) Aktivasi asam lemak**

Asam lemak dalam bentuk ester dengan koenzim A (CoA) di sitoplasma, harus diaktifkan sebelum dapat masuk ke dalam mitokondria. Enzim Acyl-CoA synthetase mengaktifkan asam lemak dengan menambahkan molekul CoA, sehingga membentuk asil-CoA.

## 2) Transportasi Asil-CoA ke mitokondria

Asil-CoA tidak dapat menembus membran mitokondria sendiri, sehingga asil-CoA diangkut ke dalam mitokondria melalui proses transport yang melibatkan translokase asil-karnitin.

## 3) Beta-oksidasi

Setelah masuk ke mitokondria, asil-CoA mengalami serangkaian reaksi oksidatif yang disebut beta-oksidasi. Pada setiap siklus beta-oksidasi, dua atom karbon terlepas sebagai molekul asetil-KoA. Tahapan utama melibatkan pemotongan molekul asil-CoA oleh enzim enoyl-CoA hidratase, dehidrogenase enoyl-CoA, dan ketotiolase. Proses beta-oksidasi untuk mengoptimalkan penggunaan lemak sebagai sumber energi, terutama ketika pasokan glukosa terbatas.

## 4) Asetil-KoA

Proses beta-oksidasi menghasilkan satu molekul asetil-KoA, satu molekul NADH, dan satu molekul FADH<sub>2</sub> pada setiap siklus. Asetil-KoA dapat memasuki siklus asam sitrat (siklus Krebs) untuk menghasilkan lebih banyak energi melalui oksidasi lengkap.

## 5) Berlanjutnya siklus

Siklus tersebut terus berlanjut sampai seluruh rantai asam lemak terurai menjadi molekul asetil-KoA. Proses tersebut menghasilkan NADH dan FADH<sub>2</sub> yang kemudian akan digunakan dalam rantai transpor elektron untuk menghasilkan ATP (adenosin trifosfat).

## 2. Siklus asam sitrat

Siklus ini juga dikenal sebagai siklus Krebs atau siklus asam trikarboksilat. Siklus tersebut merupakan bagian dari metabolisme seluler yang terjadi dalam mitokondria, dan berperan penting dalam menghasilkan energi melalui oksidasi asetil-KoA menjadi karbon dioksida. Proses ini, juga dihasilkan molekul NADH dan FADH<sub>2</sub>, yang membawa elektron ke rantai transport elektron. Tahapan-tahapan dalam siklus asam sitrat:

### 1) Mulai proses

- Siklus asam sitrat dimulai dengan masuknya asetil-KoA ke dalam mitokondria, yang dihasilkan dari beta-oksidasi asam lemak atau degradasi asam amino.
- Asetil-KoA bergabung dengan oksaloasetat membentuk citrat, yang menjadi titik awal siklus.

### 2) Isokratik dekarboksilasi

- Citrat mengalami dekarboksilasi isokratik melalui enzim aconitase, menghasilkan isositrat.
- Isositrat kemudian mengalami dekarboksilasi melalui enzim isositrat dehidrogenase, menghasilkan  $\alpha$ -ketoglutarat dan CO<sub>2</sub>.

### 3) Dekarboksilasi $\alpha$ -ketoglutarat

- $\alpha$ -ketoglutarat mengalami dekarboksilasi oleh enzim  $\alpha$ -ketoglutarat dehidrogenase, menghasilkan CO<sub>2</sub> dan succinil-KoA.
- Proses tersebut juga menghasilkan satu molekul NADH sebagai produk samping.

#### 4) Siklus oksaloasetat

- Succinil-KoA bergabung dengan oksaloasetat melalui enzim sukkinil-KoA sintetase, menghasilkan sukkinat dan molekul ATP atau GTP.
- Sukkinat dioksidasi menjadi fumarat melalui enzim sukkinat dehidrogenase, yang juga menghasilkan satu molekul FADH<sub>2</sub>.
- Fumarat dihidrasi menjadi malat melalui enzim fumarase.
- Malat kemudian dioksidasi kembali menjadi oksaloasetat oleh enzim malat dehidrogenase, menghasilkan NADH.

#### 5) Regenerasi oksaloasetat

Oksaloasetat yang dihasilkan pada akhir siklus dapat digunakan kembali untuk menggabungkan dengan asetil-KoA pada langkah pertama, sehingga siklus dapat berlanjut.

Hasil akhir siklus asam sitrat dari satu putaran adalah tiga molekul NADH, satu molekul FADH<sub>2</sub>, satu molekul ATP/GTP, dan dua molekul CO<sub>2</sub>. Molekul-molekul tersebut kemudian akan digunakan dalam rantai transport elektron dan fosforilasi oksidatif untuk menghasilkan ATP, menjadikan siklus asam sitrat sebagai tahapan kunci dalam produksi energi seluler. Rantai transport elektron: NADH dan FADH<sub>2</sub> yang dihasilkan selama beta-oksidasi dan siklus asam sitrat membawa elektron ke dalam rantai transport elektron, yang

terletak di dalam membran mitokondria. Elektron ini bergerak melalui kompleks protein, melepaskan energi yang digunakan untuk memompa proton melintasi membran. Fosforilasi oksidatif: proton yang dipompa oleh rantai transport elektron menciptakan gradien elektrokimia melintasi membran mitokondria. Proton yang kembali melalui ATP synthase memproduksi ATP, merupakan bentuk utama energi sel (Zhou et al., 2014).

#### **9.4.2. Lipid dan Stres Lingkungan (abiotik dan biotik)**

Tanaman terus-menerus terkena tekanan yang disebabkan oleh lingkungan yang tidak menguntungkan; termasuk luka, serangan patogen, kekeringan, dingin, salinitas, paparan cahaya berlebihan, dan keterbatasan nutrisi. Tanaman mengenali tekanan lingkungan dan dengan cepat, dan merespon agar bertahan hidup terhadap suatu tekanan/stres. Pada saat yang sama, tanaman juga harus mengurangi kerusakan sel yang disebabkan oleh tekanan. Lipid merupakan konstituen seluler yang utama dan vital karena menyediakan dasar struktural untuk membran sel dan menyediakan cadangan energi untuk metabolisme. Pada beberapa tahun terakhir, semakin banyak bukti yang menunjukkan bahwa lipid terlibat tidak hanya dalam permulaan reaksi pertahanan sebagai mediator sinyal, tetapi juga dalam proses mitigasi respon terhadap stres. Perubahan iklim global secara signifikan mempengaruhi agronomi, terkait stres panas maupun kekeringan, sehingga pentingnya penelitian mengenai respon tanaman terhadap stres yang dimediasi oleh lipid menjadi lebih penting. Lipid pemberi sinyal terhadap stres meliputi berbagai kelas lipid, seperti: asam lemak, asam fosfatidat, diasilgliserol, oksilipin, sphingolipid, inositol fosfat, lisofosfolipid,

dan N-asiletanolamin. Lipid tersebut pada jaringan tanaman tersedia dalam jumlah kecil. Lipid tersebut dengan cepat disintesis dari lipid membran yang sudah ada sebelumnya atau zat antara biosintesis lipid membran. Selama proses, enzim hidrolitik seperti fosfolipase dan esterase sangat penting (Okazaki & Saito, 2014).

Asam fosfatidat dihasilkan secara cepat dan sebagai respons terhadap stres biotik dan abiotik pada tanaman, dan terlibat dalam respons stres osmotik yang disebabkan oleh dehidrasi, stres garam, respons terhadap stres suhu dan serangan patogen. Asam fosfatidat juga berperan besar dalam pertumbuhan dan perkembangan tanaman (mengatur pertumbuhan rambut akar dan dinamika sitoskeleton aktin (Hou et al., 2016).

Lipid, termasuk sphingolipid merupakan komponen struktural membran plasma dan sistem endomembran lainnya, dan merupakan konstituen seluler yang tidak dapat dihindari dalam transduksi sinyal dalam kondisi stres (Ali et al., 2018). Pada tanaman, terdapat berbagai jenis sphingolipid, seperti long chain base (LCB) fosfat, ceramide (N-asil LCB), glukosilceramida dan glikosil inositolfosfoceramida. Sphingolipid diketahui berperan dalam berbagai respons stres lingkungan. Perlu dicatat secara khusus bahwa sphingolipid merupakan komponen penting dalam regulasi kematian sel, dan meningkatkan respons hipersensitif yang disebabkan oleh patogen (Okazaki & Saito, 2014).

**Sphingolipid sinyal di bawah stres biotik.** Selama interaksi patogen-tanaman, lilin kutikula bertindak sebagai molekul pemberi sinyal atau menyediakan elicitor pathogen-associated molecular patterns/microbe-associated molecular patterns (PAMP/MAMP), yang dikenali oleh plasma membrane-resident pattern recognition

receptors (PRR). Pembentukan kompleks pathogen-associated molecular patterns/ microbe-associated molecular patterns - pattern recognition PAMP/MAMP-PR dapat memulai transduksi sinyal dengan mengaktifkan serine palmitoyl transferase (SPT), sehingga menghasilkan peningkatan kadar long-chain base (LCB). Secara bersamaan, pelepasan mikotoksin mikroba (terutama fumonisin B1/FB1) menghambat gen longevity assurance genes (LOH), sehingga mengakibatkan peningkatan kadar LCB dan terganggunya biosintesis ceramide. Peningkatan kadar LCB menghasilkan peningkatan kadar kalsium, yang mengaktifkan calcium-dependent protein kinase (CPK3). CPK3 memfosforilasi protein mitra pengikatnya 14-3-3 diikuti dengan disosiasi langsung dari kompleks. Protein 14-3-3 yang terfosforilasi mungkin mempunyai hubungan dengan produksi  $H_2O_2$ , dan merupakan salah satu aspek dari programmed cell death (PCD) PCD yang diinduksi LCB. Cara lain LCB menginduksi PCD adalah aktivasi Nicotinamide adenine dinucleotide phosphate (NADPH) oksidase dengan cara yang bergantung pada kalsium. Aktivasi NADPH oksidase menghasilkan produksi  $H_2O_2$ , yang mengarahkan sel menuju PCD (Ali et al., 2018).

**Sphingolipid sinyal di bawah stres abiotik.** Absisat acid/abscisic acid (ABA) dihasilkan sebagai respons terhadap kekeringan dan mengaktifkan phospholipase Da1 (PLDa1) untuk mensintesis phosphatidic acid (PA), yang kemudian mendorong aktivitas sphingosine kinase (SPHK) untuk menghasilkan fito-S1P (sphingosine-1-phosphate). PA dapat menurunkan regulasi Long-chain base phosphate lyase (LCBPL) dan long-chain base phosphate phosphatases (LCBPP) yang juga dapat mengaktifkan subunit protein G heterotrimerik, yang dapat mengakibatkan peningkatan

ion kalsium dalam sel penjaga. Peningkatan ion kalsium pada sel penjaga mengakibatkan penutupan stomata. PA juga dapat menginduksi pembentukan nitric oxide (NO), yang menjaga keseimbangan LCB/Cer (ceramide) dan LCBP/C1PP (ceramide-1-phosphate phosphatase) dengan mengatur ekspresi SPT/LOH dan LCBK/CerK (ceramide kinase). Ekspresi SPT dan LOH dapat menghasilkan pembentukan ROS, sinyal kalsium, dan aktivasi mitogen-activated protein kinase 6 (MPK6), yang dapat menginduksi jalur asam salisilat/salicylic acid (SA) yang menyebabkan kematian sel. Phyto-S1P, LCB terfosforilasi sebagai respons terhadap kekeringan, diproduksi oleh SPHK, sedangkan sebagai respons terhadap dingin diproduksi oleh long-chain base kinase (LCBK2). Phyto-S1P yang diinduksi dingin mengaktifkan ATMPK6, dan fenomena ini mengarah pada pembentukan akar. Selain itu, ceramide terfosforilasi yang diinduksi dingin membantu perkecambahan biji. ACBP3 bertanggung jawab untuk modulasi metabolisme VLCFA dan bertindak hilir MYB30 dalam pensinyalan hipoksia yang dimediasi VLCFA (Ali et al., 2018).

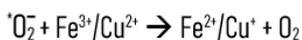
### **Stres logam berat**

Logam berat (non esensial: Pb, Cd, Cr, Hg, Ni, As, Sn,) dan esensial (dalam jumlah tertentu sangat dibutuhkan oleh organisme tanaman, manusia, hewan; namun dalam jumlah yang berlebihan dapat menimbulkan efek racun), contoh: Cu, Co, Fe, Zn, dan Mn. Kontaminasi logam berat pada lingkungan melalui aktivitas antropogenik dan/atau proses alami, menjadi masalah global yang serius. Logam berat di dalam tanah berada dalam berbagai bentuk (ion maupun senyawa kompleks), dan keduanya sangat berbeda kelarutan atau ketersediaanya bagi akar tanaman (Priyadi et al.,

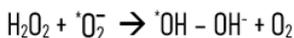
2018). Akumulasi logam berat yang berlebihan dalam jaringan tanaman merusak secara langsung atau tidak langsung beberapa fungsi biokimia, fisiologis, dan morfologis pada tanaman dan pada gilirannya mengganggu produktivitas tanaman. Pada tingkat seluler, logam berat memicu terbentuknya reactive oxygen species atau spesies oksigen reaktif (ROS) yang mengganggu keseimbangan redoks dan menyebabkan stres oksidatif (Anjum et al., 2015).

Spesies oksigen reaktif (ROS) seperti  $^*O_2^-$ ,  $H_2O_2$  dan  $^*OH$  umumnya dihasilkan dalam kondisi stres dan tekanan aktivitas oksidasi kuat yang dapat menyerang semua jenis biomolekul. Faktanya, spesies oksigen ini mewakili zat antara yang muncul selama reduksi berturut-turut  $O_2$  menjadi  $H_2O$ . Paparan ion logam berat tertentu terhadap tanaman, menggeser keseimbangan metabolisme radikal bebas menuju akumulasi  $H_2O_2$ . Adanya aktif redoks logam transisi seperti  $Cu^+$  dan  $Fe^{2+}$ ,  $H_2O_2$  dapat diubah menjadi  $^*OH$  yang sangat reaktif dalam reaksi yang dikatalisis logam melalui reaksi Fenton. Ion logam yang teroksidasi mengalami reduksi ulang pada reaksi selanjutnya dengan  $^*O_2^-$  (radikal superoksida). Mekanisme alternatif pembentukan OH langsung dari  $H_2O_2$  dan  $^*O_2^-$  adalah reaksi Haber-Weiss yang tidak bergantung pada logam. Berikut menurut (Mithöfer et al., 2004) disajikan reaksi kimia yang terlibat dalam pembentukan radikal hidroksil ( $OH$ ).

### Reaksi Fenton:



### Reaksi Haber-Weiss:



Molekul  $^*OH$  merupakan salah satu spesies paling reaktif yang diketahui, karena kemampuannya untuk memulai reaksi berantai radikal, molekul tersebut bertanggung jawab atas modifikasi kimia yang tidak dapat diubah pada berbagai komponen seluler. ROS lain yang terlibat dalam peroksidasi lipid adalah bentuk radikal superoksida terprotonasi, dan radikal hidroperoksil ( $^*O_2H$ ), spesies-spesies tersebut ada dalam keseimbangan.

Fatty acid (FA) atau asam lemak merupakan konstituen struktural utama membran plasma dan sangat sensitif terhadap stres logam berat (Kisa dan Oztruk, 2019). Wawasan terbaru tentang bagaimana modulator pertahanan tanaman disintesis dan dilepaskan menunjukkan bahwa free fatty acid (FFA) atau asam lemak bebas memiliki berfungsi sebagai mediator transduksi sinyal, menghasilkan sinyal intraseluler dan ekstraseluler. Dalam kondisi tanpa tekanan, komponen FFA umumnya terdapat dalam konsentrasi yang sangat rendah akibat konjugasi dengan molekul seperti gliserol, karbohidrat, dan gugus fosfat. Selain fungsi yang dijelaskan terkait dengan FFA, molekul lipid ini juga dapat ditargetkan untuk dimodifikasi untuk menghasilkan oksilipin (Pretorius et al., 2021).

Tingkat asam lemak bebas atau fatty acid (FA) meningkat dan polyunsaturated fatty acids (PUFA) atau asam lemak tak jenuh ganda dilepaskan dari membran oleh lipase sebagai respons terhadap stres. Jika terjadi ketidak-seimbangan antara sistem prooksidan/antioksidan, stres oksidatif akan merusak biomolekul seperti asam nukleat dan lipid. Keberadaan ROS menyebabkan fragmentasi lipid yang mengandung asam lemak tak jenuh ganda

menjadi beragam produk, terutama sebagai akibat adanya ion logam transisi. Lipid membran yang mengandung PUFA sensitif terhadap peroksidasi dan adanya logam tereduksi. Kandungan peroksidasi lipid dapat mengubah banyak proses metabolisme yang mempengaruhi derajat ketidakjenuhan asam lemak pada lipid (KISA & ÖZTÜRK, 2019).

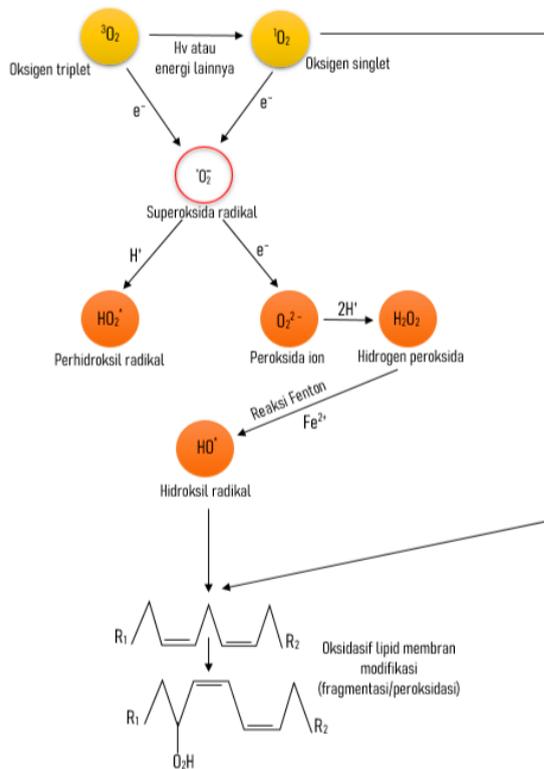
Komposisi asam lemak akibat paparan logam berat berubah, konsentrasi Cd, Cu dan Pb dalam daun tomat menentukan kandungan asam arakidat (20:0), asam behenat (22:0), asam lignoserat (24:0), asam docosaheptaenoic (22:6n3), asam linoleat (18:2n6), asam palmitoleat (16:1), asam  $\alpha$ -linolenat (18:3n3), asam palmitat (16:0), asam stearat (18:0) dan asam oleat metil ester (18:1n9c) yang berbeda. Konsentrasi logam berat pada suatu jaringan tanaman, mengubah kandungan asam lemak: asam  $\alpha$ -linoleat, asam palmitat, dan asam linoleat merupakan asam lemak utama, dan masing-masing memiliki proporsi yang tinggi, sedangkan asam arakidat, asam behenat, asam lignoserat, asam docosaheptaenoic, asam palmitoleat, asam stearat dan asam oleat metil ester memiliki persentase yang relatif rendah. Hasil riset menunjukkan kuantitas asam stearat dan asam oleat metil ester pada daun tomat yang terkontaminasi logam berat berubah tergantung pada jenis dan konsentrasi logam berat (KISA & ÖZTÜRK, 2019).

Komposisi asam lemak pada lipid membran berubah di bawah berbagai tekanan dan hal ini terutama terjadi melalui aktivitas desaturase asam lemak. Diketahui bahwa asam lemak 16:3 dan 18:3 merupakan asam lemak tak jenuh ganda utama, yang merupakan komponen utama lipid membran dan menentukan fluiditas membran. Pemeliharaan fluiditas membran sangat penting dalam menghadapi kesulitan lingkungan, dan distabilkan oleh asam lemak

tak jenuh di bawah berbagai tekanan, sehingga mengurangi kerusakan membran akibat efek berbahaya dari tekanan abiotik (Islam, et al., 2020). Tumbuhan melindungi dari pengaruh negatif logam berat dengan memodulasi komposisi lemak dari lipid membran yang berbeda. Triasil gliserol (TAGs), merupakan senyawa penting dalam penyimpanan lipid, dan phosphatidylcoline (PC) salah merupakan komponen utama lipid membran yang meningkat secara signifikan dalam sedimen yang terkontaminasi logam berat (Kühnlein, 2012).

Stres abiotik menyebabkan kelebihan produksi ROS pada tanaman, yang menyebabkan kerusakan pada lipid yang pada akhirnya mengakibatkan stres oksidatif. Paparan logam berat di lingkungan tanaman menyebabkan stres oksidatif, bertepatan dengan kendala transpor elektron plastidial dan mitokondria, yang meningkatkan peroksidasi lipid di kedua organ dan di seluruh sel. Logam berat dapat menjadi penginduksi kuat peroksidasi lipid pada tanaman, khususnya logam aktif redoks (Cu, Cr, dan Fe) dapat menyebabkan peroksidasi lipid melalui pembentukan ROS melalui siklus redoks. Paparan logam tidak aktif redoks (As, Cd, Co, Hg, Al, Ni, Pb, Se, Zn, dll.) menyebabkan gangguan signifikan pada komponen pertahanan (antioksidan dan enzim yang mengandung tiol), dan pada akhirnya menyebabkan peroksidasi lipid. Penelitian tentang peroksidasi lipid menunjukkan bahwa Cd menghasilkan perubahan kuat pada fungsi membran dengan menginduksi peroksidasi lipid dan gangguan metabolisme kloroplas dengan menghambat biosintesis klorofil dan mengurangi aktivitas enzim yang terlibat dalam fiksasi CO<sub>2</sub> (Gallego et al., 2012) (Gill et al., 2013). Peningkatan aktivitas lyxoxigenase (LOX) terjadi pada tanaman yang terpapar Cd. Peningkatan regulasi lyxoxigenase

(LOX) merupakan komponen penting dari respons stres akar barley (*Hordeum vulgare*) terhadap Cd. (Liptáková et al., 2013). Peningkatan aktivitas LOX yang diperoleh Cd dapat memediasi penghambatan pertumbuhan akar yang diinduksi Cd. Paparan Cd juga dapat menyebabkan peningkatan regulasi yang kuat pada tingkat transkripsi gen LOX1 sitosol (Anjum et al., 2015). Berikut disajikan konsep transfer energi ROS dan produk reaksinya (Gambar 2).



**Gambar 9. 2. Transfer reactive oxygen species (ROS) dan produk reaksinya, dan perannya dalam modifikasi oksidatif lipid pada tanaman.**

(Sabater & Martín, 2013) (Anjum et al., 2015).

Perubahan oksigen triplet menjadi oksigen singlet memerlukan energi ( $H\nu$ ). Proses ini terjadi melalui absorpsi foton atau energi cahaya.  $H\nu$  merupakan simbol energi foton yang digunakan untuk merangsang transisi elektronik, mengubah oksigen dari keadaan triplet menjadi singlet. Superoksida radikal biasanya dan merupakan ROS pertama yang dihasilkan. Hidroksil radikal merupakan ROS yang paling reaktif, karena tidak adanya enzim untuk metabolismenya, hidroksil radikal berlebih menyebabkan kematian sel. Oksigen singlet merupakan elektron tereksitasi pertama dari  $O_2$ , tidak berhubungan dengan transfer elektron ke  $O_2$ . Hidrogen peroksida ( $H_2O_2$ ) merupakan produk reduksi univalen dari superoksida radikal, keduanya terlibat dalam stres aklimasi/adaptasi dan kematian sel tanaman (Anjum et al., 2015).

### **Stres kekeringan**

Ketika tanaman terkena dehidrasi karena kekeringan, derajat desaturasi asam lemak menurun drastis (Pereyra et al., 2006). Telah dipelajari bahwa tingginya tingkat desaturasi asam lemak dari ekspresi desaturase  $\omega$ -3 menyebabkan peningkatan toleransi terhadap kekeringan atau tekanan osmotik pada tembakau. Analisis komposisi asam lemak lipid daun pada tanaman lobak (*Brassica napus*) yang mengalami cekaman kekeringan menunjukkan penurunan 18:3 terutama pada kloroplas monogalaktosil diasilgliserol (MGDG) dan penurunan 18:2 pada fraksi fosfolipid (Islam et al., 2020).

## **Stres panas**

Stres panas menyebabkan terganggunya membran lipid dua lapis yang berdampak negatif terhadap pertumbuhan dan perkembangan normal tanaman. Stres panas dapat mengubah komposisi endoplasmic reticulum (ER) dan lipid membran plasma seperti kandungan phosphotidyl ethanolamine (PE), sementara phosphotidyl serine (PS), dan phosphotidyl inositol (PI) menurun, sedangkan fosfolipid teroksidasi meningkat (Higasi dan Saito, 2019). Tolensi tanaman *Festuca arundinacea* terhadap panas tinggi, karena rasio monogalactosyl diacylglycerol (MGDG) dan di-galactosyl diacyl glycerol (DGDG) tinggi yang berperan memelihara fluiditas membran (Zhang et al., 2019). Menurut (Higashi & Saito, 2019) di bawah stres panas, tingkat fosfolipid yang mengandung asam lemak 16:0, 18:0 dan 18:1 meningkat dan asam lemak trienoat menurun. Pada kondisi stres panas enzim lipase berperan penting dalam mendegradasi lipid, dan remodeling MGDG dan phosphatidyl glycerol (PG).

Stres panas juga menyebabkan peningkatan triacylglycerol (TAG) dengan peningkatan kandungan asam lemak tak jenuh ganda dalam jaringan vegetatif tanaman *arabidopsis*. TAG secara substansial diperkaya dengan C18:3, perihal tersebut menunjukkan bahwa, tekanan panas mendorong penggunaan C18:3 sebagai substrat dalam biosintesis TAG. Hal ini merupakan pengamatan yang menarik mengingat adanya kecenderungan berkurangnya akumulasi asam lemak tak jenuh ganda dalam benih yang terkena suhu lebih tinggi (Singer et al., 2016).

## Stres biotik

Analisis lipidomik membran biologis mengungkapkan komposisi lipid membran akibat stres biotik (serangan patogen: jamur, bakteri, serangga, dll). Lilin, suberin, dan cutin merupakan asam lemak tak jenuh tunggal atau tak jenuh ganda rantai panjang yang bertindak sebagai asam lemak lini pertama dalam pertahanan terhadap agen infeksi (stres biotik) (Islam et al., 2020). Asam lemak rantai sangat panjang (Very Long Chain Fatty Acids/VLCFAs) dapat berperan dalam menginduksi kematian sel terprogram (programmed cell death/PCD) pada tanaman sebagai respons terhadap infeksi patogen. Proses ini merupakan salah mekanisme pertahanan tanaman terhadap infeksi patogen. VLCFAs merupakan komponen penting dari membran sel tanaman, pada saat terjadi infeksi patogen, produksi VLCFAs dapat meningkat sebagai bagian dari respons pertahanan tanaman. Asam lemak rantai sangat panjang menginduksi programmed cell death (PCD) pada infeksi patogen dan mencegah penyebaran infeksi melalui respons hipersensitif ((Zhukov & Shumskaya, 2020). Infeksi fusarium, mampu mengubah gliserolipid dan menunjukkan aktivitas enzim fosfolipase A dan tingginya kandungan asam jasmonat (Reyna et al., 2019).

Kadar asam oleat bebas (18:1) dalam membran kloroplas terlibat dalam mengatur respon pertahanan tanaman terhadap patogen, kematian sel dan systemic acquired resistance (SAR). Senyawa oxylipins, asam jasmonic disintesis dari asam linolenat tak jenuh (18:3), memainkan peran penting dalam respons terhadap tekanan biotik (Raffaele et al., 2009). Menurut (Hou et al., 2016) oksilipin adalah asam lemak teroksidasi yang terdiri dari kelompok molekul kompleks termasuk hidroperoksida asam lemak, divinil

eter, dan fitohormon asam jasmonat (JA). Pada tumbuhan, biosintesis oksilipin umumnya dimulai oleh lipoksigenase (LOXs) (misalnya jasmonat) atau  $\alpha$ -dioksigenase, yang mengoksidasi asam lemak tak jenuh 18-karbon, seperti asam linolenat atau asam linoleat. Oksilipin dapat disintesis secara enzimatik (misalnya JA dan divinil eter) atau dibentuk secara spontan melalui oksidasi otomatis (misalnya fitoprostano). Hidroperoksida asam lemak yang dihasilkan dapat berfungsi sebagai substrat untuk enzim yang berbeda, memisahkan jalur biosintesis menjadi cabang-cabang yang berbeda. Sementara allene oksida sintase (AOS) mengkatalisis jalur yang menghasilkan sinyal jasmonat, hidroperoksida lyase (HPL) menghasilkan zat mudah menguap yang terlibat dalam pertahanan patogen.

Menuru (Reyna et al., 2019) Pengaturan tingkat kejenuhan dan susunan gliserolipid penting bagi tanaman untuk menjaga integritas dan fluiditas membran sel dalam kondisi stres. Hasil riset menunjukkan, interaksi antara makrokonidia *Furarium graminearum* dan akar barlei menghasilkan perubahan signifikan pada komposisi spesies lipid diasil kelas ekstraplastid PC, PE, PI dan PA. Di sisi lain, spesies lipid yang mengandung dua rantai asil tak jenuh ganda, seperti PC, PE, dan PA 36:6 (yang merupakan kombinasi di18:3), tetap tidak berubah atau sedikit meningkat, dan hanya menurun pada lipid plastida seperti di-galactosyl diacyl glycerol (DGDG).

## **Stres dingin**

Tanaman tropis dan subtropis sensitif terhadap suhu rendah di bawah 10°C. Struktur kloroplas dan membran mitokondria pepaya terganggu akibat stres dingin (Chen et al., 2020). Lipid merupakan komponen paling penting dalam menjaga fungsi normal membran

sel pada suhu rendah dengan menjaga sifat fisik dan kimia membran. Lipid membran plasma ditandai dengan proporsi fosfolipid yang lebih tinggi dan jumlah glukokeribrosida yang lebih rendah pada kondisi stres dingin (Zhou et al., 2014). Ketidakhadiran lipid merupakan faktor penting yang memiliki respon indikatif terhadap stres dingin, asam lemak trienoat, asam heksadecatrienoat (16:3) dan asam linolenat (18:3) merupakan spesies asam lemak tak jenuh ganda utama yang terdapat dalam membran tanaman. Pemeliharaan semua kadar asam lemak tak jenuh ganda dalam kloroplas sangat penting khususnya di bawah stres dingin untuk menghindari cedera membran (Islam et al., 2020).

Jenis stres abiotik (suhu rendah) menyebabkan remodeling lipid membran, termasuk menyebabkan perubahan kandungan lipid netral. Hasil riset menunjukkan tanaman arabidopsis yang terkena suhu dingin/beku mengalami peningkatan kadar TAG di daunnya sebesar 7,5 kali lipat, dengan total 6% asam lemaknya berbentuk lipid netral. Peningkatan akumulasi TAG dalam kondisi ini merupakan hasil metabolik dari proses mobilisasi lipid membran kloroplas yang meminimalkan struktur tipe non-bilayer (Singer et al., 2016).

Peningkatan ketidakhadiran phospholipid (PL) memainkan peran penting terhadap toleransi dingin. Pada gandum hitam dan oat, peningkatan PL selama aklimatisasi dingin dikaitkan dengan peningkatan proporsi spesies phosphatidylcholine (PC) dan phosphatidylethanolamine (PE) tak jenuh ganda dan penurunan spesies tak jenuh tunggal. Membran plasma pada pepaya karena stres dingin, meningkatkan proporsi *di-unsaturated*: phosphatidylcholine (PC), phosphatidylinositol (PI) dan

phosphatidic acid (PA) juga peningkatan *mono-unsaturated*: phosphatidylglycerol (PG), PE, PI dan phosphatidylserine (PS), dan dikompensasi oleh penurunan *di-saturated* : PG, PC, PI dan PA. Perubahan tingkat ketidakjenuhan PL, akan bermanfaat bagi adaptasi pepaya terhadap suhu dingin (Chen et al., 2020).

## DAFTAR PUSTAKA

- Ali, U., Li, H., Wang, X., & Guo, L. (2018). Emerging Roles of Sphingolipid Signaling in Plant Response to Biotic and Abiotic Stresses. *Molecular Plant*, 11(11), 1328–1343. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2018.10.001>
- Anjum, N. A., Sofu, A., Scopa, A., Roychoudhury, A., Gill, S. S., Iqbal, M., Lukatkin, A. S., Pereira, E., Duarte, A. C., & Ahmad, I. (2015). Lipids and proteins—major targets of oxidative modifications in abiotic stressed plants. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(6), 4099–4121. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3917-1>
- Batsale, M., Bahammou, D., Fouillen, L., Mongrand, S., Joubès, J., & Domergue, F. (2021). Biosynthesis and functions of very-long-chain fatty acids in the responses of plants to abiotic and biotic stresses. *Cells*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/cells10061284>
- Benning, C. (2009). Mechanisms of lipid transport involved in organelle biogenesis in plant cells. *Annual Review of Cell and Developmental Biology*, 25, 71–91. <https://doi.org/10.1146/annurev.cellbio.042308.113414>
- Chandel, N. S. (2021). Lipid metabolism. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 13(9). <https://doi.org/10.1101/CSHPERSPECT.A040576>

- Chen, M., Liu, R., Huang, X., Du, Z., Heng, S., & Zeng, W. (2020). Characterization of low temperature-induced plasma membrane lipidome remodeling combined with gene expression analysis reveals mechanisms that regulate membrane lipid desaturation in *Carica papaya*. *Scientia Horticulturae*, 272(April), 109505. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109505>
- Ferrer, A., Altabella, T., Arró, M., & Boronat, A. (2017). Emerging roles for conjugated sterols in plants. *Progress in Lipid Research*, 67(June), 27–37. <https://doi.org/10.1016/j.plipres.2017.06.002>
- Flügge, U. I., Häusler, R. E., Ludewig, F., & Gierth, M. (2011). The role of transporters in supplying energy to plant plastids. *Journal of Experimental Botany*, 62(7), 2381–2392. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq361>
- Gallego, S. M., Pena, L. B., Barcia, R. A., Azpilicueta, C. E., Iannone, M. F., Rosales, E. P., Zawoznik, M. S., Groppa, M. D., & Benavides, M. P. (2012). Unravelling cadmium toxicity and tolerance in plants: Insight into regulatory mechanisms. *Environmental and Experimental Botany*, 83, 33–46. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.04.006>
- Gill, S. S., Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Macovei, A., & Tuteja, N. (2013). Importance of nitric oxide in cadmium stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 63, 254–261. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.12.001>
- Higashi, Y., & Saito, K. (2019). Lipidomic studies of membrane glycerolipids in plant leaves under heat stress. *Progress in Lipid Research*, 75, 100990. <https://doi.org/10.1016/j.plipres.2019.100990>

- Hou, Q., Ufer, G., & Bartels, D. (2016). Lipid signalling in plant responses to abiotic stress. *Plant Cell and Environment*, 39(5), 1029–1048. <https://doi.org/10.1111/pce.12666>
- Islam, Z., Paul, K., & Bhattacharjee, S. (2020). *Lipid chemistry in stress tolerance of plants*. December, 22–27.
- KISA, D., & ÖZTÜRK, L. (2019). Responses of the fatty acid composition of *Solanum lycopersicum* exposed to heavy metal stress. *Karaelmas Science and Engineering Journal*, 9(1), 88–96. <https://doi.org/10.7212/zkufbd.v9i1.1221>
- Kobayashi, K., Osawa, Y., Yoshihara, A., Shimojima, M., & Awai, K. (2020). Relationship Between Glycerolipids and Photosynthetic Components During Recovery of Thylakoid Membranes From Nitrogen Starvation-Induced Attenuation in *Synechocystis* sp. PCC 6803. *Frontiers in Plant Science*, 11(April), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00432>
- Kühnlein, R. P. (2012). Thematic review series: Lipid droplet synthesis and metabolism: From Yeast to man. Lipid droplet-based storage fat metabolism in *Drosophila*. *Journal of Lipid Research*, 53(8), 1430–1436. <https://doi.org/10.1194/jlr.R024299>
- LaBrant, E., Barnes, A. C., & Roston, R. L. (2018). Lipid transport required to make lipids of photosynthetic membranes. *Photosynthesis Research*, 138(3), 345–360. <https://doi.org/10.1007/s11120-018-0545-5>
- Li, J., Liu, L. N., Meng, Q., Fan, H., & Sui, N. (2020). The roles of chloroplast membrane lipids in abiotic stress responses. *Plant Signaling and Behavior*, 15(11). <https://doi.org/10.1080/15592324.2020.1807152>

- Li, N., Xu, C., Li-Beisson, Y., & Philippar, K. (2016). Fatty Acid and Lipid Transport in Plant Cells. *Trends in Plant Science*, 21(2), 145–158. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2015.10.011>
- Liptáková, Iubica, Huttová, J., Mistrík, I., & Tamás, L. (2013). Enhanced lipoxygenase activity is involved in the stress response but not in the harmful lipid peroxidation and cell death of short-term cadmium-treated barley root tip. *Journal of Plant Physiology*, 170(7), 646–652. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2012.12.007>
- Liu, N. J., Hou, L. P., Bao, J. J., Wang, L. J., & Chen, X. Y. (2021). Sphingolipid metabolism, transport, and functions in plants: Recent progress and future perspectives. *Plant Communications*, 2(5), 100214. <https://doi.org/10.1016/j.xplc.2021.100214>
- Lu, F., Rodriguez-Garcia, J., Van Damme, I., Westwood, N. J., Shaw, L., Robinson, J. S., Warren, G., Chatzifragkou, A., McQueen Mason, S., Gomez, L., Faas, L., Balcombe, K., Srinivasan, C., Picchioni, F., Hadley, P., & Charalampopoulos, D. (2018). Valorisation strategies for cocoa pod husk and its fractions. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 14, 80–88. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.07.007>
- Lu, J., Xu, Y., Wang, J., Singer, S. D., & Chen, G. (2020). The role of triacylglycerol in plant stress response. *Plants*, 9(4). <https://doi.org/10.3390/plants9040472>

- Mamode Cassim, A., Gouguet, P., Gronnier, J., Laurent, N., Germain, V., Grison, M., Boutté, Y., Gerbeau-Pissot, P., Simon-Plas, F., & Mongrand, S. (2019). Plant lipids: Key players of plasma membrane organization and function. *Progress in Lipid Research*, 73, 1–27. <https://doi.org/10.1016/j.plipres.2018.11.002>
- Maraschin, F. dos S., Kulcheski, F. R., Segatto, A. L. A., Trenez, T. S., Barrientos-Diaz, O., Margis-Pinheiro, M., Margis, R., & Turchetto-Zolet, A. C. (2019). Enzymes of glycerol-3-phosphate pathway in triacylglycerol synthesis in plants: Function, biotechnological application and evolution. *Progress in Lipid Research*, 73, 46–64. <https://doi.org/10.1016/j.plipres.2018.12.001>
- Mithöfer, A., Schulze, B., & Boland, W. (2004). Biotic and heavy metal stress response in plants: Evidence for common signals. *FEBS Letters*, 566(1–3), 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.febslet.2004.04.011>
- Nakamura, Y. (2017). Plant Phospholipid Diversity: Emerging Functions in Metabolism and Protein–Lipid Interactions. *Trends in Plant Science*, 22(12), 1027–1040. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2017.09.002>
- Nugroho, S. A., Wardana, R., Fatimah, T., Mastuti, L., & Novenda, I. L. (2022). Hidrolisis Lemak oleh Enzim Lipase pada Tanaman Jarak Pagar (*Jatropha curcas*). *Bioma : Jurnal Biologi Dan Pembelajaran Biologi*, 7(1), 81–89. <https://doi.org/10.32528/bioma.v7i1.7368>

- Okazaki, Y., & Saito, K. (2014). Roles of lipids as signaling molecules and mitigators during stress response in plants. *Plant Journal*, 79(4), 584–596. <https://doi.org/10.1111/tpj.12556>
- Pereyra, M. A., Zalazar, C. A., & Barassi, C. A. (2006). Root phospholipids in Azospirillum-inoculated wheat seedlings exposed to water stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 44(11–12), 873–879. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2006.10.020>
- Pretorius, C. J., Zeiss, D. R., & Dubery, I. A. (2021). The presence of oxygenated lipids in plant defense in response to biotic stress: a metabolomics appraisal. *Plant Signaling and Behavior*, 16(12). <https://doi.org/10.1080/15592324.2021.1989215>
- Priyadi Priyadi, Soelistijono, Setie Harieni, K. P. (2018). No Title. *Agritech*, 4, 456–462.
- Raffaele, S., Leger, A., & Roby, D. (2009). Very long chain fatty acid and lipid signaling in the response of plants to pathogens. *Plant Signaling and Behavior*, 4(2), 94–99. <https://doi.org/10.4161/psb.4.2.7580>
- Reszczyńska, E., & Hanaka, A. (2020). Lipids Composition in Plant Membranes. *Cell Biochemistry and Biophysics*, 78(4), 401–414. <https://doi.org/10.1007/s12013-020-00947-w>
- Reyna, M., Peppino Margutti, M., & Villasuso, A. L. (2019). Lipid profiling of barley root in interaction with Fusarium macroconidia. *Environmental and Experimental Botany*, 166(May), 103788. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.06.001>

- Sabater, B., & Martín, M. (2013). Hypothesis: Increase of the ratio singlet oxygen plus superoxide radical to hydrogen peroxide changes stress defense response to programmed leaf death. *Frontiers in Plant Science*, 4(NOV), 1–8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00479>
- Singer, S. D., Zou, J., & Weselake, R. J. (2016). Abiotic factors influence plant storage lipid accumulation and composition. *Plant Science*, 243, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2015.11.003>
- Singh, S. P., Zhou, X. R., Liu, Q., Stymne, S., & Green, A. G. (2005). Metabolic engineering of new fatty acids in plants. *Current Opinion in Plant Biology*, 8(2), 197–203. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2005.01.012>
- Steimle, A., Autenrieth, I. B., & Frick, J. S. (2016). Structure and function: Lipid A modifications in commensals and pathogens. *International Journal of Medical Microbiology*, 306(5), 290–301. <https://doi.org/10.1016/j.ijmm.2016.03.001>
- Subroto, E., Indiarito, R., Wulandari, E., & Azimah, H. N. (2021). Oil to glycerol ratio in enzymatic and chemical glycerolysis for the production of mono- And diacylglycerol. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 69(8), 117–125. <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V69I8P215>
- Topçu, G., Öztürk, M., Kuşman, T., Demirkoz, A. A. B., Kolak, U., & Ulubelen, A. (2013). Terpenoids, essential oil composition, fatty acid profile, and biological activities of Anatolian *Salvia fruticosa* Mill. *Turkish Journal of Chemistry*, 37(4), 619–632. <https://doi.org/10.3906/kim-1303-25>

- Turnbull, D., & Hemsley, P. A. (2017). Fats and function: protein lipid modifications in plant cell signalling. *Current Opinion in Plant Biology*, 40, 63–70. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2017.07.007>
- Zhang, X., Xu, Y., & Huang, B. (2019). Lipidomic reprogramming associated with drought stress priming-enhanced heat tolerance in tall fescue (*Festuca arundinacea*). *Plant Cell and Environment*, 42(3), 947–958. <https://doi.org/10.1111/pce.13405>
- Zhou, Y., Pan, X., Qu, H., & Underhill, S. J. R. (2014). Low temperature alters plasma membrane lipid composition and ATPase activity of pineapple fruit during blackheart development. *Journal of Bioenergetics and Biomembranes*, 46(1), 59–69. <https://doi.org/10.1007/s10863-013-9538-4>
- Zhukov, A. V., & Shumskaya, M. (2020). Very-long-chain fatty acids (VLCFAs) in plant response to stress. *Functional Plant Biology*, 47(8), 695–703. <https://doi.org/10.1071/FP19100>



# **BAB 10**

## **PERTUMBUHAN DAN PERKEMBANGAN**

Oleh Jumaria Nasution

### **10.1 Jenis Pertumbuhan dan Perkembangan Tanaman**

Tanaman merupakan salah mahluk hidup yang memiliki ciri-ciri tertentu, seperti kemampuan membuat makanan sendiri , menyerap nutrisi dari luar (lingkungan) berespirasi, melakukan sintesis, tumbuh dan berkembang. Pertumbuhan dan perkembangan merupakan perubahan yang terjadi pada tanaman dalam satu siklus yang bersamaan pada fase siklus hidup tanaman tetapi memiliki kaitan yang erat antara keduanya.

Pertumbuhan mengacu pada perubahan biologis yang terjadi pada setiap mahluk hidup, yang terdiri dari perubahan volume, suhu, dan massa yang tidak dapat diubah. Pertumbuhan memiliki kemampuan untuk diukur secara kuantitatif dalam satu panjang dan satu ukuran berat.

Perkembangan merupakan differensiasi dan spesialisasi sel proses menuju tercapainya tahap kedewasaan. Perkembangan tidak dapat dhitung, tetapi dapat dinyatakan secara kuantitatif. Berasal dari bidang anatomi dan fisiologi, diferensiasi adalah proses yang mengarah pada spesialisasi suatu fungsi. Tahapan pertumbuhan

tanaman ditandai dengan juvenilitas, pendewasaan, dan perkecambahan. Pada usia beberapa bulan, sebelum memasuki tahap berikutnya, tanaman akan mengalami dormansi.

Pertumbuhan tanaman dapat dibedakan menjadi dua, yaitu pertumbuhan primer dan pertumbuhan sekunder, yang keduanya berasal dari jaringan meristem yang memiliki sifat pembelahan aktif. Pertumbuhan primer berasal dari meristem primer dan pertumbuhan sekunder berasal dari meristem sekunder.

### **10.1.1 Pertumbuhan primer**

Pertumbuhan primer adalah pertumbuhan yang terjadi karena aktivitas meristem primer, juga dikenal sebagai meristem apikal. Titik pertumbuhan primer terbentuk ketika tanaman masih dalam tahap embrionik. Jaringan meristem ini ditemukan di ujung batang dan akar. Berkat pertumbuhan ini, akar dan batang tanaman bertambah panjang. Pada saat pertumbuhan, pertumbuhan terjadi secara bertahap. Oleh karena itu, zona pertumbuhan dapat dibagi menjadi tiga zona, yaitu zona pembagian, zona perpanjangan dan differensi.

Zona pembelahan ada di ujung. Di daerah ini, sel-sel baru terus diproduksi melalui proses pembelahan sel. Wilayah ini disebut wilayah meristem. Zona perpanjangan terletak di belakang zona pembelahan. Di area ini, sel akan tumbuh karena pembelahan, sehingga ukuran sel juga meningkat. Akibatnya, wilayah ini mengalami elongasi, sedangkan wilayah diferensiasi terletak di belakang wilayah elongasi. Sel yang dikembangkan mengalami perubahan bentuk dan fungsi. Beberapa sel mengalami differensiasi

### **10.1.2 Pertumbuhan sekunder**

Pertumbuhan sekunder disebabkan oleh aktivitas meristem sekunder seperti yang ada di batang dikotil dan gymnospermae. Semakin tua tanaman, semakin besar batang tanaman dikotil. Pertumbuhan sekunder ini tidak terjadi pada monokotil. Bagian yang memainkan peran paling penting dalam perkembangan sekunder ini adalah kambium. Sel-sel kambium selalu membelah, terutama ke dalam untuk membentuk xilem atau kayu, dan mereka membelah ke luar untuk membentuk floem atau kulit kayu, yang menyebabkan peningkatan diameter kambium. kayu, batang dan akar. Kambium dalam posisi ini disebut kambium intravaskular. Sel parenkim yang ditemukan di antara pembuluh berubah menjadi kambium.

## **10.2 Tahap pertumbuhan dan perkembangan**

Pertumbuhan dan perkembangan tanaman dimulai pada tahap benih berkecambah. Tunas kemudian tumbuh menjadi tanaman kecil yang sempurna. Setelah mencapai ukuran dan umur tertentu, tanaman akan tumbuh membentuk bunga, buah atau biji sebagai alat reproduksi.

Pertumbuhan dan perkembangan tanaman dapat dibagi menjadi dua fase perkecambahan dan fase perkembangan

### **10.2.1 Pada fase perkecambahan**

Proses yang terjadi pada fase perkecambahan adalah:

1. Biji melalui tahap imbibisi masuk air ke dalam sel biji sehingga membuat sel lunak

2. Pada waktu air masuk kedalam sel biji mengakibatkan aktifnya enzim sehingga menyebabkan aktifnya reaksi kimia
3. Reaksi kimia yang mengaktifkan enzim akan mengaktifkan metabolisme di dalam biji dengan mensintesis cadangan makanan sebagai persediaan cadangan makanan pada saat perkecambahan berlangsung.

### **10.2.2 Perkecambahan**

Perkecambahan adalah munculnya bibit (tanaman kecil) dari biji, sebagai akibat dari pertumbuhan dan perkembangan embrio. Proses perkecambahan yang terjadi pada biji adalah:

1. Proses fisika

Proses ini terjadi ketika benih menyerap air (menyerap air), karena rendahnya kapasitas penyerapan air biji kering.

2. Proses kimia

Air yang masuk memicu embrio untuk melepaskan hormon giberelin. Hormon ini akan mendorong aleuron untuk menyintesis dan mengeluarkan enzim. Enzim bekerja dengan menghidrolisis cadangan makanan di endosperma. Enzim amilase menghidrolisis pati dalam endosperma menjadi glukosa. Glukosa ini diperlukan untuk perkembangan embrio menjadi benih tanaman dengan menyintesis cadangan makanan sebagai persediaan cadangan makanan pada saat perkecambahan berlangsung.

## 10.3 Faktor Perkembangan Tanaman

Pengaruh lingkungan terhadap pertumbuhan tanaman dapat dibedakan menjadi dua faktor, yaitu lingkungan dan genetika. Lingkungan tumbuh tanaman itu sendiri dapat dikelompokkan menjadi lingkungan biotik (tanaman lain, hama, penyakit dan manusia) dan lingkungan abiotik (tanah dan iklim). Penjelasan faktor-faktor ini dapat diringkas sebagai berikut:

### 1. Faktor internal

Faktor yang mempengaruhi pertumbuhan tanaman adalah genetik, enzim dan hormone:

#### 1. Genetik

Gen merupakan substansi pembawa sifat yang diturunkan dari induk ke generasi selanjutnya. Gen mempengaruhi ciri dan sifat makhluk hidup dimana pada tanaman mempengaruhi bentuk tubuh, warna bunga, dan rasa buah. Gen juga menentukan kemampuan metabolisme sehingga sangat mempengaruhi pertumbuhan dan perkembangan tanaman tersebut. Meskipun faktor dari gen sangat penting, namun faktor ini bukan satu-satunya yang menentukan pola pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Lingkungan juga mempengaruhi misalnya kondisi tanah yang tidak memungkinkan mempengaruhi pertumbuhan dan perkembangan.

#### 2. Hormon

Hormon merupakan zat yang berperan dalam mengendalikan berbagai fungsi di dalam tubuh. Meskipun jumlahnya sedikit, hormon memberikan pengaruh nyata dalam pengaturan berbagai proses dalam

tubuh. Hormon yang mempengaruhi pertumbuhan dan perkembangan pada tanaman ada beragam jenisnya.

- 1) Auksin, berperan untuk memacu proses pemanjangan, pembelahan, dan diferensiasi sel. Auksin banyak diproduksi di jaringan meristem, baik pada ujung batang maupun ujung akar. Auksin yang dihasilkan pada ujung batang akan mendominasi pertumbuhan batang utama, sehingga pertumbuhan cabang relative sedikit. Keadaan ini dikenal dengan istilah dominansi apical (apical dominance). Dengan memotong ujung batang, dominansi apical akan hilang, sehingga pertumbuhan cabang-cabang batang akan berjalan dengan baik. Auksin dapat terurai bila terkena cahaya. Bila suatu koleoptil dikenai cahaya dari samping sedikit. Keadaan ini dikenal dengan istilah dominansi apical (apical dominance). Dengan memotong ujung batang, dominansi apical akan hilang, sehingga batang akan berjalan dengan baik.
  
- 2) Giberelin Fungsi hormon giberelin pada tumbuhan adalah perkecambahan biji, pemanjangan batang, dan akar tumbuhan. Giberelin memacu terbentuknya enzim hidrolase yang dapat menguraikan bahan cadangan makanan pada biji untuk pertumbuhan kecambah. Adanya pengaruh nyata giberelin dan temperatur terhadap jumlah daun mungkin berhubungan dengan kerja hormon lain seperti auxin. Dengan tersintesisnya IAA pada

meristem apikal pucuk yang padanya terdapat primordia daun, akan memacu terbentuknya daun. Hormon auksin dari jenis indole acetic acid (IAA) berperan dalam menginduksi partenokarpi. Selain itu, auksin dari jenis IAA berperan dalam menginduksi pembesaran sel, pertumbuhan sel, pertumbuhan tanaman, perkembangan buah, serta menunda proses kematangan buah (Sinha, 2004)

- 3) Etilen, berperan untuk pematangan buah dan perontokan daun. Etilen merupakan senyawa hidrokarbon tidak jenuh ( $C_2H_4$ ) yang pada tumbuhan ditemukan dalam fase gas, sehingga disebut juga gas etilen. Gas etilen tidak berwarna dan mudah menguap pada suhu kamar (Sinha, 2014). Menurut Nazar et al. (2014), etilen yang dihasilkan oleh tanaman memiliki peran ganda dalam mengontrol pertumbuhan sekaligus penuaan pada tanaman. Proses pematangan buah dapat ditekan melalui pengendalian produksi etilen maupun sensitivitas tanaman terhadap etilen. Sletr1-2 merupakan domain transmembran kedua dari gen reseptor etilen (SLETR1) yang memiliki efek meminimalkan laju etilen sehingga umur simpan meningkat.
- 4) Sitokinin, berperan untuk pembelahan sel atau sitokenesis, seperti merangsang pembentukan akar dan cabang tanaman.

- 5) Asam absisat, berperan untuk proses penuaan dan gugurnya daun. asam absisat juga merupakan hormon penghambat pertumbuhan pada tanaman yang sering terdapat pada proses perkecambahan, dan pertumbuhan. Di dalam ubi kentang, asam absisat merupakan inhibitor yang mempunyai fungsi berlawanan dengan zat pengatur tumbuh, yaitu auksin, sitokinin, dan giberelin (Abidin, 1985). Aplikasi sitokinin pada ubi kentang dapat menurunkan kandungan ABA pada mata tunas sehingga mematahkan dormansi.

## 2. Faktor eksternal

- a. Makanan merupakan bahan baku dan sumber energi dalam proses metabolisme tubuh. Kualitas dan kuantitas makanan akan memengaruhi pertumbuhan dan perkembangan makhluk hidup. Sedangkan bagi tumbuhan, nutrisi yang diperlukan berupa air dan zat hara yang terlarut dalam air. Melalui proses fotosintesis, air dan karbon dioksida diubah menjadi zat makanan. Zat hara tidak berperan langsung dalam proses fotosintesis, namun sangat diperlukan agar tanaman dapat tumbuh dan berkembang dengan baik.
- b. cahaya memengaruhi pertumbuhan melalui intensitas, kualitas dan lama penyinaran.
- c. Suhu  
Suhu memiliki pengaruh nyata terhadap pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Contohnya pada padi yang ditanam pada awal musim kemarau dimana suhu rata-

rata tinggi akan lebih cepat dipanen daripada padi yang ditanam pada musim penghujan dimana suhu rata-rata lebih rendah. Hal ini disebabkan karena semua proses dalam pertumbuhan dan perkembangan seperti penyerapan air, fotosintesis, penguapan, dan pernapasan pada tanaman dipengaruhi oleh suhu

d. Tanah

Tanah berpengaruh terhadap pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Tanaman akan tumbuh dan berkembang dengan optimal bila kondisi tanah tempat hidupnya sesuai dengan kebutuhan nutrisi dan unsur hara. Kondisi tanah ditentukan oleh faktor lingkungan lain, misalnya suhu, kandungan mineral, air, dan derajat keasaman atau pH.

e. Hara dan air

Hara dan air memegang peran penting dalam pertumbuhan dan perkembangan tanaman untuk membangun tubuh pada makhluk hidup termasuk tanaman. unsur utama dalam proses fotosintesis yang akan menjadi makanan. Hara dapat dibagi menjadi dua hara makro dan mikro. Nutrisi yang tergolong pada unsur hara makro adalah Carbon, Oksigen, Sulfur, Fosfor, Kalium, Kalsium sedangkan hara mikro Boron, Mangan, Zink, Molibdenum, Tembaga dan Klor. Misalnya Nitrogen merangsang pertumbuhan vegetative, anakan, bahan utama penyusun klorofil. P (Phosfor) peranannya Memacu pertumbuhan akar, Mempercepat pembungaan dan pemasakan biji/buah, Meningkatkan prosesntase bungan menjadi

buah, Sebagai bahan penyusun inti sel dan protein. (Kalium) ). Fungsinya Mempercepat proses fotosintese, Membantu pembentukan protein dan karbohidrat, mempercepat pertumbuhan jaringan meristematik dan masih banyak jenis unsur hara makro dan fungsinya. Dan berbagai jenis contoh unsur hara mikro dan contohnya Boron memiliki kaitan erat dengan proses pembentukan, pembelahan dan diferensiasi, dan pembagian tugas sel. Hal ini terkait dengan perannya dalam sintesis RNA, bahan dasar pembentukan sel. Fungsi penting tembaga adalah aktivator dan membawa beberapa enzim. Dia juga berperan membantu kelancaran proses fotosintesis. Pembentuk klorofil, dan berperan dalam fungsi reproduksi.

## DAFTAR PUSTAKA

- Gardner F. P., R. B. Pearce, and R. L. Mitchell, 1985. *Physiology of Crop Plants*. Iowa State University.
- Campbell NA, dkk. 2000. *Biologi*. Edisi Kelima. Jilid 1. Jakarta: Erlangga.
- Singh, R. K., and B. D. Chaudhary, 1979. *Biometrical methodes in quantitative genetic analysis*. Kalyani Pub. Ludhiana, New Dehli.
- Kępczyński, J., Bihun, M., and Kępczyńska, E. 2006. Implication of Ethylene in the Release of Secondary Dormancy in *Amaranthus caudatus* L. Seeds by Gibberellins or Cytokinin. *Journals of Plant Growth Regulation*,
- Sinha, R.K. 2004. *Modern plant physiology*. Boca Raton: CRC Press. 462-477.



# **BAB 11**

## **HORMON DAN ZAT PENGATUR TUMBUH PADA TUMBUHAN**

Oleh Novi Yulanda Sari

### **11.1 Pengertian Hormon dan Zat Pengatur Tumbuh (ZPT)**

Hormon adalah senyawa organik yang disintesis atau diproduksi di salah satu bagian tubuh tumbuhan, ditranslokasikan ke bagian tumbuhan lainnya dan dalam konsentrasi kecil dapat memberikan respon fisiologis secara efektif terhadap sel atau organ tanaman (Fauziah, 2021). Respon fisiologis yang ditimbulkan tersebut dapat bersifat memacu, namun ada juga yang bersifat menghambat pertumbuhan dan perkembangan tanaman (Asra *et al.*, 2020), baik pada bagian yang mensintesis hormon maupun bagian tumbuhan lainnya yang ditranslokasi (Fauziah, 2021).

Berbedanya tanggapan fisiologis tanaman terhadap hormon sangat dipengaruhi oleh faktor jenis tumbuhan, letak aksi hormon pada bagian tubuh tumbuhan, fase perkembangan tumbuhan, konsentrasi hormon, interaksi antar hormon di dalam tumbuhan, musim dan kondisi lingkungan tumbuh (Asra *et al.*, 2020, Wiraatmaja, 2017). Agar dapat memberikan respon fisiologis yang baik, ketersediaan hormon di dalam tubuh tumbuhan harus cukup

ketersediaanya, berada di dalam sel yang tepat, mampu dikenali dan diikat oleh sel sasaran sehingga terjadi perubahan metabolik (Fauziah, 2021).

Dalam kajian hormon tumbuhan, juga dikenal beberapa istilah yang sering digunakan diantaranya yaitu (Asra *et all.*, 2020):

1. *Fitohormon* (hormon tumbuhan) adalah senyawa organik non nutrisi yang disintesis pada bagian tertentu tumbuhan dan ditranslokasikan ke bagian tubuh tumbuhan lainnya yang dapat memberikan respon baik secara fisiologis, morfologis maupun biokimia pada bagian tubuh tumbuhan yang ditranslokasikan dan senyawa ini aktif dalam jumlah kecil (<1mM tergantung jenis tanaman).
2. *Plant growth regulator* (zat pengatur tumbuh) adalah senyawa organik dalam bentuk non-nutrisi yang aktif dalam konsentrasi rendah (<1mM tergantung jenis tanaman) yang dapat merangsang maupun menghambat pertumbuhan dan perkembangan tanaman secara kualitatif.
3. Inhibitor adalah senyawa organik yang cenderung menghambat pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan pada konsentrasi berapapun (Taiz & Zenger, 2006).

## **11.2 Perbedaan Hormon dan Zat Pengatur Tumbuh**

Proses pertumbuhan dan perkembangan tanaman tidak terlepas dari rangkaian proses pembelahan, pemanjangan dan diferensiasi sel. Ketiga proses tersebut dipicu oleh faktor internal dari dalam tubuh tumbuhan berupa hormon dan enzim (Asra *et all.*, 2020). Senyawa organik baik berupa hormon maupun zat pengatur tumbuh sangat berpengaruh terhadap pertumbuhan dan

perkembangan tanaman. Kedua senyawa ini turut berperan sebagai pengendali pertumbuhan tanaman selain kandungan nutrisi tanaman seperti karbohidrat, protein dan lemak.

Hormon merupakan senyawa organik yang bersifat endogen karena terbentuk secara alami dan disintesis di salah satu bagian tubuh tumbuhan yang kemudian ditranslokasikan ke bagian tubuh tumbuhan lainnya untuk merangsang atau menghalangi proses diferensiasi sel pada tubuh tumbuhan. Sintesis hormon pada tubuh tumbuhan dirangsang oleh kondisi lingkungan tumbuh sebagai proses adaptasi dan mempertahankan diri demi kelangsungan hidupnya. Hormon juga berfungsi sebagai prekursor dan bagian dari proses regulatik genetik pada tubuh tumbuhan serta sebagai messenger kimia dalam tubuh tumbuhan sehingga sel-sel tumbuhan dapat berkomunikasi satu dengan yang lainnya (Fauziah, 2021).

Sebagai penyampai pesan antar sel, hormon akan mengontrol dan mengatur siklus hidup tumbuhan mulai dari fase perkecambahan, perakaran, pembungaan hingga pembuahan. Sintesa dan translokasi hormon dalam tubuh tumbuhan juga bentuk respon dari tubuh tumbuhan terhadap berbagai faktor lingkungan seperti defisiensi dan toksisitas hara, cekaman kekeringan, intensitas cahaya yang tinggi, suhu dan berbagai stress biotik dan abiotik lainnya (Wiraatmaja, 2017).

Berbeda dengan hormon, zat pengatur tumbuh dapat diproduksi sendiri oleh tubuh tumbuhan (endogen) dan dapat juga di buat secara sintetik di luar tubuh tumbuhan (eksogen) oleh ahli kimia tertentu. Dalam jumlah sedikit, ZPT sudah mampu mempengaruhi, merangsang maupun menghambat sel target untuk

membelah maupun memanjang serta mempengaruhi proses metabolisme dan perkembangan sel-sel target.

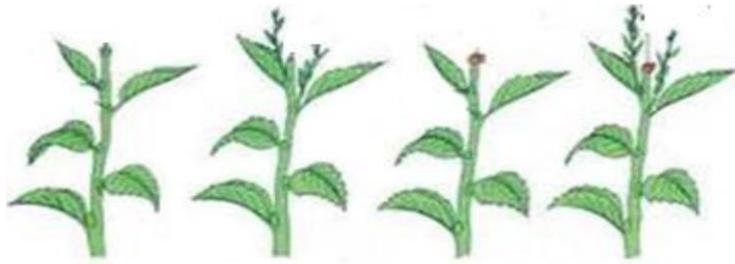
Berdasarkan penjelasan tersebut diatas, maka dapat disimpulkan bahwa hormon dibentuk atau disintesis di dalam tubuh tumbuhan, ditranslokasikan ke bagian tubuh tumbuhan lainnya yang berbeda dari tempat sintesisnya dan dalam konsentrasi sangat rendah dapat memberikan respon secara efektif terhadap pertumbuhan dan perkembangan tanaman.

### **11.3 Macam-macam Hormon dan Zat Pengatur Tumbuh**

Secara umum, dikenal lima aktivator (promoter) atau pemicu pertumbuhan dan perkembangan tanaman, yaitu auksin, sitokinin, gibberalin, dan etilen, dan satu inhibitor (penghambat) pertumbuhan dan perkembangan tanaman yaitu asam absisat (ABA).

#### **1. Auksin**

Auksin merupakan hormon tumbuhan pertama yang ditemukan pada tanaman. Auksin disintesis di bagian organ pertumbuhan aktif (meristematik) tanaman monokotil dan dikotil seperti bagian pucuk, tunas ujung atau kuncup daun, titik tumbuh batang, ujung akar (koleoptil), daun muda, kuncup bunga (saat pembentukan bunga) serta biji dan buah yang sedang berkembang (Taiz & Zaiger, 2002; Asra, *et al.*, 2020).



**Gambar 11. 1. Bagian meristem apikal (ujung tanaman) sebagai tempat sintesisnya hormon auksin (Asra *et al.*, 2020).**

Tumbuhan memproduksi auksin alami seperti IAA (Indol acetic acid), PAA (Phenylacetic acid), 4-chloroIAA (4-chloroindole acetic acid) dan IBA (indolebutyric acid). Dari keempat senyawa tersebut, IAA merupakan auksin utama pada tumbuhan yang berperan dalam pembelahan, pembesaran dan diferensiasi sel serta jaringan dan merespon gravitasi dan cahaya.

Ketersediaan IAA dalam tubuh tanaman sangat dipengaruhi oleh fase pertumbuhan tanaman, tipe dan umur jaringan. Ketersediaan IAA dalam jaringan vegetatif berkisar 1-100  $\mu\text{g}$ , lebih rendah daripada organ biji. Konsentrasi IAA yang tinggi pada biji dapat membantu biji untuk berkecambah (Hopkins, 2008). Konsentrasi IAA yang rendah ( $<10^{-5}$  g/l) pada akar akan memacu pemanjangan sel-sel akar dan sebaliknya, konsentrasi IAA yang tinggi akan menghambat pemanjangan sel-sel akar.

Secara umum, translokasi hormon auksin didalam tubuh tumbuhan dapat terjadi melalui dua cara, yaitu secara polar melalui batang (pergerakan dari tunas ujung atau pucuk

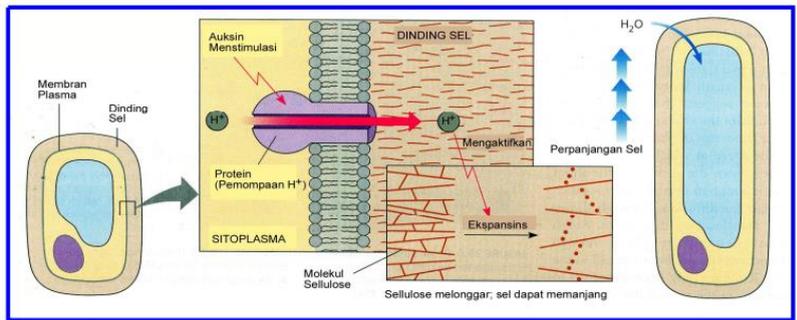
menuju bagian tanaman bawah yang memerlukan energi dari hasil metabolisme) dan secara nonpolar (pengangkutan hormon kesemua organ tanaman terutama pada tanaman yang telah tua (mengalami *senescence*). Respon sel target tanaman terhadap pemberian auksin juga sangat bergantung pada konsentrasi pemberiannya (konsentrasi  $10^{-8}$  M sampai  $10^{-3}$  M). Semakin tinggi konsentrasi auksin yang diberikan, semakin menghambat proses pemanjangan sel, karena auksin bisa menghasilkan senyawa-senyawa inhibitor seperti etilen yang dapat menghambat pemanjangan sel (Asra *et al.*, 2020).

### **Fungsi Hormon Auksin**

Hormon auksin memiliki beberapa fungsi terhadap aktivitas pertumbuhan dan perkembangan tanaman, diantaranya yaitu:

1. Mempercepat proses pemanjangan dan pembesaran sel

Auksin berperan dalam menurunkan pH dinding sel melalui peransangan pompa proton sehingga pH dinding sel menjadi lebih asam. pH dinding sel yang rendah akan mengaktifkan enzim pemecah ikatan hidrogen (enzim ekspansin) yang ada diantara mikrofibril selulosa sehingga serat-serat dinding sel menjadi longgar atau mengendur, plastisitas dan permeabilitas sel serta tekanan osmosis sel (mengambil air) meningkat dan ukuran sel bertambah panjang karena dinding selnya mengembang (Gambar 2).



Gambar 2. Peran auksin dalam pemanjangan sel (Campbell & Reece, 2002)

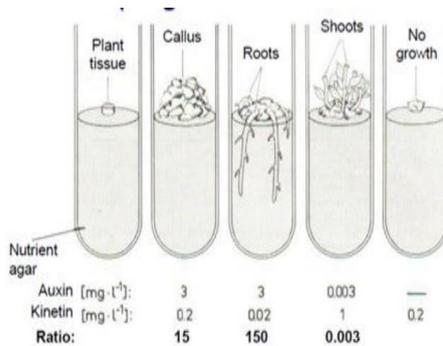
2. Merangsang sintesis strigolaktone yang menyebabkan terjadinya dominansi apikal sehingga pembentukan tunas lateral menjadi terhambat.
3. Memacu pertumbuhan akar adventif dan akar lateral
4. Mendorong terbentuknya suspensi sel, kalus serta organ dari tanaman yang akan dibiakan dan dapat menekan morfogenesis pada kultur tanaman secara *in vitro*
5. Sebagai herbisida untuk mengendalikan gulma berdaun lebar (tanaman dikotil), karena auksin memiliki fitoksisitas tinggi dan mengganggu proses translasi RNA dan transkripsi DNA sehingga proses pertumbuhan tanaman terganggu terutama dari auksin jenis 2,4-dinitrofenol (2,4-D), 2,4,5-Triklorofenolasetat (2,4,5-T) dan 2- metil-4- klorofenoksiasetat (MCPA).
6. Merangsang gerak phototropisme (gerakan tumbuhan menuju arah datangnya cahaya matahari akibat memanjangnya sel pada bagian tanaman yang terkena cahaya) dan geotropism pada tanaman (gerak tumbuhan ke arah pusat gravitasi bumi)

## 2. Sitokinin

Sitokinin merupakan salah satu hormon yang berperan dalam pembelahan sel (sitokinesis) sehingga hormon ini banyak digunakan dalam kultur jaringan. Tempat sintesis sitokinin adalah pada ujung akar, nodul akar dan endosperm biji yang sedang berkembang (Asra *et all.*, 2020) dan ditranslokasikan secara apolar melalui xylem ke pucuk (Fauziah, 2020). Sitokinin banyak terkonsentrasi di daerah meristematik (daun muda), meristematik apikal serta buah yang sedang berkembang.

Sitokinin alamiah di dalam tubuh tanaman yaitu zeatin dalam bentuk zeatin riboside dan zeatin ribotida. Sedangkan sitokinin sintetik terdiri dari zeatin, kinetin, PBA, 2-IP, benzil adenin (BA), adenin sulfat, benomyl dan air kelapa.

Cara kerja sitokinin bersifat antagonis atau berlawanan dengan auksin dalam mengatur dominansi apikal atau pertumbuhan tunas aksilar. Konsentrasi sitokinin yang lebih tinggi dari auksin akan mengurangi dominansi apikal dan menstimulasi pertumbuhan akar dan tunas (Hopkins & Honer, 2008). Pertumbuhan tanaman yang optimal dan berimbang terjadi pada saat konsentrasi kedua enzim tersebut berimbang. Sedangkan pada saat konsentrasi auksin rendah dan sitokinin sedang maka akan merangsang pertumbuhan kalus.



**Gambar 11. 2. Pengaruh rasio auksin dan sitokinin dalam regulasi morfogenesis kultur jaringan (Asra *et all.*, 2020)**

### Fungsi Hormon Sitokinin

Berikut beberapa fungsi hormon sitokinin terhadap pertumbuhan dan perkembangan tanaman:

1. Merangsang pembelahan sel dan pembentukan organ

Ketidakseimbangan konsentrasi sitokinin dan auksin merangsang terjadinya pembelahan sel dan pertumbuhan sel meristem pada khalus untuk berkembang menjadi daun, batang dan kuncup.

2. Mengatur dominansi apikal
3. Menunda penuaan (*senescence*) dan absisi

Sitokinin berperan dalam menghambat kerja enzim RNA-ase, DNA-ase dan protease untuk memecah protein atau mengubah protein menjadi asam amino dan memobilisasi nutrisi dari jaringan disekitarnya sehingga penuaan pada tanaman dapat ditunda (Karimah *et all.*, 2013). Sitokinin juga dapat melindungi membran sel dari kerusakan dan mencegah oksidasi dengan melarutkan asam lemak jenuh pada membran sel.

4. Memacu pembesaran sel pada kotiledon

Pemberian sitokinin dapat meningkatkan laju pertumbuhan kotiledon 2-3 kali lipat melalui proses sitokinesis maupun pembesaran sel.

5. Merangsang pembentukan kloroplas dan sintesis protein

Sitokinin mampu meningkatkan laju pembentukan klorofil dan memacu perkembangan lanjutan dari etioplas menjadi kloroplas terutama pada tanaman angiospermae yang ditumbuhkan di tempat gelap.

6. Menghentikan dormansi biji dan merangsang pertumbuhan embrio

Pemberian sitokinin pada benih tanaman lebih efektif pada awal dan akhir masa dormansi. Aktivitas sitokinin akan meningkatkan mobilisasi gula dan respirasi sehingga sensitive jaringan tanaman akan meningkat dan tunas akan teransang untuk tumbuh atau muncul lebih cepat.

### 3. Giberelin

Giberelin merupakan hormon yang tergolong ke dalam senyawa kimia terpenoid yang terdiri dari 5 atom karbon dari unit isoprene. Giberelin alamiah terdiri dari  $GA_1 - GA_{72}$ . Giberelin sintetis yang sering dikenal adalah asam giberelin ( $GA_3$ ). Giberelin disintesis dari asam mavalonat (MVA) pada jaringan muda di pucuk dan biji yang sedang berkembang dan ditranslokasikan ke seluruh jaringan tanaman melalui xylem dan floem dengan cara apolar. Berikut adalah beberapa fungsi dari hormon giberelin:

1. Mengatasi *genetic dwarfism*

*Genetic dwarfism* merupakan gejala kerdil pada tumbuhan yang ditandai dengan memendeknya internodus (ruas batang) akibat mutasi gen (Asra *et al.*, 2020). Kemampuan giberalin dalam mengatasi gejala kerdil pada tanaman erat kaitannya dengan peran giberalin dalam proses pemanjangan sel dan pengembangan dinding sel. Selain itu, terjadinya hidrolisis pati akibat terbentuknya enzim amilase oleh giberalin akan meningkatkan konsentrasi gula sehingga ujung-ujung sel akan mengembang akibat meningkatnya tekanan osmotik di dalam sel.

2. Menstimulasi pembungaan

Pembungaan pada tanaman akan terjadi ketika konsentrasi hormon giberalin rendah dan sebaliknya. Salah satu jenis giberalin yang membantu dan merangsang pemebaran bunga adalah GA<sub>3</sub> endogen yang terdapat dalam kuncup bunga.

3. Parthenocarpy dan *fruit set*

Partenokarpi merupakan pembentukan buah tanpa biji karena buah terbentuk tanpa melalui proses penyerbukan atau pembuahan dan pembungaan. Selain itu, buah yang mendapatkan giberalin yang cukup akan memiliki daging buah lebih tebal dan berat segar buah yang lebih tinggi (Pertiwi *et al.*, 2014).

4. Stimulasi perkembangan kambium dan xylem

Pemberian GA pada tanaman rami dapat meningkatkan jumlah floem dan meningkatkan kandungan selulosa dan lignin. Selain itu, aplikasi GA<sub>3</sub>

dengan konsentrasi 100, 250 dan 500 ppm juga merangsang terjadinya differensiasi xylem pada pucuk olive.

#### 5. Pemecahan dormansi dan mobilisasi bahan makanan selama fase perkecambahan

Pada saat terjadi imbibisi air pada biji, maka biji akan berkecambah dan masa dormansi biji berakhir. Selama masa perkecambahan, biji akan bergantung pada sumber makanan (pati) yang ada di dalam endosperm. Pati akan diuraikan secara enzimatik oleh enzim amilase dan diubah menjadi gula dan ditranslokasikan ke embrio sebagai sumber energi. Dalam proses enzimatik tersebut, keberadaan giberelin berperan penting dalam meningkatkan aktivitas enzim  $\alpha$ -amilase dan enzim hidrolitik di dalam endosperm (Fauziah, 2021). Dengan adanya giberelin, kulit benih menjadi lebih permeable atau plastis terhadap udara dan air, sehingga potensial sel menurun dan air masuk ke dalam sel sehingga terjadi pemanjangan sel.

#### 4. Etilen

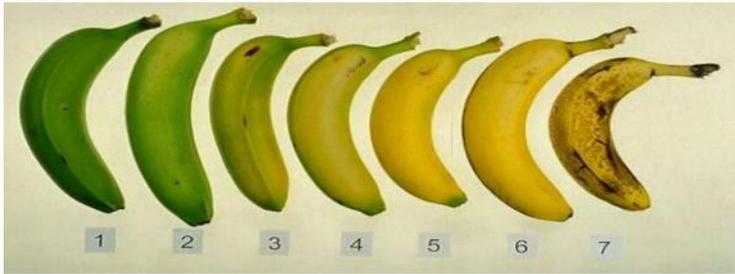
Etilen merupakan hormon yang berbentuk gas mudah menguap (*volatile*) dengan struktur kimia yang sangat sederhana dengan rumus molekul  $C_2H_4$ , terdiri dari 4 atom hydrogen (H) dan 2 atom karbon (C) yang berikatan rangkap. Etilen bergerak secara difusi dan disintesis pada jaringan tanaman yang mengalami penuaan (pematangan) atau organ tanaman yang mengalami cekaman. Produksi etilen dilakukan oleh tanaman pada saat pasokan auksin ke jaringan tanaman dalam konsentrasi auksin (Hopkins, 2008).

Berikut beberapa fungsi etilen bagi tanaman:

1. Merangsang pematangan buah dan *senescence* (penuaan)

Pematangan buah terjadi akibat penurunan permeabilitas dinding sel dan banyaknya cairan sel yang hilang akibat kerusakan membran sel, dan perubahan pati menjadi asam amino organik dan gula (Asra *et al.*, 2020). Etilen merangsang pematangan buah melalui pengaturan atau peningkatan respirasi (kenaikan klimaterik) yang diikuti oleh ekspresi gen yang meningkatkan proses pematangan seperti perkembangan warna buah, rasa dan tekstur (Hopkins, 2008). Etilen memecah klorofil pada buah muda sehingga buah hanya mengandung pigmen xantofil dan karoten, yang menyebabkan buah matang berubah warna menjadi merah atau jingga.

Peningkatan sintesis protein oleh enzim yang mengatur biosintesis etilen (enzim ACC sintetase (ACS) dan ACC oksidase (ACO)) pada buah yang berdaging seperti tomat, jeruk dan pisang dalam memecah pati, akumulasi gula dan hilangnya asam organik juga berperan dalam percepatan pematangan buah. Etilen juga berperan penting dalam menyediakan energi untuk metabolisme buah melalui pengaktifan enzim ATP-ase yang akan mengubah ATP menjadi ADP+P (energi) (Asra *et al.*, 2020). Adanya perubahan enzimatik dan peningkatan senyawa aromatik pada buah juga menghasilkan aroma yang khas pada buah yang matang.



Gambar 4. Perubahan warna kulit buah pisang pada fase pematangan buah (Asra *et al.*, 2020)

## 2. Merangsang absisi daun

Absisi merupakan rontoknya atau terlepasnya daun dari tangkai batang akibat terjadinya hidrolisis polisakarida di dalam dinding sel oleh enzim sehingga komponen dinding sel (sel parenkim) yang ukurannya kecil menjadi lemah dan tipis karena tidak adanya serat di sekitar jaringan tanaman.

## 3. Permeabilitas membran

Sebagai senyawa yang dapat larut di dalam lemak, etilen dapat larut dan menembus membran mitokondria sehingga permeabilitas sel meningkat yang memungkinkan terjadinya interaksi enzim pematangan dengan substrat buah.

## 4. Merangsang epinasty

Epinasty merupakan gerakan membengkoknya tangkai dan ujung daun ke arah bawah akibat pemanjangan sel yang berlebihan pada sisi atas tangkai daun (Hopkins, 2008). Epinasty sering terjadi pada saat kondisi tanaman tercekam/stress untuk mengurangi terjadinya transpirasi dan merangsang peningkatan produksi etilen.

5. Merangsang pemanjangan tangkai daun, akar, batang dan struktur bunga pada tanaman aquatik dan semiaquatik.
6. Menghambat proses pemanjangan batang dan akar pada beberapa jenis tanaman
7. Merangsang terbentuknya bulu-bulu akar dan akar adventif
8. Merangsang pembungaan terutama pada annas dan anggrek

## 5. Asam Absisat (ABA)

Asam absisat merupakan hormon yang bersifat inhibitor (menghambat) pertumbuhan tanaman dengan memperlambat proses pembelahan dan pembesaran sel dan sifatnya berlawanan (antagonis) dengan hormon lainnya terutama auksin dan giberelin. Asam absisat (ABA) juga sering disebut dengan hormon stress, karena tanaman akan memproduksi ABA yang tinggi pada saat tanaman tercekam/stress kekeringan, kadar garam tinggi maupun suhu terlalu tinggi atau terlalu rendah dan produksi ABA akan turun pada saat cekaman hilang (Asra *et all.*, 2020). Tempat sintesis ABA adalah di sel mesofil, sel penjaga dan jaringan vaskular tanaman (Hopkins, 2008).

Berikut beberapa peran ABA sebagai hormon stress pada tanaman:

### 1. Menstimulasi dormansi biji

Berbeda dengan giberalin, tingginya konsentrasi ABA dalam jaringan tanaman merangsang biji untuk menghentikan aktivitas pertumbuhan dan fisiologisnya (dorman) untuk sementara waktu. Selanjutnya, perkecambahan biji akan terjadi apabila ABA inaktif dan konsentrasi giberalin meningkat. Konsentrasi ABA akan meningkat 100x lipat selama proses pematangan biji. Hal

ini akan menginduksi produksi protein khusus yang membantu biji untuk menahan dehidrasi ekstrim pada masa pematangan dan menghambat perkecambahan biji dengan mencegah biosintesis  $\alpha$ -amilase yang diinduksi oleh GA terutama dalam biji-bijian sereal.

2. Memberikan sinyal cekaman (kekeringan, suhu rendah dan kadar garam tinggi) pada tanaman

Pada saat tanaman tercekam kekeringan, produksi ABA dalam sel tanaman akan meningkat 50 kali lipat dalam waktu 4-8 jam dan ABA akan memberikan sinyal kekurangan air ke tanaman untuk menutup stomata daun guna menekan laju kehilangan air melalui penguapan. Saat tanaman tercekam kekeringan, ABA juga menstimulasi penyerapan air melalui akar dan membentuk lapisan epikutikula (lilin) untuk mencegah kehilangan air yang berlebihan saat ekekeringan (Asra *et al.*, 2020).

Dalam menghadapi suhu rendah (musim dingin), ABA akan diproduksi di bagian tunas terminal tumbuhan yang akan berperan sebagai inhibitor pertumbuhan primer dan sekunder pada tanaman. ABA juga menginduksi pembentukan protein LEA (Ali & Nisyawati, 2016). Sedangkan pada kondisi tercekam garam tinggi (salinitas), konsentrasi ABA tertinggi ada pada daun tanaman. Pada kondisi kadar garam tinggi dalam tanah, ABA akan memicu pembentukan beberapa protein baru (osmotin) dengan berat molekul rendah pada tanaman untuk mempertahankan sistesis osmotin.

3. Merangsang pengguguran (absisi) daun pada tanaman

Tingginya aktivitas ABA didalam sel dan jaringan tanaman menyebabkan aktivitas sel dalam mengangkut nutrisi ke bagian tubuh tumbuhan lainnya terutama daun akan berkurang bahkan terhenti, sehingga daun menjadi kering dan rontok karena kekurangan nutrisi. Kering dan rontoknya daun merupakan sinyal bahwa laju transpirasi tanaman lebih tinggi dibandingkan penyerapan air oleh akar (Asra *et all.*, 2020).

4. Mengatur buka tutupnya stomata daun

Pada saat tercekam kekeringan, tanaman akan mengurangi laju kehilangan airnya dan menghindari kehilangan turgor sel agar tanaman tidak layu dengan regulasi peningkatan produksi ABA dan menutup stomata. ABA akan menurunkan tekanan osmotik sel tanaman sehingga sel menjadi turgor dan stomata menutup selama tumbuhan melakukan metabolisme ABA.

5. Mengatur perkembangan embrio biji

Maturasi embrio pada biji ditandai dengan penghentian pertumbuhan embrio, akumulasi cadangan makanan dalam endosperm biji, dan pengembangan toleransi terhadap kekeringan. Selama masa perkembangan biji, konsentrasi tertinggi ABA terjadi selama fase maturasi (saat berat kering dan volume biji belum maksimal) dan menurun kembali saat biji kering (Hopkins, 2008; Asra *et all.*, 2020).

## DAFTAR PUSTAKA

- Asra, R., Samarlina, R. A., and Silalahi, M. 2020. Hormon Tumbuhan. Cetakan 1. UKI Press: Jakarta.
- Campbell, N. A. and J. B. Reece. 2002. Biology. Sixth Edition, Pearson Education. Inc. San Francisco. 802-831.
- Fauziah, A. 2021. Pengantar Fisiologi Tumbuhan. Cetakan pertama. Biru Atmaja: Tulungagung.
- Hopkins, W.G. 2008. Introduction to Plant Physiology. Singapura: John Willey and Sons, Inc.
- Hopkins. G. William & Norman P. A. Honer. 2008. Introduction to plant physiology 4th edition, London: The University of Western Ontario.
- Karimah, A., S. Purwanti and R. Rogomulyo. 2013. Kajian Perendaman Rimpang Temulawak (*Curcuma xanthoriza* Roxb.) dalam Urin Sapi dan Air Kelapa Untuk Mempercepat Pertunasan. *Jurnal Vegetalika*. 2(2): 3-4.
- Pertiwi, P., Agustiansyah and Y. Nurmiati. 2014. Pengaruh Giberelin (GA3) terhadap Pertumbuhan dan Produksi Tanaman Kedelai (*Glycine max* L.). *Jurnal Agroteknologi Tropika*. 2(2): 267-281.
- Wiraatmaja, I. W. 2017. Zat Pengatur Tumbuh Auksin dan Cara Penggunaannya dalam Bidang Pertanian. Fakultas Pertanian: Universitas Udayana.
- Taiz, L. and Eduardo Z. 2002. Plant Physiology 3rd ed. English: Sinauer Associates.

# **BAB 12**

## **GERAK YANG TERJADI PADA TUMBUHAN**

**Oleh Raisa Baharuddin**

Tumbuhan memiliki kemampuan untuk merespons stimulus lingkungan melalui berbagai bentuk gerakan. Kemampuan bergerak ini adalah salah satu karakteristik makhluk hidup. Gerakan yang terjadi pada tumbuhan berbeda dengan hewan, dimana tumbuhan memiliki gerak terbatas yaitu dengan melakukan gerakan tertentu pada sebagian tubuh tumbuhan (tidak seluruhnya).

Pada tumbuhan tingkat tinggi, gerakan tumbuhan terjadi pada bagian seperti: akar, batang, daun, atau bunga. Sedangkan pada tumbuhan tingkat rendah, respon terhadap rangsangan membuat seluruh bagian tanaman bergerak berpindah tempat. Gerak tumbuhan dapat diamati dalam berbagai konteks, seperti respons terhadap cahaya, gravitasi, sentuhan, dan faktor lingkungan lainnya. Kemampuan ini memungkinkan tumbuhan untuk mendapatkan keuntungan dalam proses fotosintesis, penyerbukan, dan penyebaran biji.

## 12.1 Macam Gerak Tumbuhan

Tumbuhan memiliki dua jenis gerakan yang dibedakan berdasarkan asal rangsangannya, yaitu gerakan endonom dan gerakan etionom. Gerak endonom adalah gerak tumbuhan akibat rangsangan dari dalam tubuh tanaman sendiri. Istilah lain gerak endonom yaitu gerak autonom atau gerak spontan. Gerak endonom dibagi menjadi dua jenis, yaitu gerak nutasi dan gerak higroskopis. Salah satu contoh gerak nutasi yaitu pergerakan kloroplas memutar mengelilingi isi sel karena siklosis pada tumbuhan air *Hydrilla verticillate* (ganggang) (Rojstien et al 2012).

Gerak higroskopis adalah pergerakan pada bagian tumbuhan yang disebabkan oleh perubahan kadar air di dalam sel tumbuhan, sehingga menyebabkan terjadinya penyusutan yang asimetris. Hal ini menciptakan tekanan internal karena perbedaan tingkat penyusutan sehingga kulit buah akhirnya pecah. Contoh gerak higroskopis yaitu membukanya kulit buah polong kedelai yang sudah memasuki masak fisiologis. (Gambar 12.1).



**Gambar 12. 1. Pecahnya kulit buah polong kedelai  
(Sumber: Wikimedia, 2023)**

Gerak etionom adalah pergerakan bagian tumbuhan yang terjadi akibat rangsangan dari luar tumbuhan tersebut. Rangsangan dari luar dapat berupa air, sentuhan, cahaya, zat kimia, gravitasi, dan lain sebagainya. Gerak etionom dapat dibedakan berdasarkan arah gerakan tanaman terhadap rangsangan yang diberikan, yaitu gerak tropisme dan gerak nasti. Gerak tropisme terjadi sebagai respons terhadap stimulus arah tertentu, seperti cahaya atau gravitasi, sementara gerak nasti adalah gerakan spontan tanpa arah tertentu, seperti gerak pembukaan dan penutupan bunga pada waktu tertentu.

## **12.2 Gerak Tropisme**

Tropisme adalah pergerakan pada sebagian tumbuhan yang terjadi sesuai dengan arah rangsangan yang diterimanya. Tropisme berasal dari istilah Yunani "trope", yang memiliki arti belok. Gilroy (2008), tropisme dapat diklasifikasikan menjadi "positif" atau "negatif". Tropisme positif terjadi ketika arah gerakan mendekati rangsangan, sedangkan tropisme negatif terjadi ketika arah gerakan menjauhi rangsangan. Gerakan tropisme dapat dibagi menjadi beberapa jenis seperti fototropisme, geotropisme, hidrotropisme, kemotropisme, dan tigmotropisme.

### **1. Fototropisme**

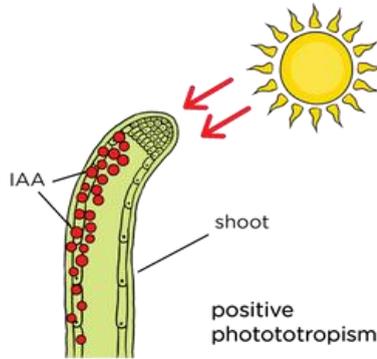
Fototropisme adalah gerakan pada bagian tumbuhan karena pengaruh cahaya. Tanaman bergerak mengikuti arah datangnya cahaya. Fototropisme positif adalah gerakan bagian tumbuhan yang bergerak menuju cahaya, seperti halnya batang yang tumbuh melengkung mengikuti arah cahaya yang

datang (Gambar 12.2). Fenomena dimana bagian tanaman bergerak menjauh dari arah datangnya cahaya disebut sebagai fototropisme negatif. Sebagai contohnya, akar tumbuh ke bawah menjauhi sumber cahaya.



**Gambar 12. 2. Pergerakan tumbuhan ke arah sumber cahaya  
(Sumber: Malaveus, 2023)**

Referensi mengenai fototropisme terus berkembang semenjak percobaan Darwin (1880) tentang zat misterius yang di transduksi dari ujung koleoptil ke arah bawah, atas rangsangan cahaya yang diberikan ke tanaman mempengaruhi perubahan arah pertumbuhan. Baru pada tahun 1920-an terobosan signifikan terjadi ketika Went (1926), yang meneliti fototropisme pada koleoptil gandum (*Avena sativa*), mengisolasi dan mengidentifikasi substansi misterius Darwin sebagai hormon auksin.



**Gambar 12. 3. Pergerakan hormon auksin akibat rangsangan cahaya**

**Sumber: [http://www.a-](http://www.a-levelnotes.co.uk/uploads/9/6/0/2/96027112/published/271-positive-phototropism.png?1566908580)**

**levelnotes.co.uk/uploads/9/6/0/2/96027112/published/271-positive-phototropism.png?1566908580**

Pada fototropisme, hormon auksin berperan penting dalam pembelokan batang ke arah datangnya cahaya. Auksin adalah zat pengatur tumbuh yang berperan dalam proses pembelahan dan menginduksi pemanjangan sel. Auksin disintesis di ujung tunas, dan didistribusikan ke seluruh organ secara basipetal. Namun, saat cahaya mengenai salah satu sisi batang, menyebabkan penyebaran auksin secara asimetrik (lateral) ke arah yang tidak terkena cahaya. Bagian tanaman yang tidak tersinari akan mengalami peningkatan konsentrasi auksin yang tinggi (Gambar 12.3). Hal ini akan merangsang sisi batang yang tidak terkena cahaya mengalami pemanjangan sel lebih cepat dibandingkan sisi batang yang terkena cahaya matahari sehingga terjadi pembelokan batang ke arah cahaya.

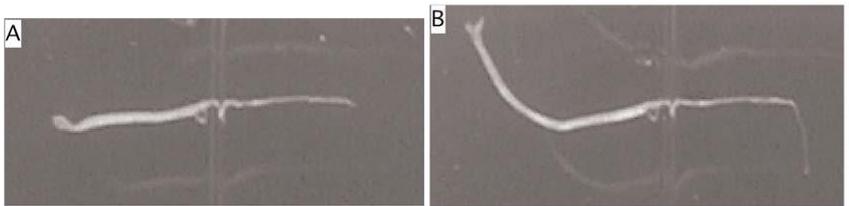
## 2. Geotropisme

Geotropisme adalah gerak bagian tumbuhan yang dipengaruhi oleh gaya gravitasi bumi. Geotropisme dapat disebut juga gravitropisme. Geotropisme penting bagi pertumbuhan dan perkembangan tanaman karena mengarahkan pertumbuhan akar ke arah gravitasi ataupun ke arah yang berlawanan dengan gravitasi (Marisa, dkk 2021). Pergerakan tumbuhan yang mengarah ke bawah sebagai respons terhadap gravitasi bumi disebut geotropisme positif. Contohnya adalah pergerakan akar yang tumbuh ke arah tanah. Sebaliknya, tumbuhan yang bergerak menjauhi gravitasi bumi disebut geotropisme negatif. Salah satu contohnya adalah pertumbuhan batang yang bergerak ke arah atas, menjauhi tanah.

Menurut Cholodny dan Went (1937), mekanisme respon tanaman terhadap rangsangan gravitasi bumi dipengaruhi oleh hormon auksin. Perbedaan konsentrasi auksin pada sisi yang berlawanan mengakibatkan pelengkungan organ. Tanaman yang diletakkan secara horizontal (mendatar), menyebabkan auksin akan terdistribusi ke arah bawah. Distribusi auksin yang lebih tinggi pada bagian bawah menyebabkan pertumbuhan lebih cepat dan mengakibatkan pucuk melengkung ke atas. Respons tanaman terhadap gravitasi juga melibatkan statolit yang mengendap di bagian bawah sel pengindera gravitasi (statosit). Statolit merupakan organel sel khusus yang berisi pati yang terletak di bagian bawah sel, seperti tudung akar. Sedimentasi partikel statolit di area sel yang paling rendah akan memicu redistribusi auksin pada sel-sel di atasnya dan menyebabkan

pemanjangan akar sehingga akan melengkung ke bawah (Gambar.

Statolit adalah plastida khusus yang mengandung pati dan terletak di bagian bawah, seperti tudung akar. Pengendapan statolit pada titik terendah sel akan menyebabkan redistribusi auksin sel-sel yang berada di atasnya dan menyebabkan pemanjangan akar sehingga akar akan membengkok ke bawah (Gambar 12.4)



Gambar 12.4 . Respon tropisme pada kecambah *Arabidopsis thaliana*

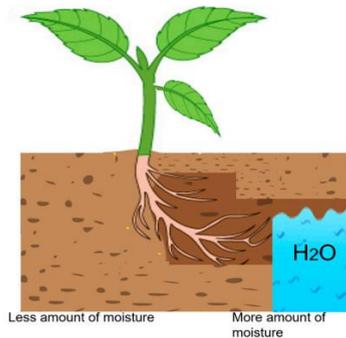
Sumber : Mason et al, 2002

### 3. Hidrotropisme

Hidrotropisme merupakan respons gerakan pada bagian tumbuhan yang dipicu oleh kehadiran air. Hidrotropisme memiliki peran yang krusial bagi tanaman karena membantu meningkatkan akses terhadap air, yang merupakan faktor yang sangat vital bagi kelangsungan hidup dan pertumbuhan tanaman. Hidrotropisme positif adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan pergerakan tanaman yang bergerak mendekati sumber air. Sebagai contoh, akar tanaman bergerak tumbuh menuju ke area dengan kandungan air yang tinggi di

dalam tanah (Dietrich, 2018). Hidrotropisme negatif merupakan istilah yang digunakan untuk menggambarkan gerakan tanaman menjauhi air. Contohnya, pertumbuhan pucuk batang tanaman yang melampaui permukaan air.

Respons tumbuhan terhadap hidrotropisme menyebabkan akar akan membelok ke daerah dengan konsentrasi air yang lebih tinggi. Akar umumnya tumbuh ke arah bawah secara vertikal, namun jika kekurangan air, akar akan melengkung menuju sumber air yang mencukupi seperti yang terlihat dalam Gambar 12.5.



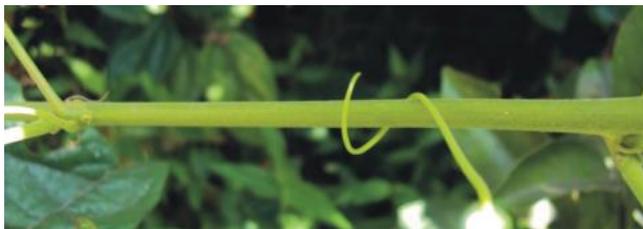
Gambar 12.5. Pergerakan akar menuju air (hidrotropisme)  
Sumber: Gul et al. 2023

#### 4. Tigmotropisme

Tigmotropisme adalah gerak bagian tumbuhan yang terstimulus oleh sentuhan. Kata ini berasal dari Bahasa Yunani “thigma” yang berarti sentuhan. Tigmotropisme adalah peristiwa membelok/merambatnya bagian tubuh tumbuhan mengelilingi penopang atau batang tumbuhan lain akibat adanya persinggungan (Salisbury and Ross, 1995). Fenomena tigmotropisme bisa kita lihat pada tumbuhan yang memiliki

lengan seperti anggur, semangka, kacang panjang, mentimun dan sebagainya.

Tumbuhan akan terus memanjangkan sulurnya untuk mencari struktur pendukung yang diperlukan agar dapat berdiri tegak dan kokoh. Kontak antara sulur dengan tiang/tonggak dapat mengakibatkan sulur tersebut melengkung mengikuti arah objek yang tersentuh (Gambar 12.6). Hal ini terjadi karena terdapat perbedaan dalam kecepatan pertumbuhan sulur akibat sel-sel yang terkena sentuhan hormon asam absisat yang menghambat pertumbuhan. Disamping itu, pada sisi yang berlawanan terjadi produksi hormon auksin yang mempercepat pertumbuhan. Oleh karena itu, sulur tumbuh melengkung dan melilit sumber sentuhan. Perubahan turgor memainkan peranan penting dalam respons sulur. Perubahan kekencangan sel menjadi faktor penting dalam merespon tumbuhannya. Nampaknya ada kecurigaan bahwa terjadi perubahan yang terjadi secara cepat pada kandungan ATP dan fosfat anorganik adalah hasil dari rangsangan sentuhan pada sulur.



Gambar 12.6. Gerakan sulur pada markisa (*Passiflora edulis*)

Sumber: Putz and Mooney, 1991

## 5. Kemotropisme

Kemotropisme adalah pergerakan sebagian tubuh tumbuhan menuju arah stimulus zat kimia. Perilaku menjauhi zat kimia tertentu disebut sebagai kemotropisme negatif. Sebagai contoh, pergerakan akar dalam mencapai dan menyerap unsur hara (pupuk) dari tanah.

Kemotropisme adalah pergerakan sebagian tubuh tumbuhan menuju arah stimulus zat kimia. Gerakan yang mendekati zat kimia tertentu disebut kemotropisme positif. Sebagai contoh, pergerakan akar dalam mencapai dan menyerap unsur hara (pupuk) dari tanah. Seperti pada tanaman wortel (*D. carota*), akar primer bergerak menuju unsur disodium fosfat (Izzo et al, 2019). Sebaliknya gerakan yang menghindari zat kimia tertentu disebut sebagai kemotropisme negatif. Contohnya pergerakan akar tanaman menjauhi zat beracun. Pada penelitian yang dilakukan Sun et al (2008) akar tanaman yang tumbuh menghindari lingkungan dengan konsentrasi garam (NaCl) yang merugikan.

## 12.3 Gerak Nasti

Gerak nasti adalah gerakan pada bagian tumbuhan yang arahnya tidak bergantung pada arah sumber rangsangan. Rangsangan tersebut dapat berupa suhu, cahaya, ataupun sentuhan. Pergerakan nasti terjadi pada daun, bunga, kotiledon atau batang (Darwin, 1880; Zlinszky, Molnar, & Barrfod, 2017). Gerak ini disebabkan oleh perubahan turgor turgor (tekanan internal di dalam

sel tanaman) akibat pemberian rangsangan. Penurunan tekanan turgor menyebabkan penyusutan, sedangkan peningkatan tekanan turgor menyebabkan pembengkakan. Laju atau frekuensi respons ini meningkat seiring dengan meningkatnya intensitas stimulus (Sen, 2023). Berdasarkan jenis rangsang yang memengaruhi, gerak nasti dibedakan menjadi fotonasti, seismonasti, niktinasi, termonasti dan nasti kompleks.

### 1. Fotonasti

Fotonasti adalah gerak tumbuhan akibat rangsangan berupa cahaya. Contoh fotonasti adalah mekarnya bunga pukul empat (*Mirabilis jalapa*) pada sore hari atau ketika sinar matahari mulai redup dan menutupnya kembali keesokan harinya saat sinar matahari kembali terik.

Mekanisme fotonasti pada *Mirabilis jalapa* melibatkan perubahan dalam tekanan turgor pada sel-sel di bagian dasar bunganya. Ketika cahaya berkurang di sore hari, terjadi perubahan konsentrasi ion dan perubahan osmotik di dalam sel-sel tersebut, menyebabkan sel-sel mengembang dan membuka bunga. Sebaliknya, ketika intensitas cahaya meningkat di pagi hari, terjadi proses yang berlawanan, dan bunga menutup.

### 2. Seismonasti atau Tigmonasti

Seismonasti atau tigmonasti (thygma = sentuhan) adalah gerak tumbuhan yang disebabkan oleh rangsangan sentuhan. Pergerakan seismonasti juga dapat diakibatkan oleh rangsangan seperti angin kencang, tetesan hujan, panas terik, ataupun getaran. Salah satu tanaman yang dikenal melakukan

gerakan seismonasti adalah putri malu (*Mimosa pudica*), dimana daunnya menutup ketika disentuh (Gambar 12.7).



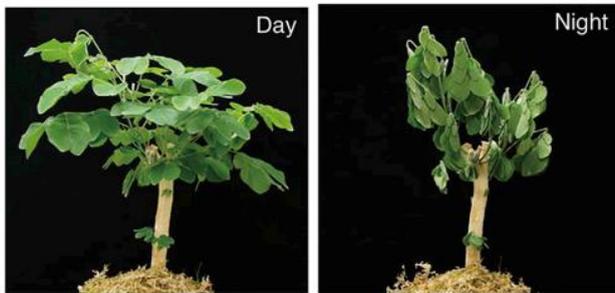
**Gambar 12. 4. Seismonasti pada tanaman Putri Malu (*Mimosa pudica*) Sumber: Sen, 2023**

Tanaman putri malu memberikan respon sangat cepat yakni sekitar 0,1 detik setelah adanya rangsangan. Pergerakan seismonasti pada tanaman putri malu disebabkan oleh perbedaan tekanan turgor antara bagian atas dan bawah pangkal tangkai daun (pulvinus). Jika sentuhan dilakukan pada ujung daun putri malu, akan terjadi reaksi ion dan air yang keluar dari sel tersebut. Saat ujung daun putri malu disentuh maka akan terjadi pergerakan ion dan air keluar dari sel tersebut. Terjadinya gerakan seismonasti mengakibatkan penurunan kadar air di daerah sentuhan, sehingga tekanan turgor hilang, dan seluruh daun putri malu akan menutup serta terlihat seperti layu. Lamanya waktu daun putri malu menutup ditentukan oleh suhu dan keras halusnya getaran.

### 3. Niktinasti

Niktinasti merupakan pergerakan yang dilakukan oleh bagian tumbuhan sebagai respons terhadap rangsangan dari lingkungan yang gelap. Niktinasti berasal dari istilah Yunani

"nux" yang berarti malam, sehingga sering disebut gerak tidur. Gerakan ini sering terjadi pada daun polong-polongan yang menutup pada menjelang malam hari dan membuka ketika matahari terbit contohnya pada tanaman *Samanea saman* (Gambar 12.8). Tanaman *Samanea saman* mempunyai anak-anak daun yang tertutup pada malam hari. Gerak niktinasti disebabkan oleh disebabkan oleh pembengkakan /penyusutan asimetris pada sel motor ekstensor (sisi aksial) dan sel motor fleksor (sisi abaksial) yang terletak di pangkal daun (pulvini), yang dikontrol oleh perubahan turgor (Moran 2007, 2015).



**Gambar 12. 5. Gerak niktinasti pada tanaman trembesi (*Samanea saman*) pada pagi dan malam hari (Sumber: Oikawa et al. 2018)**

Galston dkk mengemukakan adanya pergerakan ion  $K^+$  dari bagian atas ke bagian bawah pulvinus dan sebaliknya. Perpindahan ion  $K^+$  menyebabkan perubahan besar dalam potensial osmotik pada sel-sel motor, sehingga menyebabkan pergerakan daun ke atas atau ke bawah. Di samping itu, terdapat dugaan bahwa hormon auksin berperan dalam fenomena niktinasti tersebut. Pada saat siang, auksin dipindahkan ke petiol yang berada di bagian bawah daun. Ion  $K^+$  akan bergerak menuju daerah dengan konsentrasi auksin

yang lebih tinggi, sedangkan air akan teralir ke bagian bawah pulvinus dan menyebabkan daun terbuka.

#### **4. Termonasti**

Termonasti merupakan gerak bagian tumbuhan yang dipicu oleh rangsangan berupa suhu. Dalam termonasti, perubahan suhu dapat memicu reaksi tertentu seperti mekar atau menguncupnya bunga. Kejadian termonasti dapat diamati dalam perubahan membuka dan menutupnya bunga tulip yang disebabkan oleh fluktuasi suhu yang tiba-tiba. Bunga tulip akan mekar ketika terjadi peningkatan suhu, dan akan kembali tertutup jika suhu turun.

#### **5. Nasti kompleks**

Gerak nasti kompleks adalah gerakan sebagian tumbuhan yang disebabkan oleh berbagai macam rangsangan seperti air, suhu, cahaya, zat kimia dan sebagainya. Contohnya pada gerak membuka dan menutupnya sel penutup pada stomata. Gerakan nasti kompleks pada stomata disebabkan perubahan tekanan turgor pada sel tersebut.

## DAFTAR PUSTAKA

- Darwin C., 1880. *The Power of Movement in Plants*. London, UK.
- Dietrich, D., 2018. Hydrotropism: how roots search for water. *Journal of experimental botany*, 69(11), pp.2759-2771.
- Gilroy S., and Masson P.H. 2008. *Plant Tropisms*. 1st ed. Blackwell Publisher; Ames, IA, USA.
- Gul, M.U., Paul, A. and Chehri, A., 2023. Hydrotropism: understanding the impact of water on plant movement and adaptation. *Water*, 15(3), p.567.
- Izzo, L.G., Romano, L.E., De Pascale, S., Mele, G., Gargiulo, L. and Aronne, G., 2019. Chemotropic vs hydrotropic stimuli for root growth orientation in microgravity. *Frontiers in Plant Science*, p.1547.
- Marisa, H., Salni, S. and Gustifa, S., 2022. Studi geotropisma versus hidrotropisma pada radikula Jagung (*Zea mays* (L.) Var. Saccharata) dengan metode slang tunggal. *Sriwijaya Bioscientia*, 3(3), pp.10-14.
- Masson, P.H., Tasaka, M., Morita, M.T., Guan, C., Chen, R. and Boonsirichai, K., 2002. *Arabidopsis thaliana*: a model for the study of root and shoot gravitropism. *The Arabidopsis Book/American Society of Plant Biologists*, 1.
- Moran N. 2007. Osmoregulation of leaf motor cells. *FEBS Letters* 581: 2337–2347
- Moran N. 2015. Rhythmic leaf movements: physiological and molecular aspects. In: S Mancuso, S Shabala, eds. *Rhythms in plants: dynamic responses in a dynamic environment*. Cham, Switzerland: Springer, 57–95.

- Oikawa, T., Ishimaru, Y., Munemasa, S., Takeuchi, Y., Washiyama, K., Hamamoto, S., Yoshikawa, N., Mutara, Y., Uozumi, N. and Ueda, M., 2018. Ion channels regulate nyctinastic leaf opening in *Samanea saman*. *Current Biology*, 28(14), pp.2230-2238.
- Putz, F.E. and Mooney, H.A. eds., 1991. *The biology of vines*. Cambridge University Press. New York.
- Rojasatien, S., Changruenggam, S., Gonmanee, T., & Paomophon, P. 2012. The Study of *Hydrilla verticillata*'s Cyclosis in Microgravity. *J. Sci* 1(1):1-4
- Salisbury, F. B. dan C. W. Ross. 1995. *Fisiologi Tumbuhan*. Terjemahan Diah R. Lukaman dan Sumaryono. Jilid tiga. Cetakan keempat. Penerbit ITB, Bandung.
- Sen, D.J. 2023. Nastic movements due to turgor pressure in plant. *World Journal of Pharmaceutical and Medical Research*, 2023,9(7), 300-305
- Sun, F., Zhang, W., Hu, H., Li, B., Wang, Y., Zhao, Y., et al. (2008). Salt modulates gravity signaling pathway to regulate growth direction of primary roots in *Arabidopsis*. *Plant Physiol.* 146 (1), 178–188
- Went, F., 1926. On growth-accelerating substances in the coleoptile of *Avena sativa*. In *Proc Kon Akad Wetensch Amsterdam* (Vol. 30, pp. 10-19).
- Zlinszky, A., Molnár, B. & Barrfod, A. S. (2017). Not all trees sleep the same – high temporal resolution terrestrial laser scanning shows differences in nocturnal plant movement. *Frontiers in Plant Science* 8, e1814.

# BAB 13

## FISIOLOGI LINGKUNGAN

Oleh Muhammad Parikesit Wisnubroto

### 13.1 Konsep Fisiologi Lingkungan

Apakah Anda pernah berpikir bagaimana kaktus dapat hidup di bioma gurun yang sangat panas? atau juga bagaimana tumbuhan kecil alpine mampu hidup di bioma tundra yang selalu tertutup salju setiap tahunnya. Apakah ada suatu enzim istimewa atau mekanisme hormon tertentu yang memungkinkan tumbuhan-tumbuhan tersebut tetap mampu menjalankan fungsi metabolismenya? Pertanyaan-pertanyaan terkait hubungan organisme dan lingkungannya tersebut beserta berbagai mekanisme fisiologis yang terjadi membuat ilmu fisiologi berkembang membentuk cabang yang terpisah sesuai dengan ruang lingkup pokok bahasannya, yaitu **fisiologi lingkungan** atau **ekofisiologi**.

Secara khusus dalam konteks tumbuhan, cabang ilmu ini membahas tentang pengaruh faktor lingkungan terhadap berbagai proses metabolisme tumbuhan, baik pengaruh yang menguntungkan maupun yang merugikan. Adapun faktor lingkungan dapat dibedakan lagi menjadi lingkungan abiotik dan biotik. Fisiologi lingkungan umumnya lebih menekankan pada pengaruh faktor lingkungan abiotik, antara lain seperti intensitas

cahaya, panjang penyinaran, kualitas cahaya, suhu, serta sifat fisika maupun kimia tanah.

Oleh karena itu, memahami konsep fisiologi lingkungan dari sisi pertanian sangat penting untuk mengoptimalkan pertumbuhan dan produktivitas tanaman budidaya yang selain faktor genetik juga dipengaruhi oleh kondisi lingkungannya, serta untuk mengembangkan strategi pertanian yang berkelanjutan dan adaptasi terhadap perubahan lingkungan yang sedang terjadi.

## 13.2 Faktor Lingkungan yang Memengaruhi Proses Fisiologi

Faktor lingkungan memainkan peran penting dalam memengaruhi proses fisiologi tumbuhan, selain faktor genetik. Menurut Salisbury & Ross (1995), lingkungan dalam arti luas didefinisikan sebagai segala sesuatu yang mengelilingi suatu organisme. Akan tetapi, beberapa bagian dari lingkungan mungkin juga tidak mempunyai efek sama sekali bagi organisme (dalam hal ini tumbuhan), sehingga tidak masuk akal untuk dianggap sebagai bagian dari **lingkungan operasional** tumbuhan yang merupakan gabungan dari berbagai faktor antara lain iklim, edafik (tanah), dan biotik yang berpengaruh terhadap pertumbuhan dan perkembangannya.

Spomer (1973) dari University of Idaho menyatakan bahwa harus ada interaksi yang **nyata** antara lingkungan dengan tumbuhan untuk dapat menjustifikasi faktor lingkungan merupakan bagian dari lingkungan operasional tumbuhan tersebut. Spomer mengilustrasikan hubungan tersebut melalui gelombang suara dari

kerikan jangkrik dengan tumbuhan di sekitarnya. Apabila gelombang suara kerikan melintasi tumbuhan tanpa atau mungkin sedikit menimbulkan perubahan, maka gelombang tersebut bukan merupakan bagian dari lingkungan operasional tumbuhan. Di sisi lain, kerikan jangkrik tersebut merupakan bagian dari lingkungan operasional jangkrik lainnya. Dengan demikian, Spomer mendefinisikan lingkungan operasional secara lebih spesifik dengan menerapkan konsep termodinamika yang menyangkut pemindahan langsung massa atau energi melintasi batas antara suatu organisme dengan lingkungannya.

Menurut Gardner *et al.* (1991), faktor iklim antara lain meliputi cahaya, suhu, air, dan gas (antara lain CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, F<sub>l</sub>, Cl, dan O<sub>3</sub>). Adapun gas-gas tersebut pada umumnya merupakan polutan pada atmosfer – kecuali CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, dan N<sub>2</sub>, – yang pada konsentrasi tinggi dapat berpengaruh pada berbagai proses fisiologi tumbuhan.

Cahaya sangat penting dalam proses fotosintesis, yaitu proses ketika tumbuhan menghasilkan energi dari cahaya matahari. Pertanyaan selanjutnya adalah bagaimana pengaruh cahaya terhadap laju fotosintesis? Apabila ditinjau lebih dalam, sebenarnya terdapat tiga komponen penting dari cahaya yang dapat memengaruhi laju fotosintesis yaitu meliputi intensitas, durasi, dan spektrum cahaya yang tidak akan dibahas secara rinci pada bab ini.

Secara umum, pengaruh cahaya terhadap laju fotosintesis dapat terjadi karena cahaya dibutuhkan baik secara langsung maupun tidak langsung pada reaksi-reaksi dalam proses fotosintesis. Seperti yang telah diketahui bersama, fotosintesis terdiri dari dua tahap reaksi, yaitu reaksi terang dan reaksi gelap/reduksi karbon.

Reaksi terang merupakan reaksi yang memerlukan cahaya **secara langsung** dan berfungsi mengubah energi matahari mejadi daya asimilasi berupa ATP dan NADPH. Terkhusus untuk istilah reaksi gelap atau "*dark*" *reaction* yang kerap ditemukan pada berbagai media pembelajaran, seringkali membuat persepsi pembaca menjadi keliru. Reaksi reduksi karbon ini disebut sebagai reaksi gelap karena reaksi ini **tidak secara langsung** membutuhkan cahaya matahari. Namun demikian, bukan berarti bahwa reaksi ini terjadi ketika kondisi gelap (malam hari). Bahkan pada malam hari reaksi gelap (pembentukan gula) tidak dapat berlangsung, karena reaksi terang - yang menghasilkan daya asimilasi bagi reaksi gelap - juga tidak berlangsung. Berdasarkan uraian tersebut, cahaya memiliki peran yang sangat vital, karena tanpanya tumbuhan tidak dapat melakukan proses fotosintesis untuk dapat tumbuh dan berkembang dengan baik.

Adapun pengaruh suhu juga dapat memengaruhi laju metabolisme tumbuhan. Laju fotosintesis meningkat dengan suhu yang lebih tinggi sampai mencapai suatu titik optimal, sejalan dengan aktivitas enzim fotosintetik. Namun demikian, suhu yang terlalu tinggi dapat mengakibatkan penurunan dalam fotosintesis karena cekaman panas. Adapun suhu juga dapat berpengaruh terhadap pembentukan primordia bunga. Studi kasus pada tanaman kopi misalnya, amplitudo atau perbedaan antara suhu udara maksimum (siang) dan minimum (malam) dalam sehari semalam yang semakin besar dapat meningkatkan rangsangan pada tanaman untuk berbunga. Rahardjo (2021) menyatakan bahwa pembentukan primordia bunga kopi memerlukan suhu optimum pada siang dan malam masing-masing sebesar 30°C dan 23°C (perbedaan suhu maksimum dan minimum mencapai 7°C). Apabila suhu siang hari

turun di bawah 17°C dan suhu malam hari turun di bawah 12°C, maka pembentukan pimordia bunga akan berhenti.

Selain seluruh faktor lingkungan yang telah dijelaskan sebelumnya, ketersediaan air yang cukup juga memegang peranan yang sangat penting bagi tumbuhan. Menurut Lakitan (2008), proses fisiologi yang berlangsung pada tumbuhan banyak sekali melibatkan air atau bahan-bahan yang terlarut dalam air. Air merupakan komponen utama tumbuhan – menyusun sekitar 80-95% biomassa segar – yang berperan penting antara lain dalam proses fotosintesis, transpirasi, maupun sebagai pelarut (Ievinsh, 2023). Berdasarkan uraian tersebut, kekurangan air (kekeringan) dapat menyebabkan stres dan bahkan kematian pada tumbuhan. Di sisi lain, kelebihan air (genangan) juga berdampak tidak baik karena mengurangi aerasi tanah yang selanjutnya dapat berpengaruh terhadap kelangsungan hidup tumbuhan. Selain itu, genangan juga memengaruhi produksi etilen yang dapat menginduksi proses *senescence* pada tumbuhan.

Adapun faktor edafik (tanah) meliputi tekstur, struktur, bahan organik, kapasitas pertukaran kation (KTK), pH, kejenuhan basa, dan ketersediaan nutrisi. Bonner & Varner (1965) mengklasifikasikan 16 unsur esensial (penting) untuk tanaman budidaya meliputi molibdenum, tembaga, seng, mangan, besi, boron, klor, belerang, fosfor, magnesium, kalsium, kalium, nitrogen, oksigen, karbon, dan hidrogen. Selain itu, Epstein (1972) mengklasifikasikan natrium, silikon, dan kobalt sebagai unsur esensial bagi beberapa tumbuhan.

Selain iklim dan edafik, faktor biotik juga dapat berpengaruh terhadap proses fisiologi tumbuhan, walaupun tidak secara khusus dibahas pada fisiologi lingkungan antara lain gulma, serangga, organisme penyebab penyakit, nematode, macam-macam herbivora serta mikro organisme tanah antara lain bakteri pemfiksasi  $N_2$ , bakteri denitrifikasi, serta mikoriza.

### 13.3 Tanggapan Tumbuhan terhadap Lingkungan

Menurut Salisbury & Ross (1995), salah satu hal paling dasar terkait tanggapan tumbuhan terhadap lingkungan adalah kejenuhan dan faktor pembatas. Organisme menanggapi hampir semua variabel lingkungannya dengan mengikuti suatu corak yang jamak. Peningkatan suatu variabel akan menyebabkan efek ketika variabel tersebut mencapai ambang batas tertentu. Setelah itu, tanggapannya akan meningkat sampai sistem menjadi jenuh. Selanjutnya ketika taraf dari variabel tersebut meningkat, respon dari organisme akan tetap sama atau mulai menurun jika pada taraf tersebut meracun.

Shelford (1913) menyatakan bahwa selama penambahan suatu faktor masih menyebabkan peningkatan respons, maka dapat dikatakan faktor berada pada **zona kekahatan**. Selanjutnya, apabila peningkatan faktor tidak mengubah respons, maka faktor berada pada **zona toleransi**. Adapun taraf terendah suatu faktor yang masih dapat memberikan respons tertinggi disebut titik **optimum**. Selanjutnya, apabila penambahan faktor menyebabkan penurunan respons, maka faktor berada pada **zona keracunan**. Adapun fenomena ini kemudian disebut sebagai “Hukum Toleransi Shelford”.

Liebig, salah seorang ahli kimia pertanian terkemuka asal Jerman, pada tahun 1840 melalui bukunya yang berjudul “*Organic chemistry in its applications to agriculture and physiology*” (terjemahan dari bahasa Jerman) memberikan dampak yang besar terhadap perspektif manusia mengenai tumbuhan. Dalam buku tersebut Liebig merumuskan “Hukum Minimum Liebig”, yang menyatakan bahwa pertumbuhan suatu tumbuhan bergantung pada jumlah nutrisi yang diberikan padanya dalam jumlah minimum. Liebig mengilustrasikan konsep batasan menggunakan tong metaforis dengan masing-masing tongkat pada bagian dindingnya mewakili elemen yang berbeda. Tongkat nutrisi yang lebih pendek dari yang lain akan menyebabkan cairan yang terkandung di dalam tong tumpah pada tingkat tersebut. Sebagai ilustrasi, seseorang yang membangun tong setinggi sepuluh kaki akan bekerja sia-sia jika tongkat terakhirnya hanya sepanjang lima kaki, karena air akan tumpah pada level tersebut. Dengan bantuan visual ini, gagasan faktor pembatas bersifat intuitif dan tampak hampir jelas, tetapi mudah diabaikan saat mencoba memperbaiki masalah atau meningkatkan hasil.

Dalam bidang pertanian, implikasi praktis hukum tersebut sangat penting dalam meningkatkan produksi pangan dibandingkan masa sebelumnya. Sebagai contoh, apabila hasil tanaman dibatasi oleh kurangnya jumlah nitrogen, maka unsur tersebut harus diberikan lebih banyak. Apabila nitrogen telah diberikan dalam jumlah yang cukup, mungkin saja fosfor menjadi terbatas dan perlu untuk ditambahkan. Adapun faktor pembatas bukan saja hanya terkait unsur hara, tetapi juga beberapa faktor lain seperti air, konsentrasi karbon dioksida, maupun berbagai macam organisme pengganggu.

Selain hal-hal yang telah dijelaskan tersebut, tanggapan tumbuhan terhadap lingkungannya juga dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis berdasarkan usulan dari Anton Lang pada tahun 1961. Sebagai contoh, tanggapan fotosintesis oleh tumbuhan terhadap cahaya dapat dikategorikan sebagai tanggapan langsung (**tidak tertunda**) yang memiliki sifat tanggapan oleh tumbuhan berubah dengan segera setelah terjadi stimulus lingkungan. Adapun reaksi fotosintesis tersebut berbeda apabila dibandingkan dengan fenomena membengkoknya batang menuju arah cahaya yang tanggapannya terhadap stimulus lingkungan membutuhkan waktu yang lebih lama (**tertunda**). Menurut Salisbury & Ross (1995), fenomena membengkoknya batang menuju arah cahaya memerlukan energi yang lebih besar dari dalam tumbuhan – melalui energi dari metabolisme – dibandingkan energi dari foton (lingkungan) yang mengawali proses pembengkokan tersebut dan begitu pula sebaliknya pada fenomena yang pertama yakni menggunakan energi yang lebih banyak berasal dari perubahan lingkungan untuk menyebabkan terjadinya suatu respons.

Selain kedua hal tersebut, jenis tanggapan organisme lainnya terhadap lingkungan adalah homeostatis yakni tanggapan organisme untuk memelihara keadaan internal tubuhnya pada keadaan yang relatif konstan dalam rangka memastikan proses metabolisme tetap berjalan dengan baik, walaupun terjadi perubahan lingkungan. Dalam konteks tumbuhan, contoh fenomena ini dapat ditemui pada upaya tumbuhan dalam mempertahankan konsentrasi ion  $\text{Ca}^{2+}$  dan fosfat dalam sitoplasmanya melalui pergerakan keluar masuknya ion tersebut melewati membran tonoplas pada vakuola (Boller & Wiemken, 1986). Adapun hal tersebut dimaksudkan untuk mencegah

kerusakan enzim penting dalam sitoplasma akibat keberadaan ion-ion tersebut yang terlalu pekat, walaupun dalam jumlah yang sedikit diperlukan bagi metabolisme sel.

Tanggapan tumbuhan terhadap lingkungannya juga dapat terjadi akibat efek ikutan, yaitu suatu efek kondisi tumbuh yang terbawa pada dua atau lebih generasi berikutnya. Highkin & Lang (1966) mengungkapkan bahwa tanaman buncis yang ditumbuhkan selama beberapa generasi pada suatu kondisi lingkungan yang tidak optimal, maka setiap generasi berikutnya akan tumbuh lebih jelek dibandingkan generasi sebelumnya. Adapun saat Hughkin mengubah keadaan lingkungan menjadi lebih optimum, diperlukan sedikitnya tiga generasi buncis untuk dapat tumbuh dengan baik. Hal tersebut menunjukkan bahwa efek lingkungan dapat terbawa dari satu generasi ke generasi selanjutnya, karena embrio mungkin terkondisikan pada kondisi lingkungan yang tercekam sehingga efeknya terbawa hingga generasi berikutnya.

### **13.4 Cekaman dan Adaptasi Tumbuhan dalam Menghadapinya?**

Dalam konteks biologi, Levitt (1972) mendefinisikan cekaman dari ilmu fisika. Dia menjelaskan bahwa cekaman biologi adalah segala perubahan kondisi lingkungan yang dapat merugikan pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan. Salisbury & Ross (1995) menyatakan bahwa segala perubahan kondisi lingkungan yang mengakibatkan tanggapan tumbuhan menjadi lebih rendah daripada tanggapan optimum dapat dikatakan sebagai **cekaman**.

Berdasarkan hal tersebut, kondisi tumbuhan tingkat tinggi yang hanya mampu bergerak secara pasif membuatnya harus memiliki strategi khusus untuk beradaptasi menghadapi berbagai macam cekaman lingkungan yang mungkin dihadapi selama fase hidupnya. Adapun salah satu cabang penting dalam ekofisiologi yang secara khusus membahas mengenai cara tumbuhan menanggapi kondisi lingkungan yang menyimpang tersebut adalah **fisiologi cekaman**.

Cekaman lingkungan merupakan suatu keadaan yang menggambarkan terdapat perbedaan potensi di lingkungan dan juga di dalam tumbuhan sehingga terdapat gaya penggerak untuk memindahkan energi atau bahan ke dalam atau ke luar tumbuhan yang menyebabkan adanya tanggapan terhadap cekaman. Adapun pada bagian selanjutnya akan dipaparkan mekanisme adaptasi tumbuhan untuk dapat bertahan hidup pada beberapa kondisi cekaman lingkungan antara lain **kekeringan, suhu tinggi**, dan **logam berat**.

Cekaman kekeringan mempunyai berbagai macam definisi tergantung dari sudut pandang masing-masing bidang ilmu. Dari perspektif ilmu biologi dapat diartikan sebagai suatu kondisi yang terjadi akibat berkurangnya kelembaban dan ketersediaan air tanah terutama di sekitar daerah perakaran tumbuhan sehingga menurunkan tingkat penyerapan air dan nutrisi terlarut dari tanah menuju jaringan tanaman (Rini *et al.*, 2020).

Cekaman kekeringan merupakan salah satu bentuk stres abiotik yang mengakibatkan tidak terpenuhinya kebutuhan air pada tumbuhan secara optimal. Secara umum, kondisi kekurangan air merupakan faktor pembatas utama untuk pertumbuhan dan

perkembangan tumbuhan, karena air menyusun tidak kurang dari 55-85% bagian dari berat segar jaringan tumbuhan herba atau sekitar 30-60% berat segar tumbuhan berkayu (Meyer, 2020). Kekurangan air mengakibatkan perubahan di tingkat molekuler, seluler, fisiologi dan morfologi. Perubahan yang terjadi dapat berupa pengurangan volume sel, penurunan luas daun, perubahan ekspresi gen, perubahan produksi maupun aktivitas enzim dan hormon, peningkatan sensitivitas stomata, dan juga penurunan laju fotosintesis. Kekurangan air yang terus-menerus akan menyebabkan perubahan tidak dapat balik dan pada akhirnya menyebabkan tumbuhan akan mati (Winarno, 1991).

Tumbuhan dapat beradaptasi terhadap cekaman kekeringan di lingkungan operasionalnya melalui tiga strategi utama yakni *drought escape*, *drought avoidance*, dan *drought tolerance*, ataupun dapat menggunakan kombinasi dari ketiganya (Sopandie, 2013; Yadav & Sharma, 2016). Strategi tersebut selanjutnya dibalut oleh tumbuhan melalui berbagai macam bentuk adaptasi morfologi, fisiologi, biokimia, serta molekuler sebagai satu kesatuan sistem adaptasi (Zlatev & Lidon, 2012).

*Drought escape* (melarikan diri) berhubungan erat dengan cara tumbuhan untuk dapat menyelesaikan siklus hidupnya **sebelum menghadapi** kondisi lingkungan yang tidak menguntungkan atau dengan kata lain tumbuhan memanfaatkan sumber daya yang ada untuk dapat berbunga dan berbuah lebih awal sebelum mengalami cekaman kekeringan. Adapun strategi ini banyak dijumpai pada tanaman semusim yang bersifat *native* di daerah arid yang mempunyai presipitasi hujan sangat rendah (Touchette *et al.*, 2007).

Strategi selanjutnya adalah *drought avoidance* (penghindaran), yang pada umumnya dikembangkan oleh tumbuhan pada saat awal mula terpapar oleh cekaman kekeringan. Adapun bentuk adaptasi ini berfokus pada cara tumbuhan dalam menjaga ketersediaan air dalam situasi kekurangan air di lingkungan operasionalnya. Dalam hal ini, tumbuhan mengembangkan adaptasi fisiologi, yakni melalui penurunan laju transpirasi untuk mencegah kehilangan air secara berlebihan dengan melakukan pengaturan pada stomata yang distimulasi oleh fitohormon asam absisat (ABA). Selain itu, sistem perakaran akan mengembangkan suatu adaptasi morfologi untuk memaksimalkan fungsi akar dalam proses absorpsi air dengan mengambil air dari lingkungan ke tanaman selama kekeringan, yang ditandai dengan meningkatnya rasio akar/tajuk tumbuhan.

Sementara itu, strategi *drought tolerance* (toleransi) dapat diterjemahkan sebagai bentuk penyesuaian osmotik dari tumbuhan. Adapun mekanisme penyesuaian osmotik melibatkan proses biokimia pada tingkat sel terutama untuk mempertahankan turgiditas sel dengan cara menurunkan potensial air melalui akumulasi zat terlarut (solute) dalam sel, antara lain seperti prolin dan glisin betain. Hal tersebut sesuai dengan prinsip osmosis yang mana pelarut (air) akan mengalir dari keadaan potensial air tinggi menuju potensial air yang rendah hingga keseimbangan ekuilibriumnya tercapai dan menyebabkan turgiditas sel tetap terjaga.

Namun demikian, mekanisme penutupan stomata yang ditunjukkan untuk menahan kehilangan air berlebih ternyata memiliki konsekuensi tersendiri, terutama pada tumbuhan C3 yang dapat menimbulkan terjadinya cekaman oksidatif, yakni suatu keadaan lingkungan yang mengalami peningkatan *Reactive Oxygen*

*Spesies (ROS)* akibat adanya suatu over reduksi dari proses fotosintesis. Hal ini terjadi dikarenakan senyawa reduktan yang tidak termanfaatkan akibat CO<sub>2</sub> yang terhambat selama terjadinya proses cekaman kekeringan. Peningkatan ROS yang bersifat radikal bebas dapat menyebabkan ketidakseimbangan antara ROS tersebut dan status antioksidan yang ada di dalam tumbuhan. Akan tetapi, pada tumbuhan yang toleran terhadap cekaman akan melakukan suatu adaptasi dengan cara memproduksi senyawa-senyawa yang bersifat antioksidan walaupun tetap memiliki batasan tertentu dalam meminimalisir efek dari cekaman yang diterima (Farooq *et al.*, 2009).

Adapun pada jenis tumbuhan C<sub>4</sub> dan CAM telah mengembangkan strategi dalam penangkapan CO<sub>2</sub> untuk pembentukan gula pada kondisi ketersediaan air yang terbatas. Tumbuhan C<sub>4</sub> telah mengembangkan mekanisme yang efisien dalam pengikatan CO<sub>2</sub> oleh Rubisco. Tanaman C<sub>4</sub> telah mengembangkan anatomi daun khusus, di mana sel seludang berkas pengangkutnya (*bundle sheat cells*) memiliki kloroplas, di samping sel mesofilnya seperti tanaman C<sub>3</sub>. Sebagai pengganti fiksasi CO<sub>2</sub> pada siklus Calvin, CO<sub>2</sub> dikonversi ke dalam senyawa organik dengan 4 atom karbon yang memiliki kemampuan meregenerasi ulang CO<sub>2</sub> dalam kloroplas pada sel seludang berkas pengangkutnya.

Sementara itu, tumbuhan CAM seperti kaktus mengembangkan mekanisme khusus yang menyebabkan fiksasi CO<sub>2</sub> hanya terjadi pada malam hari – karena stomatanya tertutup pada siang hari – yang dapat menekan laju kehilangan air dari tubuhnya (transpirasi). Selain itu, tumbuhan jenis CAM juga dapat menyimpan air dalam jaringan sukulennya. Dengan demikian,

kombinasi strategi penyimpanan air yang optimal dan upaya menekan laju kehilangan air yang sedemikian rendah (stomata menutup pada siang hari serta didukung oleh lapisan kutikula yang tebal) menyebabkan tumbuhan jenis ini mampu bertahan hidup pada kondisi lingkungan yang ekstrem tersebut.

Kondisi kekeringan pada umumnya disertai oleh adanya peningkatan suhu yang merupakan salah satu cekaman lingkungan penting karena dunia diproyeksikan akan mengalami kenaikan suhu yang berkisar antara 1 hingga 3,7°C di akhir abad ini (Pachauri *et al.*, 2014). Sifat destruktif suhu tinggi terhadap tumbuhan terutama berdampak pada struktur anatomi kloroplas yang selanjutnya memengaruhi fungsi fotosintesis. Wahid *et al.* (2007) melaporkan terjadinya perubahan struktur anatomi pada tingkat subseluler pada tumbuhan yang terdampak cekaman suhu tinggi berupa perubahan struktur organisasi membran tilakoid yang merupakan tempat terjadinya reaksi terang pada proses fotosintesis karena mengalami pembengkakan. Adapun kondisi cekaman suhu tinggi dapat menyebabkan gangguan keseimbangan aliran elektron dari *oxygen-evolving complex* (OEC) pada sisi akseptor PSII menuju pusat reaksi PSI (De Ronde *et al.*, 2004). Zhang *et al.* (2019) menambahkan bahwa PSII (salah satu fotosistem pada membran tilakoid) merupakan komponen yang paling peka terhadap cekaman suhu tinggi.

Secara molekuler, tumbuhan dan berbagai organisme lain telah dilaporkan merespon cekaman suhu tinggi melalui sintesis dan akumulasi protein spesifik yang disebut *HSPs* (*heat shock proteins*). Menurut Sopandie (2013), *HSPs* adalah molekuler *chaperones* yang melindungi konfigurasi dan fungsi protein sel dalam kondisi cekaman suhu tinggi yang dapat menghasilkan. Salisbury & Ross

(1995) menambahkan bahwa *HSPs* berperan dalam melindungi enzim dan asam amino esensial dari denaturasi.

Selain kekeringan dan suhu tinggi, cekaman lingkungan yang juga sering menjadi perhatian adalah logam berat dan telah menjadi masalah yang serius di dunia seiring dengan meningkatnya industrialisasi dan gangguan siklus biogeokimia alami. Dufus (2002) menyatakan bahwa dalam konteks ilmu kimia logam berat didefinisikan sebagai logam transisi dengan nomor atom lebih besar dari 20 dan berat jenis lebih besar dari 5 g/cm<sup>3</sup>. Handayanto *et al.* (2017) menambahkan bahwa dalam konteks biologi, logam berat merupakan unsur yang dalam konsentrasi sedikit bersifat racun bagi tumbuhan dan hewan antara lain meliputi Hg, Cd, As, Cr, dan Pb.

Logam berat pada kadar yang rendah terbukti dapat menyebabkan gangguan pada banyak proses biokemis dan fisiologis seperti destruksi membran, penurunan laju transpirasi, gangguan sintesis protein, inaktivasi enzim dan peroksidase lipid (Wani *et al.*, 2012). Hal tersebut selanjutnya dapat menghambat proses pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan (Wisnubroto *et al.*, 2021; Wisnubroto *et al.*, 2023).

Pada tingkat molekuler, kelebihan logam berat dalam sel tumbuhan dapat mengganggu keseimbangan reaksi redoks seluler dan dapat berpengaruh secara langsung maupun tidak langsung pada cekaman oksidatif, tergantung pada karakteristik kimianya (Smeets *et al.*, 2009). Logam yang tergolong redoks aktif seperti Cr, Cu, Mn, dan Fe, dapat secara langsung menginduksi produksi spesies oksigen reaktif melalui reaksi Fenton dan Haber-Weiss (Yruela, 2005). Sebaliknya, logam redoks inaktif seperti Cd, Ni, Hg, Zn, dan Al hanya menginduksi produksi ROS melalui mekanisme

tidak langsung seperti penghambatan enzim antioksidan atau stimulasi enzim penghasil ROS (NADPH oksidase) (Bücker-Neto *et al.*, 2017; Smeets *et al.*, 2008). Selama proses tersebut, ROS terbentuk dan dengan demikian menggeser keseimbangan redoks ke sisi pro-oksidatif.

Sel-sel tanaman pada umumnya secara kontinyu membentuk ion-ion radikal bebas dalam bentuk ROS sebagai hasil samping dari metabolisme aerob yang berlangsung di berbagai kompartemen seluler seperti dinding sel, sitoplasma, peroksisom, mitokondria, dan kloroplas (Vianello *et al.*, 2007). Pembentukan ion-ion radikal bebas seperti ROS akan mengalami peningkatan apabila tumbuhan mengalami cekaman baik abiotik maupun biotik. Akumulasi ion radikal bebas dalam bentuk ROS pada konsentrasi tinggi akan merusak komponen-komponen seluler dan makromolekul termasuk membran plasma, asam nukleat, dan protein.

Dalam menghadapi cekaman oksidatif ini tanaman memiliki sistem pertahanan enzimatis antara lain seperti superoksida dismutase (SOD), katalase (CAT), dan peroksidase (POD). Selain itu tumbuhan juga mempunyai sistem pertahanan non enzimatis yang bersifat antioksidan antara lain asam askorbat (AsA), tokoferol, karotenoid, alkaloid, prolin, dan senyawa fenolik (flavonoid, tanin, dan lignin) yang bertindak sebagai penambat ROS (Sharma *et al.*, 2012). Menurut Yuhernita & Juniarti (2011), antioksidan memiliki struktur molekul yang memungkinkan mereka untuk melepaskan elektronnya kepada molekul radikal bebas tanpa mengganggu fungsinya sehingga dapat menghentikan reaksi berantai dari radikal bebas. Adapun kedua sistem pertahanan tersebut bekerja secara sinergis untuk menetralkan pengaruh toksik senyawa ROS, sehingga ROS hanya terdapat dalam jumlah kecil

yang diperlukan untuk menjaga fungsi sel tetap normal. Malecka *et al.* (2014) menyatakan bahwa pembentukan ROS juga mempunyai fungsi yakni sebagai efektor dan regulator dalam proses kematian sel terprogram.

Wisnubroto *et al.* (2018) dalam penelitiannya pada bibit kelapa sawit yang diberi cekaman logam berat aluminium (Al) menemukan mekanisme kompartementasi Al pada jaringan epidermis akar yang kemungkinan besar disebabkan oleh mekanisme tanaman dalam mencegah logam berat tersebut untuk menyebar ke seluruh jaringan tanaman, sehingga diakumulasi pada jaringan yang tidak sensitif terhadap Al. Hal tersebut sejalan dengan penelitian Wang *et al.* (2016) yang menyatakan bahwa sel epidermis mengalami kerusakan serius dan vakuola membesar akibat adanya penambahan  $Al^{3+}$  pada media tanam.

Selain cekaman lingkungan yang telah diuraikan tersebut di atas, terdapat banyak lagi bentuk cekaman lingkungan lainnya antara lain salinitas, suhu rendah, serta berbagai polutan atmosfer. Namun demikian, cekaman kekeringan merupakan yang paling utama dan menjadi faktor penyebab gangguan pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan di seluruh dunia. Adapun mekanisme yang lebih lebih detail mengenai cara tumbuhan menanggapi berbagai kondisi lingkungan yang tidak ideal akan dibahas secara khusus pada cabang ilmu fisiologi cekaman.

## DAFTAR PUSTAKA

- Boller, T & Wiemken, A. 1986. Dynamics of vacuolar compartmentation. *Annual Review of Plant Physiology* 37: 137–164.
- Bonner, J. & Varner, J. E. 1965. *Plant Biochemistry*. Academic Press: New York.
- Bücker-Neto, L., Paiva, A. L. S., Machado, R. D., Arenhart, R. A. & Margis-Pinheiro, M. 2017. Interactions between plant hormones and heavy metals responses. *Genetics and Molecular Biology* 40(1): 373–386.
- De Ronde, J. A. D., Cress, W. A., Kruger, G. H. J., Strasser, & R. J., Staden, J. V. 2004. Photosynthetic response of transgenic soybean plants containing an Arabidopsis P5CR gene, during heat and drought stress. *J. Plant Physiol.* 61: 1211–1244.
- Duffus, J. H. 2002. Heavy metals-a meaningless term?. *Pure and Applied Chemistry* 74(5): 793–807.
- Epstein, E. 1972. *Mineral Nutrition of Plants: Principles and Perspective*. Wiley: New York.
- Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D. & Basra, S. M. A. 2009. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development* 29(1): 185–212.
- Gardner, F. P., Pearce, R. B., & Mitchell, R. L. 1991. *Fisiologi Tanaman Budidaya*. Edisi ke-1. (H. Susilo, Terjemahan). UI-Press: Jakarta.

- Handayanto, E., Nuraini, Y., Muddarisna, N., Syam, N., & Fiqri, A. 2017. Fitoremediasi dan *Phytomining* Logam Berat Pencemar Tanah. UB Press: Malang.
- Highkin, H. R. & Lang, A. 1966. Residual effect of germination temperature on the growth of peas. *Planta* 68: 94–98.
- Ievinsh, G. 2023. Water content of plant tissues: so simple that almost forgotten?. *Plants* 12(6): 1 – 34.
- Lakitan, B. 2008. Dasar-dasar Fisiologi Tumbuhan. PT Raja Grafindo: Jakarta.
- Levitt, J. 1972. Responses of Plants to Environmental Stresses. Academic Press: New York.
- Malecka, A., Piechalak, A., Zielinska, B., Kutrowska, A., & Tomaszewska, B. 2014. Response of the pea roots defense systems to the two-element combinations of metals (Cu, Zn, Cd, Pb). *Acta Biochimica Polonica* 61(1): 23–28.
- Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., Church, J. A., Clarke, L., Dahe, Q. D., Dasgupta, P., Dubash, N. K., Edenhofer, O., Elgizouli, I., Field, C. B., Forster, P., Friedlingstein, P., Fuglestvedt, J., Gomez-Echeverri, L., Hallegatte, S., ... & van Ypersele, J. P. (2014). Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva. Switzerland. IPCC.
- Rahardjo, P. 2021. Panduan Berkebun Kopi. Penebar Swadaya: Jakarta.

- Rini, D. S., Budiarmo, Gunawan, I., Agung, R. H., & Munazar, R. 2020. Mekanisme respon tanaman terhadap cekaman kekeringan. *Berita Biologi* 19(3): 373–384.
- Salisbury, F. B. & Ross, C. W. 1995. Fisiologi Tumbuhan. Jilid 3. (D. R. Lukman & Sumaryono, Terjemahan). Penerbit ITB: Bandung.
- Sharma, P., Jha, A. B., Dubey, R. S. & Pessarakli, M. 2012. Reactive oxygen species, oxidative damage and anti-oxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. *J. Bot.* 2012: 1–26.
- Shelford, V. E. 1913. *Animal Communities in Temperate America*. University of Chicago Press: Chicago.
- Smeets, K., Ruytinx, J., van Belleghem, F., Semane, B., Lin, D., Vangronsveld, J., & Cuypers, A. 2008. Critical evaluation and statistical validation of a hydroponic culture system for *Arabidopsis thaliana*. *Plant Physiol. Biochem.* 46: 212–218.
- Smeets, K., Opdenakker, K., Remans, T., van Sanden, S., van Belleghem, F., Semane, B., Horemans, N., Guisez, Y., Vangronsveld, J., & Cuypers, A. 2009. Oxidative stress-related responses at transcriptional and enzymatic levels after exposure to Cd or Cu in a multipollution context. *J. Plant Physiol.* 166: 1982–1992.
- Sopandie, D. 2013. Fisiologi Adaptasi Tanaman terhadap Cekaman Abiotik pada Agroekosistem Tropika. IPB Press: Bogor.
- Spomer, G. G. 1973. The concepts of “interaction” and “operational environment” in environmental analyses. *Ecology* 54(1): 200–204.

- Touchette, B. W., Iannacone, L. R., Turner, G. E., & Frank, A. R. 2007. Drought tolerance versus drought avoidance: A comparison of plant-water relations in herbaceous wetland plants subjected to water withdrawal and repletion. *Wetlands* 27: 656–667.
- Vianello, A., Zancani, M., Peresson, C., Petrusa, E., Casolo, V., Krajňáková, J., Patui, S., Braidot, E. & Macrì, F. 2007. Plant mitochondrial pathway leading to programmed cell death. *Physiol. Plant.* 129: 242–252.
- Wang, S., Ren, X., Huang, B., Wang, G., Zhou, P., & An, Y. 2016. Aluminium-induced reduction of plant growth in alfalfa (*Medicago sativa*) is mediated by interrupting auxin transport and accumulation in roots. *Sci Rep.* 6: 1–13.
- Wani, P. A., Khan, M. S., & Zaidi, A. 2012. Toxic effects of heavy metals on germination and physiological processes of plants. *In: A. Zaidi, P.A. Wani & M.S. Khan (Eds.). Toxicity of Heavy Metals to Legumes and Bioremediation.* Springer-Verlag. Wien. 45–66.
- Winarno, F. G. 1991. Kimia Pangan dan Gizi. Gramedia Pustaka Utama: Jakarta.
- Wisnubroto, M. P., Putra, E. T. S., & Kurniasih, B. 2018. Tanggapan Anatomis dan Pertumbuhan Bibit Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) Hibrida terhadap Cekaman Aluminium. Fakultas Pertanian. Universitas Gadjah Mada. Skripsi.

- Wisnubroto, M. P., Putra, E. T. S., & Kurniasih, B. 2021. Effects of spent and deoiled bleaching earth filler-based npk fertilization on the soil nutrient status and growth of soybean (*Glycine max* (L.) Merrill). *Caraka Tani: Journal of Sustainable Agriculture* 36(2): 213-226.
- Wisnubroto, M. P., Putra, E. T. S., & Kurniasih, B. 2023. Agronomic responses of soybean (*Glycine max* L. merrill) to spent and deoiled bleaching earth filler-based NPK fertilization. *JUATIKA* 5(1): 172–184.
- Yadav, S. & Sharma, K. D. 2016. Molecular and morphophysiological analysis of drought stress in plants. In: Rigobelo EC, ed. Plant growth. Rijeka: InTech, pp. 149–173.
- Yruela, I. 2005. Copper in plants. *Braz J Plant Physiol.* 17: 145–146.
- Yuhernita, Y. & Juniarti, J. 2011. Analisis senyawa metabolit sekunder dari ekstrak metanol daun surian yang berpotensi sebagai antioksidan. *Makara J. Sci.* 15(1): 48–52.
- Zhang, S. B., Deng, Q. L., & Hao, Y. J. 2019. Effects of high temperature and high light on photosystem II activity in leaves of two *Bauhinia* species. *Photosynthetica* 57(4): 1094–1099.
- Zlatev, Z. & Lidon, F. C. 2012. An overview on drought induced changes in plant growth, water relations and photosynthesis. *Emirates Journal of Food and Agriculture* 24: 57–72.

## BIODATA PENULIS



### **Dr. Mismawarni Srma Ningsih, SSi. MSi.**

Dosen Program Studi Teknologi Produksi Tanaman  
Perkebunan, Jurusan Budidaya Tanaman, Politeknik Pertanian  
Negeri Payakumbuh, Sumatra Barat

Penulis dilahirkan di Padang, Sumatra Barat pada tanggal 4 Desember 1974. Penulis adalah dosen tetap Program Studi Teknologi Produksi Tanaman Perkebunan, Jurusan Budidaya Tanaman, Politeknik Pertanian Negeri Payakumbuh, Sumatra Barat, dan sudah berkecimpung di dunia pendidikan sejak tahu 1999. Menyelesaikan pendidikan S1 dan S2 pada Jurusan Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Andalas. Pendidikan S3 juga di tempuh di Universitas Andalas, tapi sesuai dengan tuntutan tugas, maka Program Study yang diambil adalah Ilmu-Ilmu Pertanian. Tri Darma Perguruan Tinggi merupakan kewajiban yang harus kami jalani setiap hari, menulis merupakan salah satu wujudnya pelaksanaannya. Makanya penulis dengan segala keterbatasan ikut serta dalam penulisan bookchapter ini. Bila ada masukan dan saran yang bersifat membangun untuk kesempurnaan tulisan di kemudian hari diharapkan menghubungi penulis melalui e-mail: [mismawarnisrima@gmail.com](mailto:mismawarnisrima@gmail.com)

## BIODATA PENULIS



**Dr. Edi Susilo, SP., M.Si**

Dosen Program Studi Agroteknologi  
Fakultas Pertanian Universitas Ratu Samban

Penulis lahir di Ngawi tanggal 12 April 1977. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Agroteknologi Fakultas Pertanian Universitas Ratu Samban. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Program Studi Agronomi Jurusan Budidaya Pertanian Universitas Djuanda Bogor tahun 2000 dan melanjutkan S2 pada Program Studi Agronomi Sekolah Pascasarjana Institut Pertanian Bogor (IPB) Tahun 2004. Melanjutkan S3 pada Program Studi Ilmu Pertanian Fakultas Pertanian Universitas Bengkulu Tahun 2023. Penulis menekuni bidang Ilmu Gulma, Pangan Alternatif atau Fungsional, dan Pertanian Organik khususnya Potensi Pengembangan Tanaman Sorgum di Lahan Marginal : Kajian Alelopati Sebagai Bioherbisida. Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: [susilo\\_agr@yahoo.com](mailto:susilo_agr@yahoo.com)

## BIODATA PENULIS



### **Dr. Rahmadina, M.Pd**

Dosen Fakultas Sains dan Teknologi Prodi Biologi Universitas Islam Negeri Sumatera Utara

Penulis lahir dari pasangan Syawaluddin dan Mahrilina, penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Penulis dilahirkan di Medan pada tanggal 23 Mei 1986. Penulis telah menikah dan dikaruniai satu orang putra. Penulis menempuh pendidikan Sekolah Dasar di SD 066053 Medan dan lulus tahun 1998, melanjutkan Pendidikan sekolah menengah pertama di SMP Negeri 13 Medan dan lulus tahun 2001, Pendidikan lanjutan jenjang menengah atas di SMA Negeri 8 Medan dan lulus tahun 2004. Penulis melanjutkan Pendidikan Sarjana di Universitas Negeri Medan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam pada program studi Pendidikan Biologi dan lulus tahun 2008, melanjutkan Pendidikan program magister di Universitas Negeri Medan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam pada Program Studi Pendidikan Biologi lulus pada tahun 2013.

Pendidikan terakhir jenjang Doktoral S3 Ilmu Biologi di Universitas Sumatera Utara lulus tahun 2024. Riwayat pekerjaan penulis pernah bekerja sebagai guru biologi di SMA Pelita Medan hingga tahun 2014 Penulis merupakan salah satu dosen di UIN Sumatera Utara Fakultas Sains dan Teknologi Prodi Biologi sejak tahun 2016 hingga saat ini.

## **BIODATA PENULIS**



### **Friskia Hanatul Qolby, M.P.**

Dosen Program Studi Pengelolaan Perkebunan  
Jurusan Bisnis Pertanian Politeknik Pertanian Negeri Payakumbuh

Lahir di Payakumbuh, Sumatera Barat pada tanggal 24 November 1996. Penulis tercatat sebagai lulusan Sarjana Pertanian dari Universitas Andalas pada tahun 2019, dan menyelesaikan pendidikan Magister Pertanian dengan bidang kajian Agronomi pada tahun 2020 melalui program Fasttrack pada Fakultas Pertanian Universitas Andalas. Penulis merupakan anak dari pasangan Darliaspen (ayah) dan Itin Fetra (ibu). Saat ini penulis juga berkarir sebagai dosen pada Program Studi Pengelolaan Perkebunan, Jurusan Bisnis Pertanian, Politeknik Pertanian Negeri Payakumbuh.

Penulis dapat dihubungi melalui e-mail:  
[friskiahanatulqolby@gmail.com](mailto:friskiahanatulqolby@gmail.com)

## BIODATA PENULIS



**Dian Diani Tanjung, S.P., M.Si**

Dosen Program Studi Agroteknologi

Fakultas Pertanian Universitas Muhammadiyah Jakarta

Penulis lahir di Bogor tanggal 10 Januari 1987. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Agroteknologi Fakultas Pertanian Universitas Muhammadiyah Jakarta. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Agroteknologi dan melanjutkan S2 pada Jurusan Agronomi dan Hortikultura. Penulis mengampu mata kuliah Fisiologi Tumbuhan, Teknologi Budidaya Tanaman Semusim dan Tahunan, dan Agroklimatologi.

Penulis dapat dihubungi melalui e-mail:

[dianitanjung.dt@gmail.com](mailto:dianitanjung.dt@gmail.com)

## **BIODATA PENULIS**



**Ulfah Anis, S.T.P., M.Sc.**

Dosen Program Studi Teknologi Industri Pertanian  
Fakultas Pertanian Universitas Bengkulu

Penulis lahir di Pringsewu. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknologi Industri Pertanian Fakultas Pertanian Universitas Bengkulu. Penulis menyelesaikan pendidikan S1 pada Program Studi Ilmu dan Teknologi Pangan Fakultas Pertanian Universitas Sebelas Maret (UNS) Surakarta dan melanjutkan S2 pada Program Studi Ilmu dan Teknologi Pangan Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Gadjah Mada (UGM) Yogyakarta. Penulis mengajar Mata Kuliah Biologi, Mikrobiologi Dasar, dan Mikrobiologi Industri.

Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: [ulfahanis@unib.ac.id](mailto:ulfahanis@unib.ac.id).

## BIODATA PENULIS



### **Dr. Eka Susila N, SP., MP**

Dosen Magister Terapan Program Studi Ketahanan Pangan  
Jurusan Budidaya Tanaman, Politeknik Pertanian Negeri  
Payakumbuh

Penulis lahir di Padang tanggal 11 Agustus 1973. Penulis adalah dosen tetap pada Program Magister Terapan (S2) Program Studi Ketahanan Pangan, Program Studi Hortikultura dan Program Studi Teknologi Produksi Tanaman Pangan yang tergabung pada Jurusan Budidaya Tanaman, Politeknik Pertanian Negeri Payakumbuh. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Budidaya Tanaman Universitas Andalas pada tahun 1997 dan melanjutkan S2 pada Jurusan Agronomi pada tahun 2003. Pada tahun 2018 penulis menyelesaikan Program Doktor bidang Ilmu Pertanian di Universitas yang sama. Penulis menekuni bidang ilmu pertanian (Hortikultura). Salah satu mata kuliah yang diampu adalah Fisiologi Tumbuhan.

Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: [ekasusila38@yahoo.com](mailto:ekasusila38@yahoo.com)

## **BIODATA PENULIS**



**Dr. Nurul Huda Panggabean, S.Pd., M.Si**

Dosen Program Studi Biologi

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas  
Negeri Medan

Penulis lahir di Binjai 12 Februari 1988. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Biologi Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Medan. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Pendidikan Biologi di Universitas Negeri Medan melanjutkan S2 pada Jurusan Biologi di Universitas Sumatera Utara dan melanjutkan S3 pada jurusan Biologi Program Studi Ilmu Biologi di Universitas Sumatera Utara.

Penulis dapat dihubungi melalui e-mail:  
[nurulhudapanggabean@gmail.com](mailto:nurulhudapanggabean@gmail.com)

## BIODATA PENULIS



### **Dr. Ir. Sapto Priyadi, MP.**

Dosen Program Studi Agroteknologi  
Fakultas Pertanian Universitas Tunas Pembangunan

Penulis lahir di Boyolali tanggal 8 Januari 1961. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Fakultas Pertanian Universitas Tunas Pembangunan Surakarta. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Budidaya Pertanian, melanjutkan S2 pada Program Studi Teknologi Pengolahan Hasil Perkebunan dan melanjutkan S3 pada Program Studi Ilmu Pangan – Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Gadjah Mada. Penulis menekuni bidang Menulis Karya Ilmiah “Stres Logam Berat, dan Komponen Bioaktif Tanaman (Metabolit Sekunder) – dalam konteks Keamanan Pangan”.

Penulis dapat dihubungi melalui e-mail:  
[saptopriyadi@lecture.utp.ac.id](mailto:saptopriyadi@lecture.utp.ac.id)

## BIODATA PENULIS



**Jumaria Nasution, S.Pd., M.Sc**

Dosen Program Studi Agroteknologi  
Fakultas Pertanian Universitas graha nusan

Penulis lahir di Padang tanggal 19 Oktober 1990. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Agroteknologi Fakultas Pertanian di Universitas Graha Nuaantara Menyelesaikan pendidikan S1 pada jurusan pendidikan Biologi di Universitas Muhammadiyah Tapanuliselatan pada tahun 2013 dan melanjutkan S2 pada Fakultas Biologi di Universitas Gadjah Mada mengambil konsentrasi botani. Penulis menekuni bidang ilmu botani utamanya pada bidang fisiologi tumbuhan.

Penulis aktif menulis dalam jurnal ilmiah dan ini merupakan buku kedua karya pada bidang fisiologi tumbuhan. Semoga kedepannya Penulis dapat berkarya nyata dalam bidang ilmunya dan memberikan infok yang baik pada bidang pendidikan utama pada konsentrasi bidang ilmu penulis

Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: [ros.jumaria@gmail.com](mailto:ros.jumaria@gmail.com)

## **BIODATA PENULIS**



### **Novi Yulanda Sari, M.Sc.**

Dosen Program Studi engelolaan Perkebunan  
Jurusan Bisnis Pertanian Politeknik Pertanian Negeri Payakumbuh

Novi Yulanda Sari, gadis berdarah minang yang saat ini berdomisili di Lima Puluh Kota, Sumatera Barat. Mengabdikan dirinya untuk turut serta mencerdaskan generasi bangsa dan mencetak lulusan yang siap terjun ke dunia kerja di salah satu perguruan tinggi vokasi terbaik di Sumatera Barat. Saat ini, alumni Politeknik Pertanian Negeri Payakumbuh (D4) dan Universitas Gadjah Mada ini aktif di berbagai kegiatan penelitian dan pengabdian masyarakat, serta turut serta menorehkan ilmu yang dimilikinya dalam bentuk buku.

Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: [noviyulandas@yahoo.com](mailto:noviyulandas@yahoo.com)

## **BIODATA PENULIS**



**Raisa Baharuddin, SP, MSi**

Dosen Program Studi Agroteknologi  
Fakultas Pertanian Universitas Islam Riau

Penulis lahir pada tanggal 20 April 1989 di Manado. Penulis telah menyelesaikan pendidikan S1 pada program studi Agronomi dan Hortikultura di Institut Pertanian Bogor pada tahun 2011. Magister Sains dalam bidang Agronomi dan Hortikultura di Institut Pertanian Bogor dicapai tahun 2014.

Penulis adalah dosen tetap pada Program S1 Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Islam Riau sejak tahun 2015. Pengalaman mengajar pada mata kuliah Fisiologi Tumbuhan Dasar pada tahun 2016-2021.

Penulis dapat dihubungi melalui e-mail:  
[raisabaharuddin@agr.uir.ac.id](mailto:raisabaharuddin@agr.uir.ac.id)

## BIODATA PENULIS

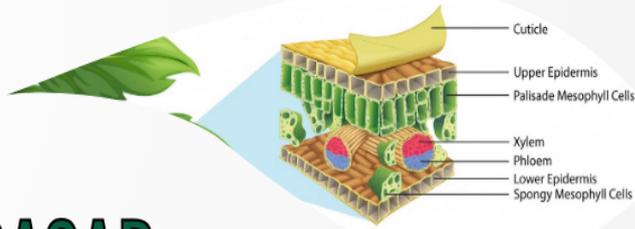


### **Muhammad Parikesit Wisnubroto, S.P., M.Sc.**

Dosen Program Studi Agroekoteknologi  
Fakultas Pertanian Universitas Andalas

Penulis lahir di Medan tanggal 31 Mei 1995. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Agroekoteknologi Fakultas Pertanian Universitas Andalas sejak tahun 2022. Gelar Sarjana Pertanian (S.P.) dan *Master of Science* (M.Sc.) diperoleh dari Fakultas Pertanian, Universitas Gadjah Mada (UGM), Yogyakarta secara berturut-turut pada tahun 2018 dan 2021. Beberapa hasil pemikiran dan penelitiannya dalam bidang nutrisi tanaman dan fisiologi telah diterbitkan di berbagai media massa, jurnal nasional, dan internasional.

Penulis dapat dihubungi melalui e-mail:  
[muhammadparikesit@agr.unand.ac.id](mailto:muhammadparikesit@agr.unand.ac.id) atau  
[wisnubroto.95@gmail.com](mailto:wisnubroto.95@gmail.com)



# DASAR-DASAR FISIOLOGI TUMBUHAN

Fisiologi tumbuhan adalah cabang ilmu biologi yang mempelajari fungsi dan proses kehidupan dalam tumbuhan. Fokus utama dari fisiologi tumbuhan adalah memahami bagaimana tumbuhan tumbuh, berkembang, dan beradaptasi dengan lingkungannya melalui berbagai mekanisme biokimia dan biofisik. Berikut adalah beberapa aspek kunci dalam fisiologi tumbuhan.

Fisiologi tumbuhan menyediakan dasar ilmiah untuk banyak aplikasi praktis, termasuk pertanian, hortikultura, dan konservasi lingkungan. Pemahaman mendalam tentang proses fisiologis ini memungkinkan ilmuwan dan petani untuk mengembangkan praktik yang meningkatkan produktivitas tanaman dan ketahanan terhadap perubahan lingkungan.

Buku ini membahas tentang Pengertian fisiologi tumbuhan, sifat-sifat air, kebutuhan hara hingga proses kompleks seperti pengangkutan bahan organik dan respon tumbuhan terhadap lingkungan

Mismawarni Srima Ningsih, Edi Susilo, Rahmadino, Friskia Hanatul Gholby, Dian Diani Tanjung, Ulfah Anis, Eka Susila N, Nurul Huda Panggabean, Sapto Priyadi, Jumaria Nasution, Novi Yulanda Sari, Raisa Baharuddin, Muhammad Parikesit Wisnubroto