

# Pengantar Fisiologi Tumbuhan

Fisiologi tumbuhan merupakan cabang ilmu yang mengkaji proses-proses yang berlangsung di dalam tumbuhan. Keberlangsungan berbagai proses di dalam tumbuhan dipengaruhi oleh faktor internal dan eksternal yang dapat memberikan pengaruh positif (menguntungkan) dan negatif (merugikan), baik bagi tumbuhan maupun kepentingan manusia. Buku ini membahas mengenai berbagai macam proses yang terjadi pada tumbuhan beserta faktor-faktor yang memengaruhinya meliputi air, transpirasi, nutrisi tanaman, fotosintesis, respirasi, pertumbuhan dan perkembangan tanaman, fitohormon, pergerakan tanaman, fotomorfogenesis, kontrol pembungaan, dan stress fisiologi. Buku ini hadir sebagai referensi bagi mahasiswa Biologi dan Pertanian maupun masyarakat luas yang berkecimpung di bidang pertanian.



PENERBIT BIRU ATMA JAYA  
Jl. Mayor Suyadi No. 7 Plosokandang, Kedungwaru  
Tulungagung, Jawa Timur.  
[penerbitbiruatmajaya@gmail.com](mailto:penerbitbiruatmajaya@gmail.com)

Pengantar Fisiologi Tumbuhan

Arbaul Fauziah, M. Si.



Arbaul Fauziah, M. Si.



# Pengantar Fisiologi Tumbuhan



# **PENGANTAR FISIOLOGI TUMBUHAN**

**Arbaul Fauziah, M.Si**



# PENGANTAR FISILOGI TUMBUHAN

Copyright © Arbaul Fauziah. 2021

Hak cipta dilindungi undang-undang

*All right reserved*

Penulis : Arbaul Fauziah, M.Si.

Layout : Arbaul Fauziah, M.Si.

Desain cover : Bayu Setiawan

Penyelarasan Akhir : Arbaul Fauziah, M.Si.

xix + 235 hlm: 15,5 x 23 cm

Cetakan Pertama, September, 2021

ISBN: 978-623-5529-18-9

Diterbitkan oleh:

**BIRU ATMAJAYA**

Jalan Mayor Sujadi No. 7 Plosokandang Kedungwaru  
Tulungagung

penerbitbiruatmajaya@gmail.com

## **KATA PENGANTAR**

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas segala limpahan rahmat, nikmat, dan taufik-Nya sehingga tersusun buku berjudul “Pengantar Fisiologi Tumbuhan” dengan baik dan lancar. Sholawat beserta salam semoga tetap tercurah kepada Nabi Agung Muhammad saw, pelita bagi seluruh alam.

Buku ini disusun dengan tujuan meningkatkan pengetahuan khususnya bagi mahasiswa maupun masyarakat dalam bidang Biologi dan Pertanian, terutama sebagai referensi bagi pengambil Mata Kuliah Fisiologi Tumbuhan. Buku ini terdiri dari 12 Bab, dengan rincian pendahuluan (pengertian, ruang lingkup, dan hubungan antara Fisiologi Tumbuhan dengan cabang Botani lainnya); air (struktur, sifat, peranan, gerakan, dan potensial air); transpirasi (pengertian, macam, peranan, dan faktor yang memengaruhinya); nutrisi tanaman (macam, peranan, dan gejala defisiensi); fotosintesis, respirasi, pertumbuhan dan perkembangan tanaman (pengertian, tahapan, dan faktor yang memengaruhinya); fitohormon (pengertian, macam, struktur, dan fungsi) pergerakan tanaman (macam dan faktor yang memengaruhinya); fotomorfogenesis (pengertian, sejarah penemuan, sifat fisika-kimia, fungsi, lokasi, dan respon fitokrom terhadap tanaman); kontrol pembungaan (tahapan, faktor yang memengaruhi, dan fotoperiodeisme); dan stress fisiologi (pengertian, macam, mekanisme, dan bentuk respon tanaman). Selain dijelaskan mengenai teori dasar, pada tiap bab juga dilengkapi dengan soal latihan dan penugasan, sehingga sangat cocok digunakan sebagai buku pegangan dalam perkuliahan.

## *Kata Pengantar*

Segala petunjuk, arahan, bantuan, motivasi, dan do'a dari berbagai pihak sangat besar artinya bagi kami dalam terselesaikannya buku ini. Untuk itu, dalam kesempatan ini kami menyampaikan terima kasih kepada rektor UIN Sayyid Ali Rahmatullah Tulungagung, Prof. Dr. Maftukhin, M.Ag yang telah memberikan kesempatan dan dukungan dalam penyusunan buku ini. Kepada kedua orang tua, ayah dan ibu tercinta, Drs. H. A. Malik Bahri, M.Ag (Alm.) dan Umi Kulsum, yang selalu sabar dan tulus dalam mendidik serta memberikan suri tauladan yang baik, kepada kedua mertua, H. Mudjairi Ichsan dan Hj. Siti Munayah yang selalu memberikan dukungan dan do'a. Tak lupa kepada kedua kakak tercinta Dr. M. Fahim Tharaba, M.Pd.I dan A. Ghanaim Fasya, M. Si yang memberikan motivasi untuk selalu mengembangkan bakat dan keilmuan. Ungkapan rasa terimakasih yang dalam terkhusus kepada suami tercinta, Ahmad Fahrudin, M.Pd.I yang setia mendampingi, membimbing, dan memberikan spirit setiap saat.

Semoga buku ini dapat menjadi salah satu referensi Mata Kuliah Fisiologi Tumbuhan Prodi Tadris Biologi UIN Sayyid Ali Rahmatullah Tulungagung sekaligus menambah wawasan bagi semua pembaca. Dan semoga buku ini dapat menjadi amal jariyah bagi penulis dan semua pihak yang telah membantu hingga terselesaikannya buku ini. Aamiin Ya Rabbal 'Alamiin.

Tulungagung, Agustus 2021

Arbaul Fauziah, M.Si



**DAFTAR ISI**

KATA PENGANTAR..... iii

DAFTAR ISI ..... v

DAFTAR GAMBAR ..... xi

DAFTAR TABEL..... xvii

BAB I..... 1

PENDAHULUAN ..... 1

A. Pengertian dan Ruang Lingkup Fisiologi Tumbuhan ..... 1

B. Pembagian Fisiologi Tumbuhan ..... 2

C. Fungsi Fisiologi Tumbuhan ..... 4

D. Hubungan Fisiologi Tumbuhan dengan Cabang Botani  
Lainnya ..... 4

BAB II ..... 7

AIR..... 7

A. Struktur Molekul Air ..... 7

B. Sifat Air ..... 8

C. Fungsi Air Bagi Tumbuhan ..... 13

D. Gerakan Air ..... 16

1. Difusi..... 16

2. Osmosis ..... 22

3. Transportasi Zat Dalam Tumbuhan ..... 25

E. Potensial Air ..... 27

F. Soal Latihan .....	34
BAB III.....	35
TRANSPIRASI.....	35
A. Pengertian dan Macam Transpirasi .....	35
B. Peranan Transpirasi.....	36
C. Faktor yang Memengaruhi Transpirasi .....	38
D. Mekanika Stomata dan Mekanisme Pengendalian Stomata	40
E. Pengukuran Transpirasi .....	42
F. Soal Latihan .....	45
BAB IV.....	47
NUTRISI TANAMAN .....	47
A. Pengertian Unsur Esensial.....	47
B. Macam dan Fungsi Unsur Esensial .....	47
C. Gejala Tanaman yang Kekurangan Unsur Esensial .....	52
D. Soal Latihan .....	63
BAB V .....	65
FOTOSINTESIS .....	65
A. Pengertian Fotosintesis.....	65
B. Pigmen pada Proses Fotosintesis.....	65
C. Reaksi Terang pada Proses Fotosintesis .....	71
D. Mekanisme Aliran Elektron.....	77
1. Aliran Elektron Nonsiklik.....	77
2. Aliran Elektron Siklik.....	80
E. Siklus Calvin dalam Fotosintesis .....	82

*Daftar Isi*

1. Tahapan siklus Calvin .....	83
a. Tahap 1: Karboksilasi.....	86
b. Tahap 2: Reduksi.....	87
c. Tahap 3: Regenerasi.....	89
2. Peraturan dalam siklus Calvin.....	93
F. Faktor-faktor yang Memengaruhi Fotosintesis .....	97
G. Soal Latihan .....	99
BAB VI.....	101
RESPIRASI.....	101
A. Pengertian Respirasi .....	101
B. Macam- macam Respirasi.....	102
C. Tahapan Respirasi.....	103
1. Glikolisis.....	103
2. Siklus Kerb .....	103
3. Fosforilasi Oksidatif.....	104
D. Faktor yang Memengaruhi Respirasi.....	105
E. Soal Latihan .....	106
BAB VII .....	109
PERGERAKAN TANAMAN.....	109
A. Gerak pada Tumbuhan .....	109
B. Macam-Macam Gerak pada Tumbuhan .....	109
C. Faktor yang Memengaruhi Pergerakan Tanaman .....	115
D. Soal Latihan .....	117
BAB VIII.....	119

PERTUMBUHAN DAN PERKEMBANGAN TANAMAN.....	119
A. Pengertian Pertumbuhan dan Perkembangan.....	119
B. Tahapan Pertumbuhan dan Perkembangan Sel .....	123
C. Kinetika Pertumbuhan .....	125
D. Soal Latihan .....	126
BAB IX.....	129
FITOHORMON .....	129
A. Perbedaan Hormon dan Zat Pengatur Tumbuh .....	129
B. Macam-macam Hormon dan ZPT .....	131
1. Auksin .....	131
2. Giberelin.....	135
3. Sitokinin .....	141
4. Etilen .....	151
5. Asam Absisat (ABA).....	160
C. Soal Latihan .....	168
BAB X .....	169
FOTOMORFOGENESIS.....	169
A. Pengertian Fotomorfogenesis .....	169
B. Penemuan dan Sejarah Fitokrom.....	170
C. Sifat Fisika dan Kimia Fitokrom.....	173
D. Spesialisasi Fitokrom .....	183
E. Lokasi Fitokrom .....	186
F. Respon Fitokrom Terhadap Tanaman .....	186
G. Soal Latihan .....	193

*Daftar Isi*

BAB XI.....	195
KONTROL PEMBUNGAAN.....	195
A. Tahapan Perkembangan Tanaman.....	195
1. Perkembangan Meristem dan Organ Bunga .....	195
2. Karakteristik dari Meristem Tunas pada <i>Arabidopsis</i> . .....	196
3. Empat Tipe Perbedaan Organ Bunga Dimulai Seperti Lingkaran-lingkaran Terpisah.....	198
4. Model ABC dalam Penentuan Identitas Organ Bunga .....	200
B. Faktor yang Memengaruhi Tumbuhan Menjadi Berbunga	202
1. Faktor Internal.....	202
2. Faktor Eksternal .....	209
C. Fotoperiodisme .....	210
1. Tanaman Hari Pendek .....	214
2. Tanaman Hari Panjang .....	215
3. Tanaman Hari Netral.....	216
D. Soal Latihan .....	277
BAB XII .....	219
STRESS FISILOGI .....	219
A. Pengertian Stress Fisiologi .....	219
B. Macam-Macam Stress Fisiologi.....	220
1. Cekaman abiotik .....	220
2. Cekaman biotik.....	223
C. Mekanisme Respon Tumbuhan Terhadap Stress Fisiologi	223
D. Macam-macam Respon Tumbuhan terhadap Berbagai Jenis Cekaman.....	225

*Daftar Isi*

E. Soal Latihan .....	232
DAFTAR PUSTAKA.....	233
BIOGRAFI PENULIS .....	235

**DAFTAR GAMBAR**

Gambar 2.1. Struktur molekul air .....8

Gambar 2.2. Gerakan termal molekul yang menyebabkan  
difusi ..... 17

Gambar 2.3. Difusi molekul air melalui bilayer membrane..... 19

Gambar 2.4. Gradien konsentrasi ..... 21

Gambar 2.5. Gerakan molekul zat terlarut saat proses difusi... 23

Gambar 2.6. Proses osmosis ..... 24

Gambar 3.1. Struktur stomata..... 40

Gambar 4.1. Daun yang kekurangan unsur N..... 53

Gambar 4.2. Daun yang kekurangan unsur P ..... 54

Gambar 4.3. Daun yang kekurangan unsur K..... 54

Gambar 4.4. Daun yang kekurangan unsur S ..... 55

Gambar 4.5. Daun yang kekurangan unsur Ca..... 56

Gambar 4.6. Daun yang kekurangan unsur Mg..... 57

Gambar 4.7. Daun yang kekurangan unsur Fe ..... 58

Gambar 4.8. Daun yang kekurangan unsur B..... 59

Gambar 4.9. Daun yang kekurangan unsur Cu ..... 60

Gambar 4.10 .Daun yang kekurangan Zn ..... 60

Gambar 4.11.Daun yang kekurangan unsur Mn..... 61

Gambar 4.12. Daun yang kekurangan unsur Mo..... 62

Gambar 5.1. Spektrum elektromagnetik.....	66
Gambar 5.2. Hubungan produksi oksigen dengan energy cahaya.....	67
Gambar 5.3 Konsep dasar transfer energi selama fotosintesis .....	68
Gambar 5.4 Penyaluran eksitasi dari antena sistem ke reaksi pusat.....	70
Gambar 5.5. Transfer energi dari kompleks pemanenan cahaya.....	72
Gambar 5.6 Organisasi sistem transpor elektron fotosintesis dalam membran tilakoid .....	73
Gambar 5.7. Aliran Elektron dan Oksigen di PII.....	76
Gambar 5.8. Aliran elektron nonsiklik.....	78
Gambar 5.9. Aliran elektron siklik.....	81
Gambar 5.10. Tiga tahap siklus reduksi karbon fotosintesis .....	85
Gambar 5.11. Siklus Calvin untuk fotosintesis dan asimilasi karbon .....	85
Gambar 5.12. Karboksilasi ribulose bisphosphate yang dikatalisis oleh enzim rubisco.....	87
Gambar 5.13. Pengurangan asam fosfoglisarat (PGA) menjadi gliseraldehida-3- fosfat .....	89
Gambar 5.15. Siklus Calvin. Karboksilasi tiga molekul ribulosa -1,5-bifosfat mengarah pada	

*Daftar Gambar*

sintensis bersih satu molekul gliseraldehida -3-fosfat dan regenerasi tiga molekul bahan awal.....	92
Gambar 5.16. Pengaruh cahaya terhadap aktivitas enzim.....	94
Gambar 5.17. Aktivitas Rubisco meningkat dalam terang.....	96
Gambar 8.1. Perubahan berat basah dan berat kering biji selama perkembangannya pada tempat gelab...	121
Gambar 8.2. Proses embriogenesis.....	123
Gambar 8.3. Pertumbuhan alga hijau Chlamydomonas.....	125
Gambar 9.1. Struktur auksin alami.....	131
Gambar 9.2. Struktur auksin buatan.....	132
Gambar 9.3. Pemanjangan sel sebagai respon terhadap Auksin.....	133
Gambar 9.4. Gibberelic acid (GA3) .....	135
Gambar 9.5. Efek GA1 eksogen pada jagung normal dan Kerdil (d1) .....	137
Gambar 9.6. Perkembangan tanduk rusa pada jagung yang kekurangan giberelin (Zea mays).....	139
Gambar 9.7. Kinetin.....	142
Gambar 9.8. Benziladenine (BA).....	142
Gambar 9.9. (a) kalus yang tumbuh dari skutelum biji padi (b) kalus embriogenik yang telah membentuk tajuk muda dan sistem akar.....	144
Gambar 9.10. Penuaan pada daun trifoliolate .....	145

Gambar 9.11. Pemacuan pertumbuhan kuncup samping pada mutan tembakau yang menghasilkan sitokinin berlebihan. Kuncup samping pada tumbuhan jenis liar dan tumbuhan mutan.....	148
Gambar 9.12. Etilen.....	153
Gambar 9.13. Reseptor dan sinyal pada hormon etilen.....	156
Gambar 9.14. Absisi pada daun .....	158
Gambar 9.15. Kalsium Karbida ( $CaCa_2$ ).....	159
Gambar 9.16. Gerakan ABA di apoplast senyawa.....	166
Gambar 10.1. Perbedaan kecambah dalam tempat terang dan gelap .....	173
Gambar 10.2. Spektra serapan fitokrom gandum murni dalam bentuk Pr (garis hijau) dan Pfr (garis biru) yang tumpang tindih .....	175
Gambar 10.3. Struktur dimer phytochrome. Itu monomer diberi label I dan II .....	178
Gambar 10.4. Struktur bentuk Pr dan Pfr dari kromofor (phytochromobilin) dan daerah peptida terikat ke chromophore melalui hubungan thioether.....	179
Gambar 10.5. Peran antagonis antara fitokrom A dan fitokrom B.....	184
Gambar 10.6. Proses simulasi sinar kapada tanaman .....	185

*Daftar Gambar*

Gambar 10.7. Diagram tanggapan kekuatan cahaya .....	188
Gambar 11.1. Tanaman Arabidopsis .....	197
Gambar 11.2. Tunas apikal Arabidopsis.....	198
Gambar 11.3. Organ bunga dimulai secara berurutan oleh meristem bunga Arabidopsis. (A dan B) organ bunga diproduksi sebagai lingkaran yang berurutan (lingkaran konsentris), dimulai dengan sepal dan maju ke dalam. (C) Menurut model kombinatorial, fungsi masing masing lingkaran ditentukan oleh tumpang tindih perkembangan bidang.....	199
Gambar 11.4. Putik Arabidopsis dari dua karpus yang Menyatu .....	199
Gambar 11.5. Interpretasi fenotip mutan homeotik bunga berdasarkan pada model ABC (tipe liar) .....	201
Gambar 11.6. Mutasi pada gen identitas organ bunga mengubah struktur bunga.....	206
Gambar 11.7. Model ABC untuk akuisisi identitas organ bunga di dasarkan pada interaksi tiga berbeda jenis kegiatan gen homeotik bunga : A, B, dan C.....	206
Gambar 11.8. Mutan empat kali lipat (api1, ap2, ap3 / pi, ag) menghasilkan produksi struktur seperti daun di tempat organ bunga.....	207

Gambar 11.9. Panjang hari sebagai fungsi waktu  
sepanjang tahun ..... 213

Gambar 11.10. Tanaman hari panjang dan hari pendek..... 217

**DAFTAR TABEL**

Tabel 4.1. Essensial elements for Most Higher Plants and Concentrations Considered Adequate.....	48
Tabel 10.1. Perbandingan fitokrom tipe 1 dan 21.....	173

# BAB I

## PENDAHULUAN

---

---

### **A. Pengertian dan Ruang Lingkup Fisiologi Tumbuhan**

Seluruh makhluk hidup di bumi, secara langsung atau tidak langsung keberadaannya bergantung pada tumbuhan yang hidup di daratan dan perairan. Satu-satunya organisme di bumi yang mampu menghasilkan energi sendiri (autotrof) adalah tumbuhan, karena tumbuhan adalah satu-satunya organisme yang memiliki klorofil. Setiap tahun lebih dari 200 miliar ton karbon diambil dari udara dalam bentuk  $\text{CO}_2$  dan diolah menjadi senyawa yang dibutuhkan kehidupan melalui proses fotosintesis yang dilakukan oleh tumbuhan.

Fisiologi tumbuhan adalah ilmu yang mempelajari proses metabolisme yang berlangsung dalam tumbuhan. Fisiologi tumbuhan juga mempelajari karakteristik tumbuhan yang meliputi proses sintesis kimiawi yang rumit dan cara berbagai proses tersebut berinteraksi untuk mendukung pertumbuhan tumbuhan. Faktor iklim dan interaksi antara tumbuhan dan organisme penunjang juga menjadi fokus dari fisiologi tumbuhan. Topik-topik yang menjadi fokus pada fisiologi tumbuhan merupakan ruang lingkup yang dikaji dalam ilmu fisiologi tumbuhan.

## **B. Pembagian Fisiologi Tumbuhan**

Fisiologi tumbuhan berkonsentrasi pada proses terjadinya metabolisme pada tumbuhan. Karena perkembangannya yang pesat, yang juga ditopang oleh perkembangan ilmu kimia dan fisika, maka fisiologi tumbuhan sering dipilah-pilah menjadi beberapa cabang sesuai dengan ruang lingkup pokok bahasannya sebagai berikut:

### **1. Fisiologi tanaman**

Fisiologi tanaman mengkaji proses-proses metabolisme pada tanaman budidaya. Karena setiap budidaya tanaman mengharapkan hasil yang dapat dimanfaatkan oleh manusia, maka sudah sepatutnya apabila fisiologi tanaman lebih mengarah pada proses metabolisme yang berkaitan dengan pembentukan dan perkembangan organ hasil. Secara umum, organ hasil dapat berupa buah, biji, daun, akar, umbi, dan lain-lain.

### **2. Fisiologi lepas panen**

Fisiologi lepas panen menelaah tentang proses fisiologi yang terjadi pada organ hasil setelah organ hasil tersebut dipanen. Reaksi- reaksi yang terjadi umumnya bersifat katabolik, yaitu penguraian senyawa-senyawa bermolekul besar (kompleks) seperti pati, selulosa, protein, lemak, dan asam nukleat menjadi senyawa-senyawa bermolekul kecil dengan struktur yang lebih sederhana. Usaha- usaha untuk memanipulasi laju reaksi katabolik yang terjadi untuk tujuan memperpanjang kesegaran organ hasil merupakan manfaat utama dan menjadi unsur dari telaah fisiologi lepas panen.

### 3. Ekofisiologi

Ekofisiologi membahas pengaruh faktor- faktor lingkungan terhadap berbagai proses metabolisme tumbuhan, mencakup pengaruh positif (menguntungkan) dan negatif (merugikan) bagi tumbuhan dan kepentingan manusia. Faktor lingkungan dibedakan menjadi lingkungan abiotik (fisik) dan lingkungan biotik. Ekofisiologi umumnya lebih menekankan pada pengaruh faktor lingkungan abiotik, misalnya pengaruh intensitas cahaya, lama penyinaran, kualitas cahaya, suhu, kelembaban, perubahan konsentrasi gas-gas atmosfer, sifat fisika, dan kimia tanah. Cabang ekofisiologi yang memfokuskan pembahasan pada tanggapan tumbuhan terhadap kondisi lingkungan yang tidak optimal disebut "*stress fisiologi*."

### 4. Fisiologi benih

Proses perkecambahan benih melibatkan berbagai tahapan, yaitu imbibisi, reaktivasi enzim, penguraian bahan simpanan, dan pertumbuhan radikel. Fisiologi benih merupakan cabang fisiologi tumbuhan yang ruang lingkup pembahasannya terdapat pada proses- proses yang berlangsung pada tahapan- tahapan perkecambahan benih. Empat contoh cabang fisiologi tumbuhan yang diuraikan di atas merupakan pembahasan yang paling sering mendapatkan perhatian. Selain itu, masih terdapat beberapa cabang fisiologi tumbuhan lainnya yang mulai berkembang, misalnya fisiologi perkembangan tumbuhan (*developmental physiology*) dan fisiologi herbisida.

## *Pengantar Fisiologi Tumbuhan*

Fisiologi perkembangan tumbuhan mencakup proses pembesaran dan pembelahan sel, pembentukan dan pertumbuhan organ tumbuhan, serta hormon yang berperan dalam fotomorfogenesis. Sedangkan fisiologi herbisida mengkaji tentang cara aksi pestisida dalam memengaruhi metabolisme tumbuhan.

### **C. Fungsi Fisiologi Tumbuhan**

Fisiologi tumbuhan sebagai salah satu cabang ilmu pengetahuan, tentunya memiliki fungsi. Fungsi fisiologi tumbuhan tersebut sebagai berikut:

1. Fisiologi tumbuhan sebagai pedoman manusia dalam memenuhi kebutuhan hidupnya melalui tanaman, baik kebutuhan pangan, obat-obatan, bahan kosmetik, bahan pakaian, untuk keindahan/ estetika, bahan upacara adat, bahan baku industri, dan bahan papan/ pembuatan rumah.
2. Fisiologi tumbuhan sebagai pedoman dalam menciptakan kondisi lingkungan yang nyaman, aman, dan sehat. Tumbuhan dalam melakukan fotosintesis selain menghasilkan karbohidrat, juga menghasilkan oksigen ( $O_2$ ). Ketika siang hari kita duduk di bawah pohon yang rindang, maka akan terasa sejuk dan segar, karena tumbuhan mengeluarkan oksigen dalam proses fotosintesis. Selain itu, dengan kekuatan dan distribusi akarnya yang luas, tumbuhan akan membantu mencegah terjadinya tanah longsor atau erosi.

### **D. Hubungan Fisiologi Tumbuhan dengan Cabang Botani Lainnya**

Meluasnya pokok bahasan dalam berbagai bidang ilmu menyebabkan banyak terjadinya wilayah yang tumpang-tindih antara ilmu yang satu dengan ilmu yang lain. Demikian pula yang terjadi antara fisiologi tumbuhan dengan beberapa

bidang ilmu lainnya, terutama cabang ilmu botani. Banyak topik yang dikaji dalam bidang fisiologi tumbuhan yang berkaitan erat dengan bidang ilmu ekologi, misalnya tentang tanggapan tanaman terhadap perubahan berbagai faktor lingkungan. Besarnya porsi tumpang tindih ini menghasilkan berkembangnya cabang ilmu baru yang disebut sebagai ekofisiologi atau fisiologi lingkungan (*enviromental physiology*).

Ilmu anatomi tumbuhan juga besar kaitannya dan sumbangannya bagi perkembangan fisiologi tumbuhan, misalnya sehubungan dengan pengertian ultrastruktur membran dan organel-organel sel. Pemahaman tentang ultrastruktur dan senyawa penyusun membran tilakoid pada kloroplas mempermudah untuk menerangkan proses perpindahan elektron pada fase cahaya fotosintesis.

Berdasarkan uraian di atas, jelas terlihat keterkaitan antara fisiologi tumbuhan dengan cabang-cabang botani lainnya. Selain itu, fisiologi tumbuhan akan sangat erat kaitannya dengan ilmu-ilmu dasar yang mendukung, seperti ilmu kimia dan fisika.

*Pengantar Fisiologi Tumbuhan*

## BAB II

# AIR

---

---

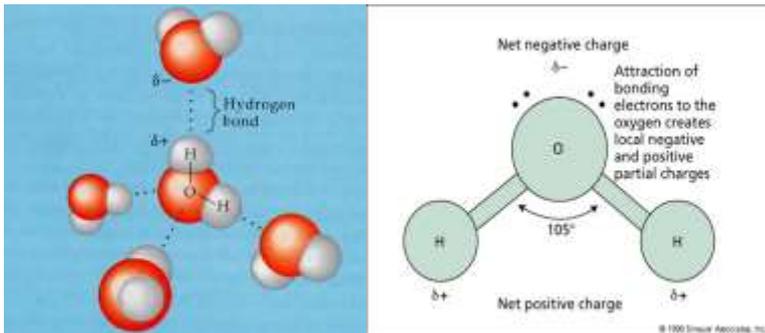
### A. Struktur Molekul Air

Air menyusun sebagian besar massa sel tumbuhan. Di dalam sel tumbuhan terdapat suatu cairan yang dikenal dengan sitoplasma. Sitoplasma hanya mengisi 5-10% volume sel, sedangkan sisanya adalah vakuola yang berisi air. Selain vakuola, bagian-bagian di dalam sel dan organel-organel sel lainnya juga berisi air. Protoplasma mengandung 75-90% air, sedangkan kloroplas dan mitokondria mengandung 50% air. Selain itu, air menyusun 80-90% bagian dari daun yang lunak, 70-90% pada akar, dan sebagai komponen terbesar dalam daging buah (85-95% dari berat segar). Kandungan air pada sayur-mayur juga tergolong tinggi, yaitu 85-95%. Namun, pada buah masak dan sebagian biji-bijian hanya mengandung sedikit air, yaitu 10-15% pada buah masak dan 5-7% pada beberapa biji yang menyimpan lemak.

Air merupakan suatu molekul sederhana, yaitu terdiri dari satu atom oksigen (O) dan dua atom hidrogen (H) dengan berat molekul (BM) sebesar 18g/mol. Meskipun air

## Pengantar Fisiologi Tumbuhan

sebagai molekul sederhana dengan BM kecil, namun air memiliki keunikan tersendiri. Keunikan struktur molekul air adalah rangkaian kedua atom H pada atom O tidak membentuk garis lurus melainkan membentuk sudut 105 °C.



**Gambar 2.1.** Struktur molekul air (Lincoln Taiz and Eduro Zeiger,2002)

Kulit pertama atom H terdiri dari dua elektron, yaitu elektron dari atom H dan elektron dari atom O. Kedua elektron ini umumnya lebih mendekat ke inti atom O sehingga atom H bersifat mirip dengan proton yang menempel pada atom O. Meskipun secara umum air dikatakan bermuatan netral, namun dengan struktur tersebut maka sisi atom H bermuatan agak positif dan sisi atom O bermuatan agak negatif. Susunan molekul seperti ini menyebabkan air bersifat polar.

### B. Sifat Air

Air memiliki sifat-sifat yang khas dan penting bagi kehidupan tumbuhan, sehingga memungkinkannya menjadi pelarut dan mudah ditransportasikan ke seluruh tubuh tumbuhan. Air memiliki beberapa sifat sebagai berikut:

1. Berbentuk cair pada suhu kamar

Air merupakan molekul sederhana yang terdiri dari dua atom hidrogen dan satu atom oksigen. Kedua jenis atom ini saling tertarik dengan ikatan kovalen, yaitu suatu ikatan yang saling menyumbangkan elektron terluarnya untuk membentuk pasangan sehingga digunakan secara bersama. Atom oksigen memiliki jumlah elektron terluar sebanyak enam buah, sehingga ada dua elektron yang bisa membentuk ikatan kovalen dengan atom lain. Atom H hanya memiliki satu elektron, sehingga dua atom hidrogen dapat berikatan dengan satu atom O membentuk air ( $H_2O$ ). Hal ini mengakibatkan atom oksigen memiliki kelebihan pasangan elektron, yang disebut sebagai “pasangan elektron bebas”. Adanya elektron bebas yang bersifat sangat negatif menjauhkan kedudukannya dari dua atom hidrogen sehingga ikatan  $H_2O$  membengkok sebesar  $105^\circ$ .

Atom oksigen yang bersifat negatif dan atom hidrogen yang bersifat positif menimbulkan pengkutuban atau perbedaan muatan. Kedua keadaan itulah yang menjadikan molekul air bersifat polar, artinya molekul air memiliki perbedaan muatan yakni negatif pada sisi pasangan elektron bebas dan positif pada sisi atom hidrogen. Sifat polar dari air ini sangat besar manfaatnya, yaitu dapat melarutkan berbagai macam zat misalnya protein, vitamin, garam-garam mineral, dan lain-lain.

Perbedaan muatan yang dimiliki air, menjadikan ikatan antara molekul air sendiri cukup kuat sehingga pada suhu kamar air berbentuk cair. Aksi tarik menarik antara atom hidrogen di satu molekul air dengan pasangan elektron bebas pada molekul air yang lain disebut ikatan hidrogen, oleh karena itu diperlukan suhu  $100^\circ C$  untuk mengubah keadaan cair menjadi uap.

## **2. Panas jenis air relatif besar**

Panas jenis adalah jumlah energi yang dibutuhkan untuk menaikkan suhu satu satuan massa bahan sebesar 1°C. Untuk menaikkan suhu 1 g air murni sebesar 1°C, diperlukan energi 1 kalori. Ketika suhu air naik, molekul-molekul bergetar lebih cepat dengan amplitudo yang lebih besar. Penambahan energi ke dalam sistem dapat memutuskan ikatan hidrogen antara molekul air. Oleh karena itu, energi harus ditambahkan ke dalam sistem untuk memutuskan ikatan hidrogen antar molekul air. Dibandingkan zat cair lainnya, air memerlukan energi relatif lebih besar untuk menaikkan suhunya. Panas jenis 1 kalor untuk menaikkan suhu 1 g air sebesar 1°C merupakan jumlah yang cukup besar. Namun, hal ini penting dan diperlukan agar air menyerap sejumlah energi tanpa banyak menaikkan suhu, sehingga suhu tubuh organisme lebih stabil dan menjadikan metabolismenya juga stabil.

## **3. Panas laten penguapan yang tinggi**

Panas laten penguapan adalah energi yang dibutuhkan untuk memisahkan molekul-molekul dari bentuk cair ke bentuk gas pada suhu tetap. Jika 1 g air berubah menjadi uap air pada suhu 20 °C diperlukan energi sebesar 586 kalori. Energi ini disebut dengan panas laten penguapan. Nilai ini paling besar untuk semua jenis zat cair yang dikenal. Energi ini dibutuhkan untuk memutuskan ikatan hidrogen antara molekul air, karena air yang berada dalam wujud cair mempunyai ikatan hidrogen sangat rapuh. Semakin besar panas laten penguapan maka semakin besar energi yang diperlukan, artinya air di dalam tumbuhan dapat membuang energi panas lebih banyak. Hal ini penting mengingat tumbuhan

tidak dapat bergerak dan pindah tempat. Dengan demikian jika tumbuhan diterpa panas terik maka panas tersebut akan dibuang dengan jalan menguapkan air sehingga suhu tumbuhan tetap stabil. Tingginya panas laten penguapan air memungkinkan tumbuhan untuk mendinginkan tubuhnya dengan cara menguapkan air melalui permukaan daun. Tumbuhan cukup mengeluarkan air dari tubuhnya sebanyak 1 g untuk menghilangkan panas dari tubuhnya sebesar 586 kalori.

#### **4. Adesi dan kohesi**

Sifat polar yang dimiliki air mengakibatkan air dapat tertarik ke bahan lainnya, seperti pati dan selulosa yang membentuk ikatan hidrogen dengan molekul bahan tersebut, sehingga air membasahkan bahan itu. Tarik-menarik antar molekul yang tidak sejenis disebut dengan adesi. Sifat ini sangat membantu dalam proses transport air ke xilem.

Selain sifat adesi, air juga memiliki sifat kohesi. Kohesi adalah kemampuan molekul air berikatan antar sesamanya. Molekul-molekul air bersatu sebagai adanya ikatan hidrogen. Pada saat air berada dalam wujud cair, ikatan hidrogennya sangat lemah. Ikatan-ikatan tersebut terbentuk, terpisah, dan terbentuk kembali dengan sangat cepat. Air memiliki kohesi yang kuat, sehingga masa air dapat menyambung menjadi satu masa yang menyatu. Kohesi pada tumbuhan berperan pada transport air yang melawan gravitasi.

#### **5. Tegangan Permukaan**

Tegangan permukaan adalah sebuah perilaku permukaan yang bebas dari zat cair untuk menyerupai kulit elastis di bawah pengaruh tegangan. Perilaku ini

disebabkan oleh gaya tarik antara molekul-molekul dalam permukaan zat cair. Molekul air pada batas air dengan udara lebih kuat tertarik oleh molekul air yang berada di dekatnya daripada oleh air dalam bentuk gas di atasnya. Hal ini mengakibatkan permukaan air menjadi cekung. Tegangan permukaan tidak hanya berperan pada bagian cairannya.

Tegangan permukaan air jauh lebih tinggi dari pada tegangan permukaan zat cair lain. Beberapa konsekuensi biologis dari sifat ini sangat penting dan tampak jelas terutama pada tumbuhan. Tegangan permukaan pada bidang penguapan di daun akan menghasilkan tenaga fisik yang mampu menarik air melalui sistem pembuluh tumbuhan. Kohesi, adesi, maupun tegangan permukaan menghasilkan fenomena kapilaritas, yaitu pergerakan air di sepanjang tabung kapiler seperti xilem.

## **6. Viskositas (kekentalan)**

Zat cair yang berbeda memiliki tingkat viskositas yang berbeda, misalnya viskositas gliserin berbeda dengan minyak zaitun ataupun asam sulfat. Hal ini akan lebih jelas apabila zat-zat cair tersebut dibandingkan dengan air. Air memiliki tingkat viskositas yang sangat rendah, sehingga dapat mengalir dengan mudah dan cepat. Zat-zat dengan tingkat viskositas yang lebih tinggi akan lebih sulit mengalir.

Jika terjadi viskositas yang tinggi di dalam sel, maka gerakan organel-organel sel akan terganggu, demikian juga dengan proses-proses pembelahan sel. Perkembangan organisme yang lebih tinggi, yang secara kritis bergantung pada kemampuan sel melakukan proses dalam fase embriogenesis, pasti tidak mungkin terjadi

jika viskositas air sedikit saja lebih tinggi dari normalnya. Viskositas air yang rendah tidak hanya penting untuk gerak seluler, namun juga untuk sistem sirkulasi.<sup>1</sup>

### C. Fungsi Air Bagi Tumbuhan

Air memainkan peran penting dalam kehidupan tanaman. Untuk setiap gram bahan organik yang dibuat oleh pabrik, sekitar 500 g air diserap oleh akar dan diangkut melalui tubuh tanaman. Bahkan sedikit ketidak seimbangan dalam aliran air ini dapat menyebabkan defisit air dan rusaknya proses seluler. Dengan demikian, setiap tanaman harus hati-hati dalam menata keseimbangan penyerapan dan hilangnya air. Proses penyeimbangan ini merupakan tantangan serius bagi tanaman darat. Untuk melakukan fotosintesis, tanaman perlu menarik karbon dioksida dari atmosfer, namun hal itu menyebabkan tanaman kehilangan air dan terancam dehidrasi. Perbedaan utama antara sel tumbuhan dan hewan yang mempengaruhi hampir semua aspek hubungan tumbuhan dengan air adalah adanya dinding sel pada tumbuhan. Dinding sel memungkinkan sel-sel tumbuhan untuk membuat tekanan hidrostatik yang besar, disebut **tekanan turgor**.

Tekanan turgor merupakan hasil dari keseimbangan air normal. Tekanan turgor penting untuk berbagai proses fisiologis, termasuk pembesaran sel, pertukaran gas di daun, transportasi di floem, dan berbagai proses transportasi melintasi membran. Tekanan turgor juga berkontribusi terhadap kekakuan dan stabilitas mekanik *nonlignified* jaringan tanaman. Dalam bab ini kita akan mendiskusikan bagaimana air bergerak ke dalam dan keluar dari sel

---

<sup>1</sup> Linda Advinda, *Dasar-Dasar Fisiologi Tumbuhan*, (Yogyakarta: Deepublish, 2018). hlm 18-23

## *Pengantar Fisiologi Tumbuhan*

tumbuhan, menekankan sifat molekul air dan kekuatan fisik yang mempengaruhi pergerakan air pada tingkat sel. Air membuat sebagian besar massa sel tumbuhan. Setiap sel mengandung vakuola berisi air yang besar. Dalam sel-sel tersebut kandungan sitoplasma hanya 5 sampai 10% dari volume sel, sisanya adalah vakuola. Air biasanya merupakan 80 sampai 95% dari massa jaringan tanaman.

Umumnya, sayuran seperti wortel dan selada berisi 85 hingga 95% air. Kayu, yang sebagian besar terdiri dari sel-sel mati, memiliki kandungan air yang lebih rendah, yang berfungsi dalam transportasi di xilem, mengandung 35 sampai 75 air; dan kayu batang memiliki kandungan air yang sedikit lebih rendah. Biji, dengan kadar air 5 sampai 15%, adalah salah satu jaringan tanaman terkering, namun sebelum berkecambah biji harus menyerap sejumlah besar air. Air adalah komponen yang paling melimpah dan bisa dibilang pelarut terbaik. Sebagai pelarut, membuat air sebagai media untuk pergerakan molekul dalam dan di antara sel-sel yang sangat mempengaruhi struktur protein, asam nukleat, polisakarida, dan konstituen sel lainnya.

Selain berperan dalam pelaksanaan reaksi biokimia, air memiliki fungsi-fungsi lainnya yang tidak kalah pentingnya, di antaranya adalah :

### **1. Air sebagai sistem hidrolik**

Air dapat memberikan tekanan hidrolik pada sel sehingga menimbulkan turgor pada sel-sel tumbuhan, memberikan sokongan dan kekuatan pada jaringan-jaringan tumbuhan yang tidak memiliki sokongan struktur (seperti adanya zat kayu) pada dinding selnya. Tumbuhan yang demikian seperti halnya tumbuhan basah, apabila sel-selnya mengalami kekurangan air dengan cepat

tumbuhan tersebut menjadi layu. Demikian pula bagian tumbuhan seperti daun dan bunga merupakan organ tumbuhan yang paling cepat menjadi layu apabila mengalami kekurangan air. Tekanan hidrolik juga terlihat dengan jelas pada proses membuka dan menutupnya stomata.

## **2. Air sebagai sistem angkutan**

Di dalam tumbuhan, air berperan juga sebagai alat angkut bahan-bahan dari satu sel ke sel lain atau dari satu jaringan ke jaringan lainnya. Bahan yang diangkut dapat berupa bahan mineral dari dalam tanah atau bahan-bahan organik hasil fotosintesis dan olahan sel lainnya.

## **3. Air berperan dalam stabilisasi dan pemindahan panas**

Air memiliki peran dalam pengaturan suhu tubuh tumbuhan sehingga tumbuhan tidak mengalami kepanasan. Tingginya panas jenis yang dimiliki oleh air, telah memungkinkan air sebagai bufer dalam pengaturan panas tubuh pada tumbuhan. Penyerapan sejumlah besar panas oleh tumbuhan hanya akan mengubah suhu tubuh sedikit saja. Apabila tumbuhan menyerap panas dari lingkungan dalam bentuk energi radiasi, sebagian dari panas ini akan dikembalikan lagi ke lingkungannya dengan cara menguapkan air dari permukaan.

## **4. Air sebagai pelarut yang efektif**

Air merupakan pelarut yang sangat baik untuk ion-ion, baik yang bermuatan positif maupun negatif. Kemampuan air dalam melarutkan berbagai bahan lebih tinggi dibandingkan dengan zat cair lainnya. Hal ini disebabkan air memiliki konstanta dielektrik yang paling tinggi sehingga dapat melarutkan lebih banyak jenis bahan kimia dibandingkan dengan zat cair lainnya.

Air merupakan pelarut terbaik dari tiga kelompok bahan biologis yang sangat penting bagi tumbuhan yaitu:

**a. Bahan organik**

Kelarutan air untuk bahan organik terjadi melalui ikatan hidrogen dengan asam amino (protein), karbohidrat, asam nukleat, dan kandungan sel lainnya, khususnya molekul yang mengandung ikatan hidroksil, amina, maupun gugus fungsional karboksilat.

**b. Ion-ion**

Ion yang terlarut dalam air merupakan unsur hara yang mampu diserap tumbuhan sebagai bahan yang berguna bagi pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan.

Gas di atmosfer yang berat molekulnya kecil seperti oksigen dan nitrogen.

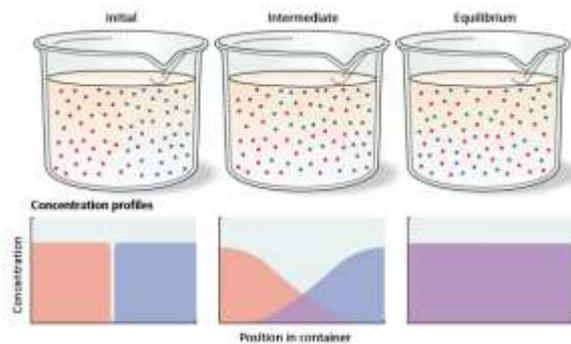
**D. Gerakan Air**

**1. Difusi**

**a. Pengertian difusi**

Difusi dapat diartikan sebagai gerakan terarah dari suatu daerah yang berkonsentrasi tinggi ke daerah yang berkonsentrasi lebih rendah, tetapi dicapai melalui gerakan termal acak dari masing-masing molekul. Penyebaran molekul-molekul suatu zat pada proses difusi ditimbulkan oleh energi kinetik. Molekul-molekul tersebut cenderung menyebar ke segala arah sampai terdapat suatu konsentrasi yang sama. Difusi zat terjadi dari suatu tempat yang banyak mengandung molekul atau tempat yang konsentrasinya pekat menuju tempat yang sedikit mengandung molekul atau

konsentrasi rendah. Jika partikel suatu zat dapat bergerak bebas tanpa terhambat oleh gaya tarik, maka dalam jangka waktu tertentu partikel-partikel itu akan tersebar merata dalam ruang yang ada. Sampai distribusi merata seperti itu terjadi akan terdapat banyak partikel yang bergerak dari daerah tempat partikel lebih pekat ke daerah yang partikelnya kurang pekat, dan secara menyeluruh gerakan partikel pada arah tertentu disebut difusi (Gambar 2).



**Gambar 2.2.** Gerakan termal molekul yang menyebabkan difusi (Lincoln Taiz and Eduro Zeiger, 2002)

Difusi sering terjadi pada kehidupan kita sehari-hari. Ketika sejumlah kecil gula ditempatkan dalam secangkir minuman panas, rasa manis segera menjadi tersebar di seluruh cangkir. Aroma parfum dari botol yang dibuka di sudut ruangan akan segera didistribusikan secara seragam di udara. Jika minuman tidak diaduk dan tidak ada pergerakan massa udara di dalam ruangan, distribusi zat ini terjadi melalui difusi.

## **b. Difusi pada tumbuhan**

Pada tumbuhan, air dan garam-garam mineral masuk ke dalam tubuh tumbuhan melalui epidermis

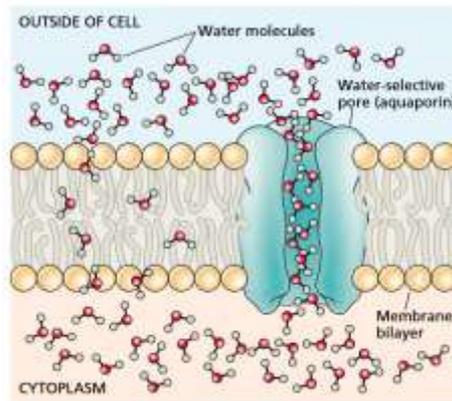
## *Pengantar Fisiologi Tumbuhan*

akar dengan cara difusi akibat adanya perbedaan konsentrasi antara sel-sel akar dengan cairan yang ada di sekelilingnya. Sel-sel akar mempunyai konsentrasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan keadaan sekelilingnya. Hal ini dapat ditandai dengan semakin dalam masuknya sel-sel akar maka akan semakin banyak terdapat penimbunan garam, sehingga semakin ke dalam, defisit tekanan difusi semakin besar. Makin besar perbedaan konsentrasi antara dua daerah, maka makin tajam gradasi konsentrasi dan makin besar kecepatan difusinya.<sup>2</sup>

Ketika air bergerak dari tanah ke atmosfer melalui tanaman, air bergerak melalui jalur yang sangat bervariasi, seperti dinding sel, sitoplasma, membran, dan ruang udara. Begitu pula mekanisme transportasi air juga bervariasi sesuai dengan jenis medium. Selama bertahun-tahun ada banyak ketidakpastian tentang bagaimana air bergerak melintasi membran tanaman. Secara khusus tidak jelas apakah pergerakan air ke dalam sel tanaman terbatas pada difusi molekul air melintasi lapisan ganda *lipid* membran plasma atau juga melibatkan difusi melalui pori-pori berlapis protein (Gambar 2.3).

---

<sup>2</sup> Yahya, "PERBEDAAN TINGKAT LAJU OSMOSIS ANTARA UMBI SOLONUM TUBERSORUM DAN DOUCUS CAROTA". Biology Education. Vol. 4 No.1 April 2015.



**Gambar 2.3.** Difusi molekul air melalui bilayer membran  
(Lincoln Taiz and Eduro Zeiger, 2002)

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa difusi langsung melintasi *lipid bilayer* tidak cukup untuk menjelaskan laju pergerakan air yang diamati pada membran. **Aquaporin** adalah protein membran integral yang membentuk saluran selektif air melintasi membran. Air akan berdifusi lebih cepat melalui saluran *aquaporin* daripada melalui lipid bilayer. Jadi *aquaporin* ini memfasilitasi pergerakan air ke dalam sel tanaman. Meskipun keberadaan *aquaporin* dapat mengubah laju pergerakan air melintasi membran, namun tidak mengubah arah transportasi atau mendorong pergerakan air.<sup>3</sup>

### c. Faktor-faktor yang memengaruhi difusi

Pada tahun 1880-an, ilmuwan Jerman Adolf Fick menemukan bahwa laju difusi berbanding lurus dengan gradien konsentrasi ( $\Delta c_s / \Delta x$ ) yaitu dengan perbedaan konsentrasi zat s ( $\Delta c_s$ ) antara dua titik yang dipisahkan

---

<sup>3</sup>Lincoln Taiz and Eduro Zeiger, *Plant Physiology 3rd ed*, (Sinauer Associates, 2002), hlm 36

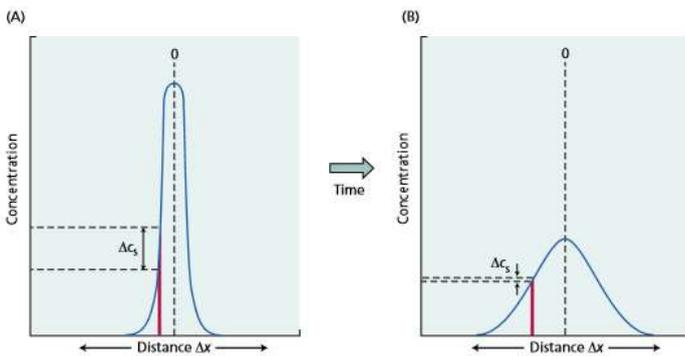
oleh jarak  $\Delta x$ . Dalam simbol, hubungan ini ditulis sebagai hukum pertama Fick:

$$J_s = -D_s \frac{\Delta c_s}{\Delta x}$$

- Laju pengangkutan atau densitas *fluks* ( $J_s$ ) adalah jumlah zat yang melintasi area per satuan waktu ( $J_s$  memiliki satuan mol per meter persegi per detik [ $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ]).
- Koefisien difusi ( $D_s$ ) adalah konstanta proporsionalitas yang mengukur seberapa mudah zat menembus melalui media tertentu. Koefisien difusi adalah karakteristik zat (molekul yang lebih besar memiliki koefisien difusi yang lebih kecil) dan tergantung pada medianya, sebagai contoh difusi di udara jauh lebih cepat daripada difusi dalam cairan. Tanda negatif dalam persamaan menunjukkan bahwa *fluks* bergerak kebawah gradien konsentrasi.

Hukum pertama Fick mengatakan bahwa suatu zat akan berdifusi lebih cepat ketika gradien konsentrasi menjadi lebih curam atau ketika koefisien difusi meningkat. Persamaan ini hanya memperhitungkan gerakan sebagai respons terhadap gradien konsentrasi, dan bukan untuk gerakan sebagai respons terhadap gaya lain, seperti tekanan, medan listrik, dan sebagainya. Difusi didorong oleh perbedaan konsentrasi. Difusi adalah faktor penting dalam pengambilan dan pendistribusian air, gas, dan pelarut melalui seluruh tanaman, khususnya pasokan karbondioksida untuk fotosintesis. Dari hukum pertama Fick, dapat diperoleh gambaran mengenai waktu yang diperlukan suatu zat untuk menempuh

jarak tertentu. Jika semula semua molekul terlarut terkonsentrasi pada posisi awal, maka konsentrasi bergerak menjauh dari posisi awal, seperti yang ditunjukkan untuk titik waktu berikutnya. Ketika substansi berdifusi menjauh dari titik awal, gradien konsentrasi menjadi kurang curam ( $\Delta c_s$  berkurang) yang mengakibatkan pergerakan menjadi lebih lambat (Gambar 4).



**Gambar 2.4.** Gradien konsentrasi (Lincoln Taiz and Eduardo Zeiger, 2002)

Waktu rata-rata yang dibutuhkan suatu partikel untuk berdifusi jarak  $L$  sama dengan  $L^2/D_s$ , di mana  $D_s$  adalah koefisien difusi, yang tergantung pada identitas partikel dan media di mana ia menyebar. Jadi, waktu rata-rata yang diperlukan suatu zat untuk meredakan jarak tertentu meningkat sebanding dengan kuadrat jarak itu. Koefisien difusi untuk glukosa dalam air adalah sekitar  $10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ . Dengan demikian waktu rata-rata yang diperlukan molekul glukosa untuk berdifusi melintasi sel dengan diameter  $50 \text{ }\mu\text{m}$  adalah 2.5 detik. Namun, waktu rata-rata yang dibutuhkan oleh molekul glukosa yang sama untuk berdifusi jarak 1 m dalam air

adalah sekitar 32 tahun. Nilai-nilai ini menunjukkan bahwa difusi efektif dalam dimensi seluler tetapi terlalu lambat untuk transportasi massal jarak jauh.

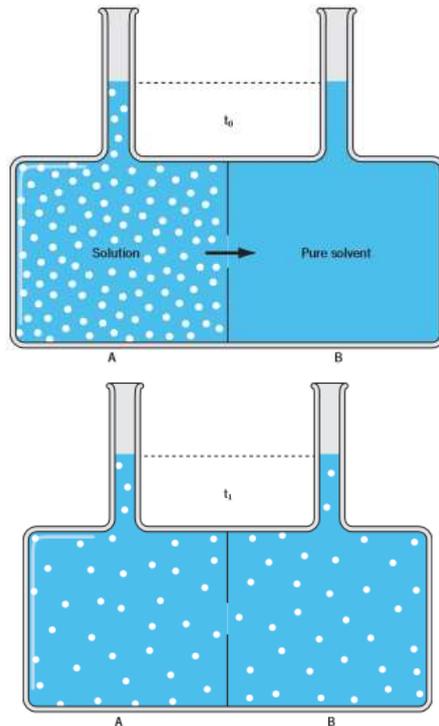
## **2. Osmosis**

### **a. Pengertian osmosis**

Osmosis merupakan salah satu bagian difusi, yaitu perpindahan air dari daerah yang mempunyai konsentrasi rendah ke daerah yang mempunyai konsentrasi lebih tinggi melalui membran semi permeabel. Osmosis merupakan berdifusinya zat pelarut dari larutan yang konsentrasinya rendah ke larutan yang konsentrasinya tinggi melalui selaput semi permeabel. Osmosis terjadi karena adanya perbedaan tekanan antara dua larutan yang dipisahkan oleh membran dan disebut dengan tekanan osmotik.

### **b. Mekanisme osmosis**

Hukum Fick paling mudah diterapkan pada difusi zat terlarut dan gas. Molekul yang berdifusi dapat berupa glukosa yang larut dalam air, karbon dioksida yang terlarut dalam air, atau karbon dioksida di udara. Pada mekanisme osmosis sebagaimana gambar di bawah ini, molekul terlarut dari bilik A ke bilik B dari waktu  $t_0$  ke  $t_1$  tidak mempengaruhi volume di kedua bilik, seperti yang ditunjukkan oleh tidak adanya perbedaan ketinggian cairan dalam kolom bilik A dan B. Sementara hukum Fick secara teori berlaku untuk difusi molekul pelarut juga, pada awalnya sulit untuk membayangkan situasi di mana difusi molekul pelarut dapat terjadi. Pertimbangkan apa yang akan terjadi misalnya air ditambahkan ke salah satu bilik dalam gambar.



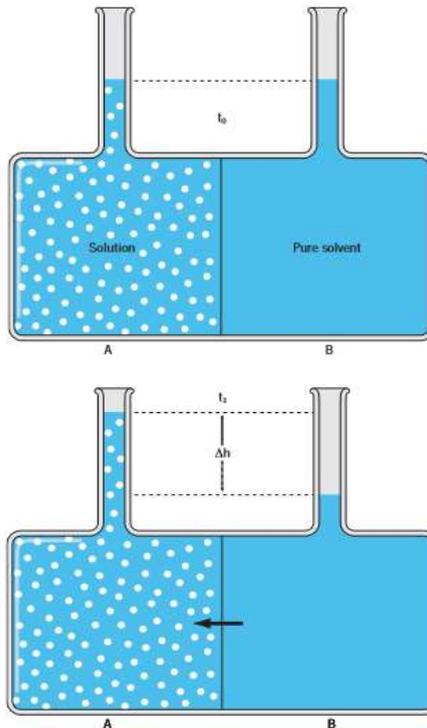
**Gambar 2.5.** Gerakan molekul zat terlarut saat proses difusi (Hopkins, dkk., 2008)

Difusi dalam larutan biasanya dikaitkan dengan gerakan terarah dari molekul zat terlarut dari daerah konsentrasi tinggi ke konsentrasi gas yang lebih rendah, karena gerakan termal acak dari molekul zat terlarut. Awalnya pada waktu 0 ( $t_0$ ), ada kemungkinan yang jauh lebih tinggi bahwa molekul terlarut dalam ruang A akan melewati celah menuju ke ruang B. Setelah waktu tertentu ( $t_1$ ), jumlah molekul terlarut di bilik B akan meningkat dan jumlah di bilik A akan berkurang. Ini akan berlanjut sampai molekul-molekulnya terdistribusi secara seragam di antara kedua ruang. Pada titik itu, probabilitas molekul terlarut melewati

*Pengantar Fisiologi Tumbuhan*

antara ruang di kedua arah akan sama dan difusi bersih akan berhenti. Catatan, garis putus-putus menunjukkan bahwa tidak ada perubahan volume pada ruang A atau B, karena difusi molekul terlarut.

Pada waktu  $t_0$ , ketinggian cairan dalam ruang A dan B adalah sama, menunjukkan volume yang sebanding. Namun, setelah jangka waktu 1, tinggi cairan cair dalam kolom kamar A telah meningkat sementara ketinggian cairan di kolom kamar B telah menurun, menunjukkan peningkatan volume ruang A dan penurunan volume dalam ruang B.



**Gambar 2.6.** Proses osmosis (Hopkins, dkk., 2008)

Osmosis adalah gerakan diarahkan molekul pelarut (biasanya air) melintasi membran permeabel

selektif. Ruang A dipisahkan dari ruang B oleh membran selektif permeabel. Membran selektif permeabel memungkinkan pergerakan bebas molekul pelarut (air) antara ruang A dan B, tetapi membatasi pergerakan molekul terlarut. Pada waktu nol ( $t_0$ ), semua molekul terlarut dipertahankan dalam ruang A dan ruang A dan B menunjukkan volume yang identik, seperti ditunjukkan oleh garis putus-putus. Setelah waktu tertentu  $t_1$ , semua molekul terlarut masih ditahan di ruang A, tetapi volume ruang A telah meningkat sementara volume di ruang B telah menurun karena difusi air melintasi membran selektif permeabel dari ruang B ke ruang A. Perubahan volume ini diwakili oleh h.

Perbedaan ketinggian kolom (h) adalah ukuran perbedaan volume antara dua ruang yang dipisahkan oleh membran selektif permeabel. Meningkatnya volume inchi berbeda dengan pelarut (air) dari ruang A ke ruang B. Kelemahan air, suatu proses yang dikenal sebagai osmosis, akan terjadi ketika dua ruang dipisahkan dengan membran selektif permeabel. Membran selektif yang permeabel memungkinkan aliran air dan molekul kecil tertentu yang sebenarnya bebas, tetapi membatasi pergerakan molekul terlarut besar. Dengan demikian, semua membran sel dapat ditembus secara selektif. Osmosis adalah kasus khusus difusi melalui selektif permeabel.

### **3. Transportasi Zat Dalam Tumbuhan**

Makhluk hidup mengalami poses metabolisme, salah satunya adalah transportasi. Seperti halnya manusia tumbuhanpun memerlukan zat-zat dari luar untuk kelangsungan hidupnya. Untuk itu, dalam mewujudkan

## *Pengantar Fisiologi Tumbuhan*

keserasian dalam tubuh, pada setiap makhluk hidup perlu adanya sirkulasi zat. Dimana sirkulasi zat ini terjadi dalam gerakan sitoplasma atau dalam bentuk difusi dan osmosis. Proses pengangkutan zat-zat dari dalam dan keluar sel disebut transportasi. Pada sel tumbuhan terdapat membran sel yang berfungsi untuk mengatur keluar masuknya zat. Dengan pengaturan itu sel akan memperoleh pH yang sesuai, konsentrasi zat-zat akan terkendali, dan sel dapat memperoleh masukan zat-zat dari ion-ion yang diperlukan serta membuang zat-zat yang tidak dibutuhkan lagi oleh tubuh.

Perpindahan molekul atau ion melewati membran disebut transport lewat membran. Zat-zat yang diperlukan melewati membran melalui transport aktif dan pasif. Transport aktif terjadi menggunakan energi dari sel. Sedangkan transportasi pasif terjadi secara spontan dan tidak menggunakan energi. Antara keduanya dalam tubuh tumbuhan terjadi secara bergantian. Tumbuhan mengambil zat-zat dari lingkungannya, sebagian dalam bentuk larutan dan sebagian dalam bentuk gas CO<sub>2</sub> dan O<sub>2</sub> serta dalam bentuk ion garam-garam mineral yang terlarut di dalam air. Pada tumbuhan, air dan mineral diserap oleh akar dari dalam tanah. Sedangkan gas-gas seperti O<sub>2</sub> dan CO<sub>2</sub> diambil oleh stomata daun dari udara di sekelilingnya. Air dan garam mineral masuk ke akar melalui epidermis akar secara difusi dan osmosis. Hal ini dapat terjadi karena adanya perbedaan konsentrasi sel-sel akar dan tanah di lingkungannya.<sup>4</sup>

---

<sup>4</sup> William. G. Hopkins dan Norman P.A. Honer, *Introduction to plant physiology 4th edition*. (The University of Western Ontario, 2008), hlm 6-8

## E. Potensial Air

### 1. Pengertian Potensial Air

Suatu hubungan energi potensial merupakan dasar sistem yang menggambarkan tingkah laku air dan pergerakan air dalam tanah dan tubuh tumbuhan. Air memiliki kemampuan untuk melakukan kerja, yaitu akan bergerak dari tempat dengan energi potensial tinggi ke tempat dengan energi potensial rendah. Energi potensial dalam sistem cairan dinyatakan dengan cara membandingkannya dengan energi potensial air murni. Karena air dalam tubuh tumbuhan dan tanah biasanya secara kimia tidak murni, karena adanya bahan terlarut dan secara fisik dibatasi oleh berbagai gaya, seperti gaya tarik-menarik yang berlawanan, gravitasi, dan tekanan, maka energi potensialnya lebih kecil jika dibandingkan dengan energi potensial air murni (Gardner, 1991).

Potensial air murni adalah 0, apabila terdapat beberapa substansi yang terlarut di dalam air tersebut, maka dapat menurunkan potensialnya. Sehingga potensial air dari suatu larutan adalah kurang dari nol. Dimana definisi ini hanya berlaku pada tekanan atmosfer. Apabila tekanan di sekitar sistem ditingkatkan atau diturunkan, secara otomatis potensial air akan akan naik atau turun sesuai dengan perubahan tekanan tersebut.

### 2. Tiga Faktor Utama yang Mempengaruhi Potensial Air pada Sel

Faktor utama yang mempengaruhi potensi air pada tanaman adalah *konsentrasi*, *tekanan*, dan *gravitasi*. Potensial air disimbolkan dengan  $\psi$  (huruf Yunani Psi), dan dapat dibagi menjadi individual, komponen-komponen biasanya ditulis dengan istilah  $\psi_s$ ,  $\psi_p$ , dan  $\psi_g$

menyatakan efek zat terlarut, tekanan, dan gravitasi, masing masing pada energi bebas air. Keadaan yang digunakan untuk menentukan potensial air adalah air murni pada tekanan dan suhu sekitar.

**Konsentrasi.** Istilah  $\psi_s$ , yang disebut konsentrasi/potensial zat terlarut atau potensial osmotik, merupakan efek dari zat-zat terlarut potensial air. Zat terlarut mengurangi energi bebas air dengan mengencerkan air. Ini merupakan efek entropi; yaitu, pencampuran zat terlarut dan air meningkatkan gangguan sistem sehingga menurunkan energi bebas. Ini berarti bahwa potensial osmotik tidak tergantung pada spesifik sifat zat terlarut. Potensial osmotik dapat dirumuskan dengan **persamaan van't Hoff**:

$$\Psi_s = -RTc_s$$

di mana  $R$  adalah konstanta gas ( $8.32 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ),  $T$  adalah suhu absolut (dalam derajat Kelvin, atau K), dan  $c_s$  adalah konsentrasi larutan terlarut, dinyatakan sebagai **osmolalitas** (mol total zat terlarut per liter air [ $\text{mol L}^{-1}$ ]). Tanda minus menunjukkan bahwa zat terlarut mengurangi potensi air suatu larutan relatif terhadap referensi keadaan air murni (Friedman 1986; Nobel 1999).

**Tekanan.** Istilah  $\psi_p$  adalah **tekanan hidrostatik**. Tekanan positif meningkatkan potensial air, sedangkan tekanan negatif akan menurunkan potensial air. Tekanan hidrostatik positif di dalam sel adalah tekanan yang disebut sebagai *tekanan turgor*. Nilai  $\psi_p$  juga bisa negatif, seperti halnya di xilem dan di dinding antara sel-sel. Tekanan negatif di luar sel sangat penting dalam

memindahkan air jarak jauh melalui tanaman. Untuk untuk air dalam standar,  $\psi_p = 0$  MPa. Dengan demikian nilai  $\psi_p$  untuk air murni dalam gelas terbuka adalah 0 MPa, meskipun tekanan absolut adalah sekitar 0,1 MPa (1 atmosfer).

**Gravitasi.** Gravitasi menyebabkan air bergerak ke bawah kecuali gaya gravitasi ditentang oleh gaya yang sama dan berlawanan. Istilah  $Y_g$  tergantung pada tinggi ( $h$ ) dari air, kepadatan air ( $\rho_w$ ), dan percepatan gravitasi ( $g$ ). Ketika berhadapan dengan transportasi air di tingkat sel, komponen gravitasi ( $Y_g$ ) umumnya dihilangkan dan lebih diabaikan dibandingkan dengan potensial osmotik dan tekanan hidrostatik.<sup>5</sup>

### 3. Perbedaan Potensial air, Potensial Osmotik dan Potensial Tekanan

Potensial air adalah jumlah air yang berada di dalam sel atau jaringan tumbuhan. Suatu sel atau jaringan dapat dikategorikan berpotensi air tinggi jika mempunyai kadar air yang tinggi. Untuk mengetahui arah dan pergerakan air dalam tumbuhan harus diketahui potensial-potensial air pada setiap sel. Air akan bergerak dari potensial tinggi menuju potensial rendah hingga keduanya terjadi keseimbangan.

Potensial air memiliki dua komponen yaitu potensial tekanan dan potensial osmotik. Potensial tekanan adalah potensial yang muncul karena adanya tambahan tekanan dan sama dengan tekanan nyata pada sistem tertentu, dan potensial osmotik (potensial larutan/solute) merupakan potensial yang terjadi akibat adanya unsur terlarut.

---

<sup>5</sup> Taiz, L. And Zeiger. *Plant Physiology. 3<sup>rd</sup> Edition.* (Sinauer Associates: Sunderland, 2002), hlm. 39-40

## *Pengantar Fisiologi Tumbuhan*

Lambang untuk potensial tekanan adalah  $\psi_p$  atau P. Sedangkan lambang untuk potensial osmotik atau potensial larutan adalah  $\psi_s$ .

Dalam sistem sederhana yang memiliki suhu tetap, potensial air diperoleh dari gabungan beberapa kekuatan yang berlawanan yaitu tekanan dan potensial osmotik:

$$\Psi = \psi_p + \psi_s$$

$$(\psi = P + s)$$

Tekanan dapat mempunyai sembarang nilai. Ditetapkan  $P = 0$  pada tekanan atmosfer. Naiknya tekanan menghasilkan tekanan positif dan naiknya tegangan menghasilkan tekanan negatif. Pada umumnya tekanan bernilai positif pada sel hidup, tapi sering negatif pada unsur mati xilem atau pada tanah (tapi positif di bawah permukaan air tanah). Potensial osmotik  $\psi_s$  selalu negatif (atau nol pada air murni). Hal ini menunjukkan bahwa apabila unsur terlarut ditambahkan maka akan selalu menurunkan potensial air sampai di bawah potensial air murni. Potensial air dapat bernilai negatif, nol atau positif, sebab tekanan dapat bernilai positif dan sangat tinggi dan potensial osmotik dapat bernilai nol atau negatif. Potensial air murni pada tekanan atmosfer adalah nol. Potensial air suatu larutan pada tekanan atmosfer bernilai negatif. Potensial air murni yang mendapat tekanan dari luar yang lebih besar daripada tekanan atmosfer dapat bernilai positif. Apabila potensial air larutan mendapat tekanan selain tekanan atmosfer, maka nilainya bisa negatif (apabila potensial osmotik lebih negatif daripada tekanan yang positif), nol (bila tekanan sama dengan potensial osmotik, tapi dengan tanda yang berlawanan) atau positif

bila tekanan lebih positif daripada potensial osmotik negatif).

Potensial air pada sistem tanah, tumbuhan, dan udara. Pada keadaan umum (kelembaban nisbi agak kurang 100%), potensial air tertinggi berada di tanah dan terendah di atmosfer, dengan nilai tengah berada di berbagai bagian tumbuhan, hal ini menunjukkan terdapat gradien dari tanah melalui tumbuhan ke atmosfer. Namun potensial airnya bisa beragam. Pada tanah yang basah di atas permukaan air tanah,  $P = 0$  dan  $\psi_s$  hanya sedikit negatif karena larutan tanah memang encer, sehingga  $\psi$  juga sedikit negatif. Cairan xilem sangat encer maka  $\psi_s$  sedikit negatif, tetapi air di dalamnya selalu berada di bawah tegangan ( $P$  negatif), sehingga  $\psi$  nya lebih negatif di xilem daripada air tanah. Akibatnya, air masuk ke dalam tumbuhan dari tanah. Pada sel daun yang mengandung larutan lebih pekat,  $\psi_s$  sangat negatif. Air masuk dan membangun  $P$  positif tapi air terus menguap dari sel ini, sehingga  $P$  tidak sempat naik bila penguapan tidak terjadi (artinya, kesetimbangan tidak tercapai), dan  $\psi$  dalam sel tetap lebih negatif daripada dalam xilem. Potensial air atmosfer lebih negatif lagi, sehingga air cenderung menguap keluar dari daun menuju atmosfer.

Pada tumbuhan darat,  $\psi_s$  sebenarnya tidak pernah bernilai positif (O'Leary, 1970). Hal itu disebabkan karena  $\psi_s$  yang ditentukan oleh larutan dalam sel selalu negatif dan daya matriks juga menurun sampai di bawah nol. Tekanan di dalam sel dapat menaikkan  $\psi$  mendekati nol tapi  $\psi$  tidak pernah menjadi positif. Jadi, cairan xilem, walaupun hampir menyerupai air murni dan dapat mempunyai  $\psi$  positif apabila berada di bawah tekanan, tetap saja mengalami tegangan (tekanan negatif) sebab

cairan tersebut tetap mendekati kesetimbangan dengan jaringan hidup yang berpotensi air negatif.<sup>6</sup>

#### **4. Mekanisme Perhitungan Potensial Air**

Potensial air merupakan alat diagnosis yang memungkinkan penentuan secara tepat keadaan status air dalam sel atau jaringan tumbuhan. Semakin rendah potensial air dari suatu sel atau jaringan tumbuhan, maka semakin besar kemampuan tanaman untuk menyerap air dari dalam tanah. Sebaliknya, semakin tinggi potensial air, semakin besar kemampuan jaringan untuk memberikan air kepada sel yang mempunyai kandungan air lebih rendah (Basahona, 2011).

Potensial kimia air atau biasanya dinyatakan sebagai potensial air, PA ( $\psi$ , psi) penting untuk diketahui agar dapat dimengerti pergerakan air di dalam sistem tumbuhan, tanah dan udara. Potensial air biasanya dinyatakan dalam satuan bar, atm, seperti satuan tekanan. Air akan bergerak dari PA tinggi ke PA yang lebih rendah. Jadi osmosis termasuk difusi, terjadi sebagai akibat adanya gradien dalam energi bebas dari partikel-partikel yang berdifusi (Ismail, 2011).

Potensial air adalah suatu pernyataan dari status energi bebas air, suatu ukuran yang dapat menyebabkan air bergerak ke dalam suatu sistem, seperti jaringan tumbuhan, tanah atau atmosfer, atau dari suatu bagian ke bagian lain dalam suatu sistem. Potensial air dapat digunakan sebagai parameter yang paling bermanfaat untuk diukur dalam hubungannya dengan sistem tanah, tanaman dan atmosfer (Ismail, 2011).

---

<sup>6</sup> F.B. Salisbury, dan C.W. Ross, *Fisiologi Tumbuhan Jilid I*, (Bandung: ITB. 1995), hlm. 47

Komponen-komponen potensial air atau jaringan adalah sebagai berikut:

$$\Psi_w = \Psi_s + \Psi_p + \Psi_m$$

$$(PA = PO + PT + PM)$$

Di mana:

$\Psi_w$  = potensial air suatu tumbuhan

$\Psi_s$  = potensial osmotik

$\Psi_p$  = potensial tekanan atau turgor

$\Psi_m$  = potensial matriks (Ismail, 2011)

Potensial osmotik adalah potensial yang disebabkan oleh zat-zat terlarut. Tandanya selalui negatif. Potensial tekanan adalah potensial yang disebabkan oleh tekanan hidrostatik pada dinding sel. Nilainya ditandai dengan bilangan positif, nol, atau dapat juga negatif. Penambahan tekanan (terbentuknya tekanan turgor) mengakibatkan potensial tekanan lebih positif. Potensial matriks disebabkan oleh ikatan air pada koloid protoplasma dan permukaan (dinding sel). Potensial matriks bertanda negatif, tetapi pada umumnya pada sel-sel bervakuola, nilainya dapat diabaikan. Oleh karena itu, persamaan di atas dapat disederhanakan menjadi:

$$\Psi_w = \Psi_s + \Psi_p$$

$$(PA = PO + PT)$$

Pengaruh gabungan dari tekanan dan konsentrasi zat terlarut ini terhadap potensial air ditulis dalam persamaan berikut ini:

$$\Psi = \Psi_p + \Psi_s$$

dimana  $\Psi_p$  adalah potensial tekanan (tekanan fisik suatu larutan) dan  $\Psi_s$  adalah potensial zat-zat terlarut,

## *Pengantar Fisiologi Tumbuhan*

yang sebanding dengan konsentrasi zat-zat terlarut dari suatu larutan.  $\Psi_s$  juga disebut potensial osmotik. Tekanan pada suatu larutan ( $\Psi_p$ ) bisa berupa suatu bilangan yang positif atau negatif. Sebaliknya, potensial zat terlarut dari suatu larutan ( $\Psi_s$ ) selalu negatif, dan semakin besar konsentrasi zat-zat terlarut, semakin tinggi nilai  $\Psi_s$ .<sup>7</sup>

### **F. Soal Latihan**

1. Sebutkan unsur penyusun molekul air!
2. Jelaskan keunikan struktur molekul air!
3. Sebutkan dan jelaskan sifat-sifat air!
4. Sebutkan dan jelaskan peranan air bagi tumbuhan!
5. Jelaskan hubungan antara potensial air, potensial osmotik, dan potensial tekanan!

### **Tugas!**

1. Buatlah tabel perbandingan yang memuat persamaan dan perbedaan antara difusi dengan osmosis!
2. Buatlah tabel perbandingan yang memuat persamaan dan perbedaan antara transport aktif dengan transport pasif!

---

<sup>7</sup> Neil A. Champbell, Jane B. Reece. *Biologi Edisi Kedelapan Jilid 2 Alih Bahasa*, (Jakarta: Erlangga 2008),350

## BAB III

# TRANSPIRASI

---

---

### **A. Pengertian dan Macam Transpirasi**

Transpirasi merupakan aktivitas fisiologis penting yang sangat dinamis. Transpirasi adalah proses hilangnya air dalam bentuk uap air dari tubuh tumbuhan. Transpirasi juga dapat diartikan sebagai difusi uap air dari udara yang lembab di dalam daun ke udara kering di luar daun. Hilangnya air pada peristiwa transpirasi dapat terjadi melalui stomata, kutikula, dan lentisel.

#### **1. Transpirasi stomata**

Sel-sel mesofil daun tidak tersusun rapat, tetapi di antara sel-sel tersebut terdapat ruang-ruang udara yang dikelilingi oleh dinding-dinding sel mesofil yang jenuh air. Air menguap melalui dinding-dinding basah ini ke ruang-ruang antar sel, dan uap air kemudian berdifusi melalui stomata dari ruang-ruang antar sel ke atmosfer di luar, sehingga dalam kondisi normal evaporasi membuat ruang-ruang itu selalu jenuh uap air. Setiap stomata terbuka, difusi uap air ke atmosfer pasti terjadi, kecuali apabila atmosfer itu sendiri sama-sama lembab.

## **2. Transpirasi kutikula**

Transpirasi kutikula merupakan penguapan air yang terjadi secara langsung melalui kutikula epidermis. Kutikula daun secara relatif tidak tembus air dan pada sebagian besar jenis tumbuhan transpirasi kutikula hanya sebesar 10% atau kurang dari jumlah air yang hilang melalui daun-daun. Oleh karena itu, sebagian besar air hilang melalui stomata.

## **3. Transpirasi lentisel**

Lentisel adalah daerah pada kulit kayu yang berisi sel-sel tersusun lepas yang dikenal sebagai alat komplementer. Uap air yang hilang melalui jaringan ini sebesar 0.1% dari total transpirasi.

## **B. Peranan Transpirasi**

Transpirasi memiliki beberapa peranan sebagai berikut:

### **1. Transpirasi sebagai mekanisme regulasi dan adaptasi terhadap kondisi internal dan eksternal tubuh tumbuhan**

Salah satu fungsi transpirasi adalah sebagai mekanisme regulasi dan adaptasi terhadap kondisi internal dan eksternal tubuh tumbuhan. Mekanisme regulasi dan adaptasi tersebut antara lain kontrol cairan dalam tubuh tumbuhan, pengangkutan air dan garam-garam mineral, pengendalian suhu jaringan, dan pertukaran energi. Kontrol cairan tubuh tumbuhan atau yang sering dikenal dengan turgiditas sel dan jaringan digunakan untuk mempertahankan turgiditas optimum. Sedangkan pengangkutan air dan garam mineral meliputi peristiwa penyerapan dan transportasi.

## **2. Transpirasi dapat mempercepat laju pengangkutan unsur hara melalui pembuluh xilem**

Apabila transpirasi berlangsung secara optimum maka laju pengangkutan unsur hara menjadi lebih cepat. Beberapa hasil pengujian didapatkan bahwa pengangkutan unsur hara tetap berlangsung jika transpirasi tidak terjadi. Akan tetapi, laju pengangkutan terbukti akan berlangsung lebih cepat jika transpirasi berlangsung secara optimum. Sebagai contoh pada tanaman tomat terjadi defisiensi kalsium pada daun-daun mudanya jika laju transpirasi dihambat dengan cara meningkatkan kandungan CO<sub>2</sub> (sehingga stomata hampir menutup) dan kelembaban udara sangat tinggi.

## **3. Transpirasi berperan dalam menjaga turgiditas sel tumbuhan agar tetap pada kondisi optimal**

Sel tumbuhan diyakini akan berfungsi optimal pada tingkat turgiditas tertentu. Jika turgiditasnya menjadi lebih tinggi atau lebih rendah maka sel tersebut akan menurun fungsinya. Jika tekanan internal sel melampaui batas elastisitas dinding sel, maka sel tersebut akan pecah. Secara visual sering terlihat buah pecah pada berbagai jenis tanaman dengan buah berdaging, misalnya tomat, anggur, cherry, dan jenis cabai tertentu.

## **4. Transpirasi berfungsi untuk menjaga stabilitas suhu daun**

Pada siang hari daun akan menyerap cahaya matahari sehingga suhu daun menjadi meningkat. Melalui transpirasi maka suhu daun akan turun kembali. Dengan demikian transpirasi mampu menjaga suhu daun agar tetap stabil, terutama saat kondisi matahari terik.

### **C. Faktor yang Memengaruhi Transpirasi**

Proses transpirasi dipengaruhi oleh faktor internal dan eksternal. Faktor internal yang berpengaruh terhadap transpirasi antara lain morfologi dan anatomi daun termasuk stomata. Sedangkan faktor eksternal yang berpengaruh terhadap transpirasi yaitu cahaya matahari, suhu, kelembaban udara, angin, dan keadaan air di dalam tanah (Pujiwati, 2018).

#### **1. Faktor internal yang berpengaruh terhadap transpirasi**

##### **a. Morfologi daun**

Morfologi daun yang berpengaruh terhadap transpirasi antara lain luas daun, tebal daun, dan permukaan daun. Semakin lebar dan tipis suatu daun maka transpirasi semakin meningkat. Di sisi lain, transpirasi dapat menurun akibat adanya trikoma (bulu-bulu halus pada permukaan daun).

##### **b. Anatomi daun**

Adanya lapisan lilin pada permukaan daun berpengaruh terhadap transpirasi. Lapisan lilin pada permukaan daun dapat menghambat transpirasi. Dengan demikian, daun yang permukaannya terdapat lapisan lilin transpirasinya rendah.

##### **c. Stomata**

Transpirasi dipengaruhi oleh stomata, meliputi jumlah, bentuk, letak, dan distribusinya. Semakin banyak jumlah stomata maka transpirasi semakin meningkat. Bentuk lubang stomata yang oval berpengaruh terhadap intensitas air yang keluar saat transpirasi. Lubang-lubang stomata yang jaraknya

berdekatan dapat menurunkan transpirasi karena keluarnya air dari suatu lubang dapat menghambat keluarnya air dari lubang yang berdekatan. Selain itu, stomata pada bagian abaksial (permukaan bawah) daun dapat mengurangi terjadinya transpirasi.

## **2. Faktor eksternal yang berpengaruh terhadap transpirasi**

### **a. Cahaya matahari**

Cahaya matahari memacu pembukaan stomata. Dalam keadaan sedikit cahaya atau tidak ada cahaya maka stomata akan menutup.

### **b. Suhu**

Semakin tinggi suhu maka transpirasi akan semakin cepat. Pengaruh suhu terhadap transpirasi daun dapat pula ditinjau dari sudut lain, yaitu dalam hubungannya dengan tekanan uap air di dalam daun dan di luar daun. Kenaikan suhu mampu meningkatkan tekanan uap di dalam daun.

### **c. Kelembaban udara**

Jika kelembaban udara di atmosfer lebih tinggi dibandingkan dengan kelembaban daun, maka laju transpirasi semakin rendah.

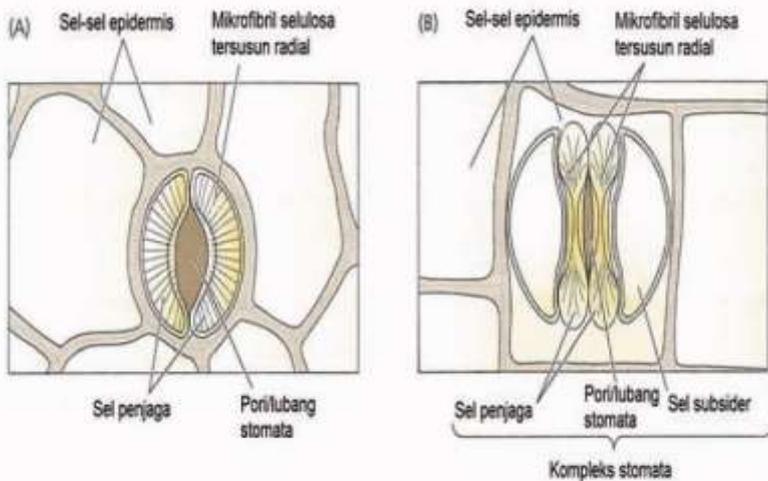
### **d. Angin**

Semakin kencang angin bertiup, maka laju transpirasi semakin meningkat.

### **e. Keadaan air di dalam tanah**

## D. Mekanika Stomata dan Mekanisme Pengendalian Stomata

Mekanika stomata merupakan mekanisme pembukaan dan penutupan stomata. Stomata berasal dari bahasa Yunani yaitu stoma yang berarti lubang atau porus. Stomata adalah lubang-lubang kecil berbentuk lonjong yang dikelilingi oleh dua sel epidermis khusus yang disebut sel penutup (*guard cell*). Sel penutup tersebut berupa sel epidermis yang sudah mengalami perubahan bentuk dan fungsi yang dapat mengatur besar kecilnya lubang-lubang yang diapitnya (Swatthout, 2008).



**Gambar 3.1.** Struktur stomata (Lincoln Taiz and Eduardo Zeiger, 2002)

Pada beberapa tumbuhan terdapat dua atau lebih sel yang berdekatan dengan sel penutup yang secara morfologi dan fungsional berbeda dengan sel epidermis lainnya serta dapat bergabung disebut sel tetangga. Sel penutup termasuk sel hidup dan mengandung kloroplas yang berfungsi untuk mengatur pembukaan dan penutupan stomata.

## 1. Mekanisme Pembukaan Stomata

Pembukaan stomata diinduksi oleh akumulasi ion kalium ( $K^+$ ) pada sel penjaga. Ion kalium merupakan bahan terlarut (*solute*), sedangkan bahan pelarutnya adalah air. Tinggi rendahnya potensial air dipengaruhi oleh jumlah bahan terlarut (*solute*) di dalam cairan sel tersebut. Semakin banyak bahan yang terlarut, maka potensial osmotik sel akan semakin rendah. Dalam keadaan tekanan turgor sel yang tetap, maka potensial air akan menurun. Jika jumlah bahan terlarut (*solute*) meningkat yang dalam hal ini adalah ion kalium, maka memacu air untuk masuk ke dalam sel penjaga. Masuknya air ke dalam sel penjaga menyebabkan tekanan turgor pada sel penjaga meningkat. Jika tekanan turgor kedua sel penjaga meningkat, maka stomata akan membuka.

Masuknya ion kalium pada sel penjaga dirangsang oleh adanya cahaya. Cahaya yang lebih efektif merangsang masuknya ion kalium adalah cahaya biru. Selain berperan dalam merangsang masuknya ion kalium ke dalam sel penjaga, cahaya biru juga berperan dalam pemecahan molekul pati untuk menghasilkan fosfoenol piruvat (PEP) yang dapat menerima  $CO_2$  untuk pembentukan asam malat.

Kalium termasuk kation (ion bermuatan positif). Agar netralitas muatan listrik di dalam sel tetap terjaga, maka harus diimbangi dengan anion (ion bermuatan negatif). Pada beberapa spesies, anion tersebut adalah klor ( $Cl^-$ ). Jadi, agar muatan listrik pada sel tetap netral, masuknya ion  $K^+$  disertai dengan masuknya ion  $Cl^-$ . Namun, pada beberapa penelitian dilaporkan bahwa masuknya ion  $K^+$  tanpa disertai masuknya ion  $Cl^-$ . Dalam keadaan seperti ini, ion hidrogen ( $H^+$ ) keluar dari sel penjaga agar netralitas

muatan listrik tetap terjaga. Ion hidrogen yang ada di dalam sel penjaga berasal dari asam-asam organik yang disintesis oleh sel penjaga sebagai respon terhadap faktor-faktor yang menginduksi pembukaan stomata.

## **2. Mekanisme Penutupan Stomata**

Penutupan stomata diinduksi oleh akumulasi hormon asam absisat (ABA). Keberadaan asam absisat dengan konsentrasi yang sangat rendah dapat memacu penutupan stomata. Asam absisat pada daun terletak pada tiga sel, yaitu sitosol, kloroplas, dan dinding sel. Asam absisat disintesis di sitosol kemudian diakumulasikan di kloroplas. Selain di sitosol, ABA juga di sel-sel mesofil daun. Mekanisme pembukaan dan penutupan stomata (konduktivitas stomata) dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain intensitas cahaya, kelembaban udara, kecepatan angin, kadar air, dan kelembaban tanah

## **E. Pengukuran Transpirasi**

Transpirasi dapat diukur menggunakan beberapa metode, antara lain penimbangan, lisimeter atau grafimeter, metode kuvet atau pertukaran gas, kertas korbaklorida, photometer, dan pengumpulan uap air yang ditranspirasikan.

### **1. Penimbangan langsung**

Pengukuran transpirasi yang paling memuaskan diperoleh dari tumbuhan yang tumbuh dalam pot yang telah diatur sedemikian rupa sehingga evaporasi dari pot dan permukaan tanah dapat dicegah. Kehilangan air dari tumbuhan ini dapat ditaksir untuk jangka waktu tertentu dengan penimbangan langsung

## **2. Kertas Kobalt Klorida**

Cara ini pada dasarnya adalah pengukuran uap air yang hilang ke udara dan diganti dengan pengukuran uap air yang hilang ke dalam kertas kobalt klorida kering. Kertas ini berwarna biru cerah kemudian menjadi biru pucat serta kemudian berubah menjadi merah jambu apabila menyerap air. Sehelai kertas kecil biru cerah ditempelkan pada permukaan daun dan ditutup dengan gelas preparat. Demikian juga bagian bawah daun. Waktu yang diperlukan untuk mengubah warna biru kertas menjadi merah jambu dijadikan ukuran laju kehilangan air dari bagian daun yang ditutup kertas.

## **3. Potometer**

Alat ini mengukur pengambilan air oleh sebuah potongan pucuk, dengan asumsi bahwa apabila air tersedia dengan bebas untuk tumbuhan, jumlah air yang diambil sama dengan jumlah air yang dikeluarkan oleh transpirasi.

## **4. Metode Lisimeter atau Grafimeter**

Beberapa abad yang lalu, Stephen Hales mempersiapkan tanaman dalam pot dan tanamannya ditutup rapat agar air tidak hilang, kecuali dari tajuknya yang bertranspirasi. Kemudian, tanaman dalam pot itu ditimbang pada selang waktu tertentu, dan area jumlah air yang digunakan untuk pertumbuhan tanaman (misalnya, yang diubah menjadi karbohidrat) kurang dari 1% dari jumlah air yang ditranspirasikan. Maka sebenarnya semua perubahan bobot dapat dianggap berasal dari transpirasi. Metode ini dinamakan lisimeter.

Haks dan peneliti lainnya sudah banyak sekali mengembangkan metode sederhana ini. Lisimeter

## *Pengantar Fisiologi Tumbuhan*

miliknya di kebun Greenville merupakan beberapa bejana yang besar (beberapa meter kubik besarnya) diisi penuh dengan tanah dan dikuburkan, sehingga permukaan atasnya sama tinggi dengan permukaan lapangan. Bejana tersebut diletakkan di dekat bantalan karet besar yang diletakkan di dasarnya serta diisi air dan zat antibeku yang dihubungkan dengan pipa yang tegak ke atas permukaan tanah. Tinggi cairan dalam pipa menunjukkan ukuran bobot lisimeter, maka permukannya berubah-ubah sejalan dengan perubahan kandungan air dalam tanah yang dilisimeter dan dalam tanaman yang sedang tumbuh, walaupun bobotnya lebih kecil dibandingkan dengan bobot tanah. Jumlah air tanah ditentukan oleh air irigasi dan jumlah hujan dikurangi evapotranspirasi, yaitu gabungan antara penguapan dari tanah dan transpirasi dari tumbuhan. Penguapan dari tanah dapat diduga dengan berbagai macam cara. Lisimeter merupakan metode lapangan paling handal untuk mempelajari evapotranspirasi, tetapi memang mahal dan tidak mudah dipindah-pindahkan. Meskipun tidak di seluruh dunia, lisimeter banyak digunakan.

Teknik yang lebih umum, menggunakan persamaan penimbangan air untuk menghitung evapotranspirasi dari selisih antara air yang masuk dengan yang keluar

$$Et = \text{irigasi} + \text{hujan} + \text{pengurasan} - \text{drainase} - \text{aliran permukaan}$$

Et adalah evapotranspirasi, sedangkan pengurasan adalah kehilangan dari cadangan tanah. Pengukuran cadangan tanah pada awal dan akhir suatu periode menghasilkan nilai pengurasan.

## **5. Metode Kuvet atau Pertukaran gas**

Dalam metode ini, transpirasi dihitung dengan cara mengukur uap air di atmosfer yang tertutup dan mengelilingi daun. Sehelai daun diukur kelembaban suhu dan volume gas yang masuk dan keluar dengan sebuah kuvet bening.

## **6. Pengumpulan Uap Air yang Ditranspirasi**

Cara ini mengharuskan tumbuhan atau bagian tumbuhan dimasukkan ke dalam sebuah bejana tembus cahaya sehingga uap air yang ditranspirasikan dapat dipisahkan.

## **F. Soal Latihan**

1. Jelaskan pengertian transpirasi secara singkat, padat, dan jelas!
2. Sebutkan dan jelaskan macam-macam transpirasi secara singkat!
3. Sebutkan peranan transpirasi bagi tumbuhan!
4. Sebutkan faktor-faktor yang memengaruhi terjadinya transpirasi!
5. Sebutkan macam-macam metode pengukuran transpirasi!

## **Tugas!**

Buatlah skema keterkaitan antara mekanisme pembukaan dan penutupan stomata dengan peristiwa transpirasi



## BAB IV

# NUTRISI TANAMAN

---

---

### **A. Pengertian Unsur Esensial**

Tumbuhan mengandung beberapa unsur. Namun tidak keseluruhan unsur tersebut dibutuhkan untuk memenuhi kelangsungan hidup. Terkadang keberadaan beberapa unsur tertentu di dalam tubuh tumbuhan justru mengganggu kelangsungan hidupnya. Unsur tersebut misalnya logam berat, seperti Al, Pb, Cd, dan Ag. Ada beberapa unsur yang harus ada pada tumbuhan untuk melangsungkan kehidupannya yang dikenal dengan istilah unsur esensial. Unsur esensial merupakan penyusun suatu molekul atau bagian yang penting bagi kelangsungan hidup tumbuhan. Contohnya kehadiran Mg penting untuk penyusunan klorofil. Tanpa kehadiran unsur hara esensial, tumbuhan tidak dapat menyelesaikan daur hidupnya hingga menghasilkan biji yang viabel.

### **B. Macam dan Fungsi Unsur Esensial**

Unsur hara esensial bagi tanaman ada 16 dan 13 di antaranya diperoleh tumbuhan dari tanah. Sedangkan tiga unsur lainnya diperoleh tumbuhan dari udara atau air. Ketiga unsur ini adalah C, H, dan O. Kelimpahan unsur hara

## Pengantar Fisiologi Tumbuhan

tersebut di dalam tumbuhan berbeda-beda. Berdasarkan kelimpahannya di dalam tumbuhan, unsur esensial dibagi menjadi unsur makro dan mikro.

Proporsi kandungan unsur-unsur makro dan mikro nutrien di dalam jaringan tumbuhan tinggi per berat kering jaringan dapat dilihat pada tabel di bawah ini. Dengan mengetahui elemen-elemen yang penting bagi pertumbuhan, maka saat ini dapat dilakukan penanaman tumbuhan dengan menggunakan larutan media buatan yang mengandung semua elemen yang diperlukan oleh tumbuhan.

**Tabel 4.1.** *Essensial elements for Most Higher Plants and Concentrations Considered Adequate*

Element	Chemical Symbol	Form Available to Plants	Atom ic Wt	Concentration in Dry Tissue		Relative No. of Atoms Compared to Molybden um
				Ppm	%	
Molybdenum	Mo	MoO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	95.95	0.1	0.00001	1
Copper	Cu	Cu <sup>2+</sup> .Cu <sup>2+</sup>	63.54	6	0.0006	100
Zinc	Zn	Zn <sup>2+</sup>	65.38	20	0.0020	300
Manganese	Mn	Mn <sup>2+</sup>	54.94	50	0.0050	1.000
Boron	B	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	10.82	20	0.002	2.000
Iron	Fe	Fe <sup>3+</sup> .Fe <sup>2+</sup>	55.85	100	0.010	2.000
Chlorine	Cl	Cl <sup>-</sup>	35.46	100	0.010	3.000
Sulfur	S	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	32.07	1.000	0.1	30.000
Phosphorus	P	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> .HPO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	30.98	2.000	0.2	60.000
Magnesium	Mg	Mg <sup>2+</sup>	24.32	2.000	0.2	80.000
Calcium	Ca	Ca <sup>2+</sup>	40.08	5.000	0.5	125.000
Potassium	K	K <sup>-</sup>	39.10	10.000	1.0	250.000

<i>Nitrogen</i>	N	<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b> <b>.NH<sub>4</sub><sup>-</sup></b>	14.01	15.00 0	1.5	1.000.000
<i>Oxygen</i>	O	O <sub>2</sub> .H <sub>2</sub> O	16.00	450.0 00	45	30.000.00 0
<i>Carbon</i>	C	CO <sub>2</sub>	12.01	450.0 00	45	35.000.00 0
<i>Hydrogen</i>	H	H <sub>2</sub> O	1.01	60.00 0	6	60.000.00 0
<i>*Modified after P.R. Stout (1961). Proceedings of the ninth Annual California Fertilizer Conference pp.21-23</i>						
<i>*If one of two forms is more common than the other, this is indicated by boldface type<sup>8</sup></i>						

Unsur hara yang akan dijabarkan fungsinya pada buku ini adalah unsur-unsur hara yang diperoleh tanaman dari dalam tanah atau larutan hara.

### 1. Nitrogen

Dalam jaringan tumbuhan nitrogen merupakan komponen penyusun dari banyak senyawa esensial bagi tumbuhan, misalnya asam-asam amino. Karena setiap molekul protein tersusun dari asam-asam amino. Karena setiap molekul protein tersusun dari asam-asam amino dan setiap enzim adalah protein, maka nitrogen juga merupakan unsur penyusun protein dan enzim. Selain itu, nitrogen juga terkandung dalam klorofil, hormon sitokinin, dan auksin.

### 2. Fosfor

Fosfor merupakan bagian yang esensial dari berbagai gula fosfat yang berperan dalam reaksi-reaksi pada fase gelap fotosintesis, respirasi, dan berbagai proses

---

<sup>8</sup> Dardjat Sasmitamihardja & Arbayah H. Siregar, *Dasar-Dasar Fisiologi Tumbuhan* (Bogor, Jurusan Biologi FMIPA-ITB, 2009) 60

metabolisme lainnya. Fosfor juga merupakan bagian dari nukleotida (dalam RNA dan DNA) dan fosfolipida penyusun membran.

### **3. Kalium**

Kalium tidak disintesis menjadi senyawa organik oleh tumbuhan, sehingga unsur ini tetap sebagai ion dalam tumbuhan. Kalium berperan sebagai aktivator dari berbagai enzim yang terlibat dalam sintesis protein dan pati. Kalium juga merupakan ion yang berperan dalam mengatur potensial osmotik sel, dengan demikian akan berperan dalam mengatur tekanan turgor sel. Dalam kaitannya dengan pengaturan tekanan turgor ini, peran yang penting adalah dalam proses membuka dan menutupnya stomata.

### **4. Belerang**

Sebagian besar belerang dalam tumbuhan terdapat sebagai penyusun asam amino sistein (cysteine) dan metionine (methionine). Senyawa lain yang mengandung belerang adalah vitamin tiamin (thiamine) dan biotin. Belerang juga terkandung dalam koenzim A, yaitu suatu senyawa esensial untuk respirasi dan sintesis serta penguaraian asam-asam lemak (fatty acid)

### **5. Magnesium**

Magnesium merupakan unsur penyusun klorofil. Selain itu, yang menjadikan magnesium tergolong sebagai unsur hara esensial yang penting adalah karena magnesium bergabung dengan ATP agar ATP dapat berfungsi dalam berbagai reaksi. Magnesium juga merupakan aktivator dari berbagai enzim yang berperan dalam reaksi pada fotosintesis, respirasi, serta pembentukan DNA dan RNA.

## **6. Kalsium**

Peran penting unsur kalsium adalah sebagai pengikat antara molekul-molekul fosfolipida atau antara fosfolipida dengan protein penyusun membran. Hal ini menyebabkan membran dapat berfungsi secara normal pada semua sel. Kalsium juga dapat memacu aktivitas beberapa enzim, sekaligus dapat menghambat aktivitas beberapa enzim lainnya.

## **7. Besi**

Besi merupakan unsur hara esensial karena merupakan bagian dari enzim-enzim tertentu dan merupakan bagian dari protein yang berfungsi sebagai pembawa elektron pada fase terang fotosintesis dan respirasi.

## **8. Klor**

Fungsi penting dari unsur klor adalah menstimulasi pemecahan molekul air pada fase terang fotosintesis. Selain itu, klor juga berperan untuk proses pembelahan sel.

## **9. Mangan**

Mangan berfungsi sebagai aktivator dari berbagai enzim. Selain itu, sebagaimana klor, mangan juga berfungsi menstimulasi pemecahan molekul air pada fase terang fotosintesis. Mangan juga merupakan komponen struktural dari sistem membran plasma.

## **10. Boron**

Fungsi boron dalam metabolisme tanaman memang masih belum begitu jelas. Namun, pada beberapa pendapat dilaporkan bahwa boron berperan dalam proses sintesis asam nukleat. Pendapat lain menduga bahwa boron

## *Pengantar Fisiologi Tumbuhan*

memiliki fungsi pada membran, namun secara peran spesifik unsur boron belum dapat diketahui dengan pasti.

### **11. Seng**

Seng berpartisipasi dalam pembentukan klorofil dan pencegahan kerusakan molekul klorofil. Beberapa enzim juga hanya bisa berfungsi jika terdapat unsur seng yang terikat kuat pada molekul enzim tersebut.

### **12. Tembaga**

Tembaga terdapat pada berbagai enzim atau protein yang terlibat dalam reaksi oksidasi dan reduksi. Contoh yang penting adalah pada enzim sitokrom oksidase (enzim respirasi pada mitokondria) dan plastosianin (protein pada kloroplas).

### **13. Molibdenum**

Fungsi molibdenum yang telah diketahui dengan jelas adalah sebagai bagian dari enzim nitrat reduktase yang mereduksi ion nitrat menjadi ion nitrit.

## **C. Gejala Tanaman yang Kekurangan Unsur Esensial**

### **1. Nitrogen (N)**

Gejala defisiensi nitrogen terjadi pada daun yang lebih tua sampai defisiensi menjadi parah. Jika daun yang lebih tua sudah berwarna kuning dan mati maka nitrogen dimobilisasi dalam bentuk amina dan amida yang dapat larut dan diekspor ke daun yang lebih muda sehingga cepat berkembang.



**Gambar 4.1.** Daun yang kekurangan unsur N

Kondisi tekanan nitrogen juga menyebabkan akumulasi pigmen antosianin terhadap berbagai spesies, menyebabkan warna keunguan pada batang, tangkai daun, dan bagian bawah daun; tulang daun di bawah permukaan daun tampak pucat; pertumbuhan lambat, kerdil, dan lemah. Selain itu, defisiensi nitrogen juga dapat mengurangi pertumbuhan tunas dan merangsang pembungaan dini. Hal ini bisa diatasi dengan pemberian pupuk yang mengandung nitrogen misalnya urea,  $\text{KNO}_3$  atau penyemprotan pupuk daun yang mengandung nitrogen yang tinggi. Namun, pemberiannya tidak boleh berlebihan karena akan menyebabkan tanaman rentan terkena jamur dan bakteri, batang mudah roboh, mudah patah, pembungaan lambat, dan produksi buah menurun.<sup>9</sup>

## 2. Fosfor (P)

Kekurangan unsur fosfor mengakibatkan kecacatan pada daun. Bagian bawah daun nampak berwarna merah keunguan terutama pada bagian tulang daun, tepi daun, batang, dan cabang juga berwarna ungu.

---

<sup>9</sup> William G. Hopkins & Norman P.A. Huner, *Introduction to Plant Physiology* (London, John Wiley & Sons, Inc; The University of Western Ontario, 2009), 68



**Gambar 4.2.** Daun yang kekurangan unsur P

Penumpukan antosianin biru dan ungu mengakibatkan pertumbuhan daun tidak optimal, seperti kecil, kerdil dan cepat gugur. Sama seperti nitrogen, kekurangan fosfor juga menyebabkan penuaan cepat dan kematian pada daun yang lebih tua. Selain itu pertumbuhan tanaman juga lambat, sistem perakaran terhambat, serta hasil buah dan biji berkurang. Kekurangan fosfor dapat diatasi dengan memberi pupuk yang mengandung unsur fosfor, misalnya pupuk TSP atau pupuk NPK.<sup>10</sup>

### **3. Kalium (K)**

Gejala kekurangan kalium muncul pertama di daun yang lebih tua, ditandai dengan adanya bintik-bintik atau klorosis yang diikuti oleh nekrotik sel (bintik-bintik jaringan mati) di bagian tepi daun.



**Gambar 4.3.** Daun yang kekurangan unsur K

---

<sup>10</sup> *Ibid*, 69

Pada tanaman monokotil terutama jagung, nekrotik sel dimulai dari ujung daun yang lebih tua dan bertahap berkembang di sepanjang sel-sel muda dekat pangkal daun. Tepi dan ujung daun menguning kemudian menjadi bercak coklat. Dalam jangka waktu beberapa hari bercak ini akan gugur sehingga daun tampak bergerigi dan akhirnya mati. Batang juga akan lemah, rentan terhadap jamur dan penyakit, bunga mudah rontok, buah terbentuk tidak sempurna, kecil, dan kualitasnya jelek. Kekurangan unsur kalium ini bisa diatasi dengan cara pemberian pupuk, misalnya KCL, NPK atau pupuk daun dengan kandungan kalium yang tinggi.<sup>11</sup>

#### **4. Sulfur (S)**

Defisiensi sulfur ditandai dengan klorosis atau pudarnya warna daun muda, termasuk juga jaringan di sekitar ikatan pembuluh. Hal ini terjadi karena berkurangnya sintesis protein dibanding penurunan langsung sintesis klorofil. Klorofil bisa distabilkan dengan pengikatan protein pada kloroplas. Jika sintesis protein terganggu maka kemampuan membentuk kompleks klorofil-protein stabil juga ikut terganggu.



**Gambar 4.4.** Daun yang kekurangan unsur S

---

<sup>11</sup> *Ibid*, 69

Kekurangan sulfur bukan masalah yang sulit karena ada banyak mikroorganisme yang mampu mengoksidasi sulfida atau menguraikan senyawa unsur organik. Selain itu, penggunaan bahan bakar fosil dalam industri dan fenomena alam seperti geyser, mata air belerang panas, dan gunung berapi dapat menyumbang ketersediaan oksida sulfur ( $\text{SO}_2$  dan  $\text{SO}_3$ ) ke atmosfer dalam jumlah besar.<sup>12</sup>

## 5. Kalsium (Ca)

Defisiensi kalsium menyebabkan pertumbuhan akar yang buruk, akarnya berubah warna dan mungkin terasa licin sebab rusaknya lamela tengah. Gejala kekurangan kalsium muncul pada jaringan yang paling muda terlebih dulu.



**Gambar 4.5.** Daun yang kekurangan unsur Ca

Gejala kekurangan unsur kalsium yaitu titik tumbuh pada tumbuhan menjadi lemah, bunga gugur, terdapat perubahan bentuk daun seperti menggulung atau mengeriting, kecil, dan akhirnya rontok. Kekurangan kalsium dapat diatasi dengan menambahkan kapur

---

<sup>12</sup> *Ibid*, 70

dolomit, kalsium karbonat, serta pupuk kalsium kandungan Ca 80-90 %.<sup>13</sup>

## **6. Magnesium (Mg)**

Gejala kekurangan magnesium ditandai dengan klorosis karena kerusakan klorofil dalam lamina daun yang terletak di antara pembuluh darah. Kloroplas di pembuluh vena kurang rentan terhadap defisiensi magnesium dan mempertahankan klorofilnya lebih lama.



**Gambar 4.6.** Daun yang kekurangan unsur Mg

Defisiensi terjadi muncul pada daun yang lebih tua kemudian ke daun yang lebih muda. Pada permukaan daun tua timbul bercak-bercak kuning. Hal ini disebabkan Mg diangkut dari daun tua ke daun muda sehingga daun tua menjadi lemah dan mudah terserang penyakit. Magnesium berperan aktif dalam transportasi energi dari beberapa enzim dalam tanaman. Selain itu, unsur ini dominan berada di daun dalam rangka menyediakan klorofil untuk fotosintesis. Kekurangan magnesium dapat diatasi dengan menambahkan pupuk kieserit, kapur dolomite atau pupuk lain yang mengandung unsur Mg.<sup>14</sup>

---

<sup>13</sup> *Ibid*, 70

<sup>14</sup> *Ibid*, 70

## 7. Besi (Fe)

Kekurangan zat besi menyebabkan hilangnya klorofil dan degenerasi struktur kloroplas. Klorosis muncul pertama pada daun yang lebih muda karena mobilitas zat besi sangat rendah dan sulit ditarik dari daun yang lebih tua. Klorosis dapat berkembang ke vena dan apabila kerusakan cukup parah daunnya akan kecil dan menjadi putih, tulang daun hijau juga berubah menjadi kuning kemudian memutih, dan pertumbuhannya juga terhambat.



**Gambar 4.7.** Daun yang kekurangan unsur Fe

Kekurangan zat besi umumnya karena kecenderungan  $\text{Fe}^{3+}$  untuk membentuk oksida hidro yang tidak larut ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) pada pH biologis. Masalah kekurangan zat besi biasanya dapat diatasi dengan menyediakan zat besi sintetik, baik langsung ke tanah atau sebagai semprotan daun. Kekurangan zat besi menginduksi beberapa perubahan morfologis dan biokimiawi dalam akar dikotil dan monokotil.<sup>15</sup>

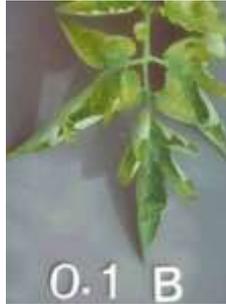
## 8. Boron (B)

Kekurangan boron ditandai dengan kelainan pada dinding sel. Respon yang cepat pada tanaman yang kekurangan boron adalah penghambatan pembelahan sel

---

<sup>15</sup> *Ibid*, 71

dan perpanjangan di akar primer dan sekunder. Hal ini memberikan bentuk akar yang gemuk dan lebat. Pembelahan sel pada daun muda juga dihambat diikuti dengan nekrosis meristem.



**Gambar 4.8.** Daun yang kekurangan unsur B

Boron merangsang perkecambahan dan perpanjangan serbuk sari. Defisiensi boron diperlihatkan dengan ruas batang yang pendek, tanaman lebat, roset dan batang yang membesar, sehingga menyebabkan gangguan yang dikenal sebagai “retak batang” seperti pada seledri. Dalam akar penyimpanan seperti bit gula, gangguan yang dikenal sebagai “jantung busuk” disebabkan oleh kematian sel di daerah pertumbuhan.<sup>16</sup> Penanggulangan pada tumbuhan yang kekurangan boron adalah dengan pemberian pupuk HGF Borate ditaburkan secara tipis mepet ke bagian batang.

## **9. Tembaga (Cu)**

Gejala kekurangan unsur tembaga ditandai dengan daun yang berwarna hijau kebiruan, tunas daun menguncup, tumbuh kecil, pertumbuhan bunga terhambat, pertumbuhan tanaman secara umum

---

<sup>16</sup> *Ibid*, 73

## *Pengantar Fisiologi Tumbuhan*

terhambat, dan distorsi daun muda.<sup>17</sup> Gejala kekurangan unsur Cu pada tanaman dapat diatasi dengan pemberian pupuk yang mengandung  $\text{CuSO}_4$ .



**Gambar 4.9.** Daun yang kekurangan unsur Cu

### **10. Seng (Zn)**

Kekurangan seng ditandai dengan daun yang lebih tua berwarna kekuningan atau kemerahan, daun berlubang, mengering dan akhirnya mati. Gejala kekurangan seng lainnya adalah pertumbuhan lambat, daun kerdil, mengerut, atau menggulung di satu sisi yang disusul dengan kerontokan, bakal buah menguning, terbuka, dan akhirnya gugur.



**Gambar 4.10.** Daun yang kekurangan Zn

---

<sup>17</sup> *Ibid*, 73

Gangguan yang berhubungan dengan defisiensi seng mencerminkan gangguan dalam metabolisme hormon auksin asam indol-3-asetat (IAA). Biasanya, kekurangan seng dapat memperpendek ruas dan ukuran daun menjadi lebih kecil. Peran seng terhadap metabolisme auksin masih belum jelas, tetapi kadar auksin pada tanaman yang kekurangan seng diketahui menurun.<sup>18</sup> Tumbuhan yang kekurangan unsur Zn bisa diberi pupuk yang mengandung unsur Zn dengan dosis yang tepat.

## **11. Mangan (Mn)**

Kekurangan mangan dapat tersebar luas di beberapa area, tergantung pada kondisi tanah, cuaca, dan jenis tanaman. Kekurangan unsur ini diperburuk oleh pH tanah yang rendah (<6) dan konten organik tinggi.



**Gambar 4.11.** Daun yang kekurangan unsur Mn

Kekurangan mangan ditandai oleh penampilan abu-abu kehijauan dan bintik-bintik berbentuk oval di daerah basal daun muda. Hal ini dapat menyebabkan klorosis ekstrim di antara daun-daun serta perubahan warna dan cacat pada biji kacang-kacangan. Selain itu, kekurangan mangan juga menyebabkan pertumbuhan tanaman

---

<sup>18</sup> *Ibid*, 73

menjadi kerdil, daun berwarna kekuningan atau kemerahan, jaringan daun di beberapa tempat mati dan bentuk biji yang tidak sempurna.<sup>19</sup> Tumbuhan yang kekurangan mangan dapat diberikan pemupukan tambahan secara kontinyu terutama pupuk yang mengandung banyak unsur mikro. Biasanya beberapa produk komersial baik yang murah atau mahal sudah dilengkapi dengan unsur mikro mangan, bentuknya beragam bisa saja berbentuk granul, serbuk maupun cairan.

## 12. Molibdenum (Mo)

Pada tanaman seperti kacang-kacangan, yang tergantung pada nitrogenfiksasi, defisiensi molibdenum menimbulkan gejala defisiensi nitrogen. Defisiensi molibdenum dikenal sebagai "*whiptail*" yaitu terjadi pembengkokan dan kecacatan pada daun.



**Gambar 4.12.** Daun yang kekurangan unsur Mo

Tanaman yang kekurangan unsur Mo menunjukkan terjadinya klorosis dan nekrosis di sepanjang vena daun yang lebih tua. Seperti mikronutrien lain, molibdenum tergantung pada spesies tertentu, banyak tersebar di Brassicaceae dan

---

<sup>19</sup> *Ibid*, 74

jagung. Kekurangan molibdenum diperburuk ketika tanah asam dengan kandungan endapan besi yang banyak. Cara menangani kekurangan unsur Mo yaitu dengan menambahkan pupuk organik yang tinggi atau penyemprotan pada daun dengan pupuk yang mengandung mikronutrien lengkap.<sup>20</sup>

### **13. Klorin (Cl)**

Tanaman yang kekurangan klorin cenderung menunjukkan pertumbuhan yang lambat, percabangan akar yang abnormal, layu di bagian ujung daun, dan mengalami klorosis.<sup>21</sup> Tumbuhan yang kekurangan unsur klorin bisa diatasi dengan pemberian pupuk yang mengandung unsur yang mengandung klorin.

### **14. Nikel (Ni)**

Defisiensi nikel dapat menyebabkan tekanan pada semaian bibit serta menimbulkan gejala klorosis dan nekrotik pada daun. Untuk mengatasi kekurangan nikel, perlu melakukan pemurnian ekstensif garam nutrisi dan kemudian disemaikan dalam larutan yang kekurangan nikel.

## **D. Soal Latihan**

Jelaskan pengertian unsur esensial!

1. Sebutkan macam-macam unsur esensial yang dibutuhkan tanaman!
2. Sebutkan macam unsur esensial yang berperan dalam proses fotosintesis!

---

<sup>20</sup> *Ibid*, 74

<sup>21</sup> *Ibid*, 74

*Pengantar Fisiologi Tumbuhan*

3. Sebutkan jenis unsur esensial yang diperlukan oleh tanaman yang mengalami abnormalitas pada akarnya!
4. Sebutkan gejala yang tampak pada tumbuhan yang kekurangan unsur kalium!

**Tugas!**

Lengkapilah tabel di bawah ini!

No.	Jenis unsur esensial	Fungsi	Gejala kekurangan unsur esensial

## BAB V

# FOTOSINTESIS

---

---

### A. Pengertian Fotosintesis

Fotosintesis merupakan reaksi oksidasi air ( $H_2O$ ) dan reduksi karbondioksida ( $CO_2$ ). Reaksi oksidasi  $H_2O$  adalah peristiwa pemindahan elektron yang disertai dengan pelepasan  $O_2$ , sedangkan reduksi  $CO_2$  adalah pembentukan senyawa organik, misalnya karbohidrat. Jadi fotosintesis merupakan proses pengangkutan elektron  $H_2O$  dengan bantuan cahaya. Selain berperan dalam pengangkutan elektron, cahaya juga berperan dalam pembentukan ATP. Dalam menjalankan perannya untuk pengangkutan elektron, cahaya berperan dalam reaksi oksidasi (mengoksidasi  $H_2O$ ) dan reduksi. Reduksi diawali dengan adanya reduksi  $NADP^+$  menjadi NADPH dan selanjutnya terjadi reduksi  $CO_2$ .

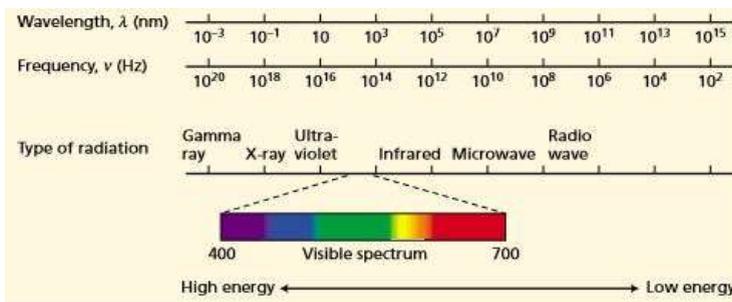
### B. Pigmen pada Proses Fotosintesis

Berdasarkan sumbernya, energi dibagi menjadi dua macam, yaitu energi cahaya dan energi kimia. Organisme yang menggunakan energi cahaya guna menyintesis bahan untuk keperluan hidup organiknya disebut fototrof atau fototrofik. Sedangkan organisme yang menggunakan energi kimia disebut kemototrof atau kemotrofik. Fototrof

## Pengantar Fisiologi Tumbuhan

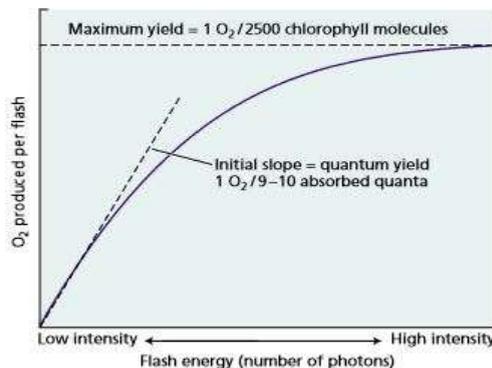
mempunyai karakteristik tersendiri yaitu adanya pigmen, yang termasuk salah satu bentuk klorofil, yang menyerap energi cahaya menjadi energi kimia. Adapun istilah lain dari fototrofisme adalah fotosintesis. Fotosintesis merupakan proses pembentukan bahan organik dari bahan anorganik ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ) dengan bantuan cahaya matahari dan klorofil.

Matahari adalah sumber energi dari semua makhluk hidup. Radiasi yang sampai ke bumi hanya sebagian kecil dari spektrum elektromagnetik. Panjang gelombang cahaya matahari yang sampai di bumi yaitu 310 sampai 2300 nm. Dari keseluruhan kisaran radiasi segmen spektrum, yang paling penting bagi kehidupan adalah panjang gelombang sekitar 380 nm hingga 750 nm. Sedangkan panjang gelombang 225 nm (ultraviolet) juga diradiasi oleh matahari. Tetapi lamda ini adalah foton yang sangat tinggi energinya yang berbahaya bagi banyak kehidupan di bumi. Oleh karena itu, ozon atmosfer yang berperan sebagai penghalang sinar matahari secara langsung yang panjang sinarnya lebih dari 2500 nm dihilangkan oleh uap air dan  $\text{CO}_2$  di atmosfer tersebut. Cahaya yang tampak adalah sebagian kecil dari cahaya yang sampai ke bumi.



**Gambar 5.1.** Spektrum elektromagnetik (Licoln Taiz and Eduardo Zeiger, 2009)

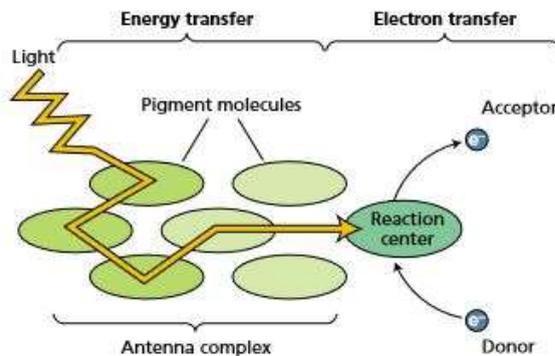
Molekul yang mengabsorpsi cahaya yang tampak adalah pigmen berwarna. Elektron yang tereksitasi biasanya elektron yang berasosiasi dengan ikatan rangkap yang tidak jenuh. Panjang gelombang ( $\lambda$ ) dan frekuensi ( $\nu$ ) berlawanan tetapi saling terikat. Mata kita sensitif karena hanya dapat menerima panjang gelombang radiasi dengan kisaran tertentu, yaitu yang terlihat daerah dengan luas kisaran antara 400 nm (ungu) sampai dengan 700 nm (merah). Cahaya dengan panjang gelombang yang pendek (frekuensi tinggi) memiliki kandungan energi yang tinggi, sedangkan cahaya dengan panjang gelombang yang panjang (frekuensi rendah) memiliki energi rendah.<sup>22</sup> Misalnya klorofil, ia memiliki tingkat ketidak jenuhan yang tinggi dan mengabsorpsi cahaya yang efisien terutama cahaya merah dan biru. Sifat cahaya ada dua yaitu sifat gelombang dan sifat partikel (foton / kuantum). Energi dalam setiap foton berbanding terbalik dengan panjang gelombang, jadi gelombang cahaya ungu dan biru mempunyai energi foton yang lebih tinggi daripada panjang gelombang cahaya jingga (orange) dan merah.



**Gambar 5.2.** Hubungan produksi oksigen dengan energi cahaya (Licoln Taiz and Eduardo Zeiger, 2009)

<sup>22</sup> Licoln Taiz and Eduardo Zeiger, *Plant Physiology*, hlm.113

Hukum Stark Einstein menyatakan bahwa setiap molekul hanya dapat menyerap satu foton dan foton tersebut menyebabkan tereksitasinya satu elektron. Jika yang menyerap energi foton itu adalah molekul klorofil atau pigmen lainnya, maka molekul tersebut akan berada dalam keadaan tereksitasi, dan energi eksitasi inilah yang digunakan dalam fotosintesis. Waktu untuk tereksitasi ini adalah kurang lebih  $10^{-9}$  detik. Hal ini disebabkan oleh beberapa factor. Energi dapat hilang karena panas/kalor. Sebagian energi juga dapat hilang karena panjang gelombang cahaya yang berbeda-beda dan energi terpakai saat melakukan reaksi kimia pada fotosintesis.



**Gambar 5.3.** Konsep dasar transfer energi selama fotosintesis  
(Licoln Taiz and Eduardo Zeiger, 2009)

Banyak pigmen berfungsi sebagai sinyal/antena dengan tujuan mengumpulkan cahaya dan mentransfer energinya untuk reaksi pusat, dimana reaksi kimia menyimpan beberapa energi dengan transfer elektron dari pigmen klorofil. Transfer energi di antena adalah murni fenomena fisik dan tidak melibatkan perubahan kimia.<sup>23</sup> Senyawa kimia yang berfungsi sebagai pengubah energi cahaya menjadi

---

<sup>23</sup> *Ibid*, hlm 121

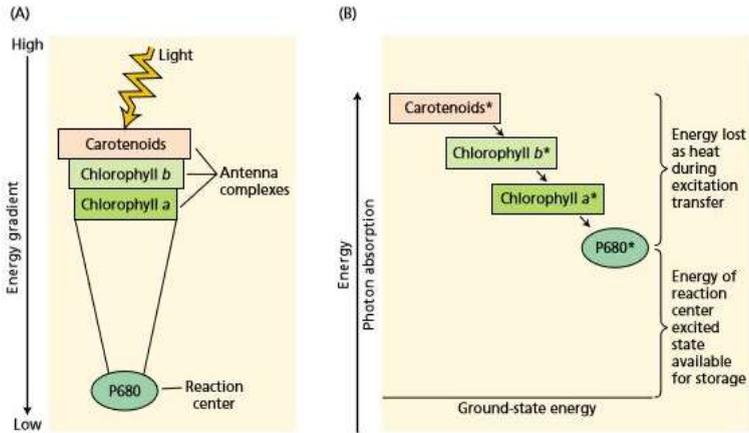
energi kimia pada tumbuhan tinggi adalah pigmen-pigmen yang terdapat dalam kloroplas. Melalui pigmen-pigmen inilah cahaya memulai proses fotosintesis. Pigmen-pigmen yang ada pada fotosintesis adalah klorofil a, b, dan karotenoid (karoten dan lutein yang banyak pada tumbuhan). Pigmen-pigmen tersebut terdapat dalam klorofil yaitu pada membran internal yang disebut tilakoid. Pada beberapa daerah, tilakoid itu menumpuk membentuk grana.<sup>24</sup> Dalam kloroplas tanaman tinggi, dikelilingi oleh bagian dalam dan luar membran. Tipe pigmen dalam kloroplas yaitu klorofil a dan klorofil b. Klorofil a dan klorofil b merupakan pigmen utama fotosintesis yang berperan menyerap cahaya violet, biru, merah dan memantulkan cahaya hijau pada keadaan normal. Proporsi klorofil-a jauh lebih banyak daripada klorofil -b. Molekul klorofil merupakan derivat porfirin yang memiliki struktur tetrapirrol siklis dengan satu cincin pirol yang sebagian tereduksi.

Klorofil a dan klorofil b berbeda hanya dalam satu gugus fungsional yang terikat ke struktur organik (cincin porfirin). Pada daun, klorofil biasanya berlimpah sehingga menutupi warna pigmen lain. Sehingga sebagian besar daun kebanyakan berwarna hijau.<sup>25</sup>

---

<sup>24</sup> Dardjat Sasmtamihardja, Arbayyah H. Siregar. *PROYEK PEMBINAAN TENAGA KEPENDIDIKAN PERSIAPAN PERKULIAHAN PROGRAM LANJUTAN MIPA LEMBAGA PENDIDIKAN TENAGA KEPENDIDIKAN (PROGRAM B) BIDANG BIOLOGI DASAR-DASAR FISILOGI TUMBUHAN*. FALKUTAS MATEMATIKA ILMU PENGETAHUAN ALAM ISNTITUT TEKNOLOGI BANDUNG: 1990. Hlm.144-148.

<sup>25</sup> Sumenda, L., dkk, Analisis Kandungan Klorofil Daun Mangga (*Mangifera Indica L.*). Pada tingkat Perkembangan yang Berbeda. *Jurnal Biologos*. Agustus 2011, Vol. 1 Nomor 1. (2011).



**Gambar 5.4.** Penyaluran eksitasi dari antenna sistem ke reaksi pusat (Licoln Taiz and Eduardo Zeiger, 2009)

Gambar (A), pigmen lebih dekat dengan reaksi pusat yang lebih rendah energinya dibandingkan dari reaksi pusat. Energi gradien memastikan bahwa eksitasi transfer pada reaksi pusat. Pada gambar (B), beberapa energi hilang sebagai panas sekitar lingkungannya, tetapi di bawah kondisi yang optimal hampir semua eksitasi diserap dalam antenna kompleks yang dikirim ke reaksi pusat. Saat eksitasi dari klorofil B menyerap maksimal 650 nm ke klorofil yang menyerap maksimal 670nm, perbedaan energi antara kedua klorofil hilang saat lingkungan panas.<sup>26</sup>

Tipe pigmen dalam kloroplas yang lain adalah karotenoid. Karotenoid merupakan suatu persenyawaan hidrokarbon dengan rumus kimia  $C_{40}H_{56}$  yang memiliki warna kuning dan jingga, karena pigmen ini menyerap cahaya violet dan biru-hijau. Karotenoid dapat memperluas spektrum warna yang menggerakkan fotosintesis. Namun fungsi yang penting yaitu sebagai fotoproteksi. Fotoproteksi adalah senyawa yang mampu menyerap dan membuang

<sup>26</sup> *Ibid.*

energi cahaya berlebihan yang bisa merusak klorofil dengan berinteraksi bersama oksigen membentuk molekul oksidatif reaktif yang berbahaya bagi sel.<sup>27</sup>

### **C. Reaksi Terang pada Proses Fotosintesis**

Fotosintesis adalah reaksi penyusunan senyawa-senyawa sederhana menjadi senyawa kompleks organik dengan menggunakan energi dari cahaya. Senyawa sederhana yang dibutuhkan berupa zat anorganik yaitu karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), air (H<sub>2</sub>O), dan garam-garam mineral terlarut. Fotosintesis terjadi tidak hanya pada organisme eukariotik seperti tanaman hijau dan ganggang hijau tetapi juga dalam organisme prokariotik seperti *cyanobacteria* dan kelompok bakteri tertentu. Pada tanaman tingkat tinggi dan ganggang hijau, reaksi fotosintesis terjadi pada kloroplas, yang merupakan mesin termodinamika yang luar biasa. Kloroplas menangkap energi radiasi dari sinar matahari dan merubah beberapa di antaranya dalam bentuk kimia.<sup>28</sup>

Klorofil merupakan molekul dalam pusat reaksi yang mampu menyerap cahaya secara langsung dan memulai fotosintesis. Klorofil paling sering diberi energi secara tidak langsung dengan cara energi ditransfer dari kompleks panen cahaya (LHCs) di antena terkait. Bahkan pada intensitas cahaya maksimum ditemui oleh organisme fotosintetik (sinar matahari siang hari daerah tropis), masing-masing klorofil hanya menyerap sekitar satu foton per detik, yang tidak cukup untuk mendukung fotosintesis yang cukup untuk kebutuhan tanaman. Keterlibatan LHC sangat meningkatkan efisiensi. Fotosintesis, pada cahaya utamanya meningkatkan penyerapan cahaya 680-nm dan memperluas jangkauan

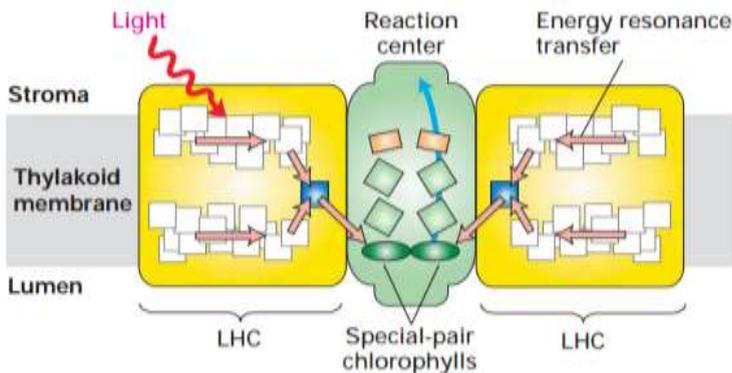
---

<sup>27</sup> Campbell, NA dkk. *Biologi jilid 3*, (Jakarta: Erlangga, 2008), hlm. 198

<sup>28</sup> William G. Hopkins, Norman P. Huner, *Plant Physiology*, (The University of Western Ontario: John Wiley & Sons, Inc, 2009), hlm. 109

panjang gelombang cahaya yang dapat diserap oleh pigmen antenna lainnya.

Foton dapat diserap oleh salah satu molekul pigmen dalam LHC. Energi yang diserap kemudian dengan cepat dipindahkan  $<10^{-9}$  detik ke salah satu dari dua "pasangan khusus" klorofil suatu molekul klorofil *a* di pusat reaksi terkait, di mana ia mempromosikan pemisahan muatan fotosintesis utama. Protein LHC mempertahankan pigmen molekul dalam orientasi dan posisi yang tepat serta optimal untuk penyerapan cahaya dan transfer energi, sehingga memaksimalkan transfer resonansi energi yang sangat cepat dan efisien dari antenna pigmen untuk klorofil reaksi pusat.<sup>29</sup>



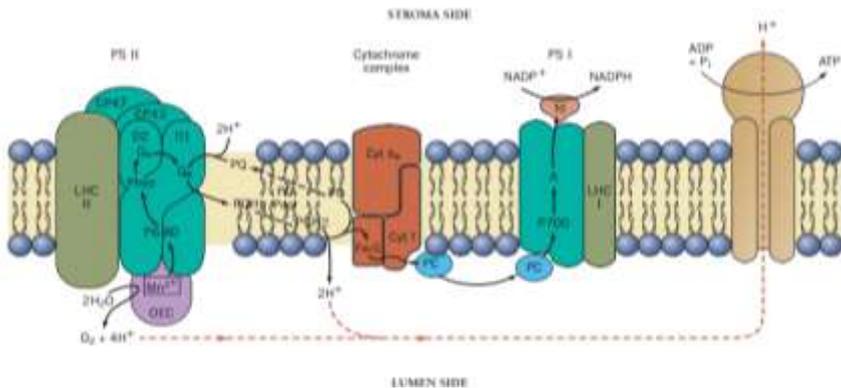
**Gambar 5.5.** Transfer energi dari kompleks pemanenan cahaya (Molecular Cell Biology, 2004)

Pada reaksi terang, cahaya yang diserap oleh klorofil menggerakkan transport elektron dan hidrogen dari air ke penerima (aseptor) yang disebut NADH yang berfungsi sebagai pembawa elektron dalam respirasi seluler. Reaksi terang menggunakan tenaga matahari untuk mereduksi NADP menjadi NADPH dengan cara menambahkan sepasang

---

<sup>29</sup> Glencoe, *Biology a Molecular Approach*, (New York: BSCS, 2006), hlm.105-106.

elektron bersama dengan nukleus hidrogen atau  $H^+$ . Reaksi terang juga menghasilkan ATP dengan memberi tenaga bagi penambahan gugus fosfat yang pada ADP, proses ini disebut fotofosforilasi yang serupa dengan fosforilasi oksidatif yang terjadi di mitokondria. Koenzim tereduksi (NADPH) yang dihasilkan dalam proses ini sering disebut dengan reducing power. Kedua produk yang dihasilkan ini sangat penting untuk asimilasi  $CO_2$ .<sup>30</sup>



**Gambar 5.6.** Organisasi sistem transpor elektron fotosintesis dalam membran tilakoid (Licoln Taiz and Eduardo Zeiger, 2009)

Skema rantai transpor elektron fotosintesis yang menggambarkan pengaturan PSI, PSII, dan kompleks sitokrom  $b_6 / f$  terjadi dalam membran tilakoid. Pengurangan PQ dan bersamaan protonasi terjadi pada sisi stroma membran tilakoid, oksidasi  $QH_2$  oleh sitokrom kompleks  $b_6 / f$  (Cyt $b_6 / f$ ) membutuhkan difusi  $QH_2$  dari sisi stroma ke sisi lumen selaput tilakoid. Pengaturan inilah yang memunculkan gradien proton yang diperlukan untuk sintesis ATP. Rantai transpor elektron ini akan ditinjau kembali nantinya. Konsekuensi lain dari pengaturan vektorial adalah oksidasi air dan reduksi  $NADP^+$  terjadi pada sisi berlawanan

<sup>30</sup> John W. Kimball, *Biologi Jilid 1*, (Jakarta: Erlangga, 1992), hlm. 132

dari membran tilakoid. Air teroksidasi, akumulasi proton pada sisi lumen membran, dan berkontribusi pada gradien akan mendorong sintesis ATP. Namun keduanya, NADPH dan ATP diproduksi di stroma yang akan digunakan dalam siklus pengurangan karbon.<sup>31</sup>

Reaksi terang terjadi di grana, persisnya di membran tilakoid. Reaksi terang menggunakan 2 fotosistem yang berhubungan. Fotosistem adalah sekelompok pigmen yang merupakan satu kesatuan alat penerima energi cahaya. Membran tilakoid ditempati oleh dua tipe fotosistem yang bekerja sama dalam reaksi terang fotosintesis. Nama kedua fotosistem adalah fotosistem II (PS II) dan fotosistem I (PS I), (fotosistem I diberi nama demikian karena ditemukan terlebih dahulu, namun fotosintesis II berfungsi pertama kali dalam reaksi terang). PSI ditemukan secara eksklusif di membran stroma. PSII sebagian besar terdapat di membran grana. Pusat reaksi klorofil pada PSI dan PSII berbeda dalam hal penyerapan cahaya maksimal karena perbedaan dalam lingkungan proteinnya.

### **a. Fotosistem I**

Masing-masing fotosistem memiliki kompleks pusat reaksi dan penerima elektron primer yang bersebelahan dengan pasangan khusus molekul klorofil a yang berasosiasi dengan protein spesifik. Klorofil a pada kompleks pusat reaksi fotosistem I disebut P<sub>700</sub>, karena paling efektif menyerap cahaya yang memiliki panjang gelombang 700 nm.<sup>32</sup> Fotosistem I berisi klorofil b, klorofil a<sub>670</sub> klorofil a<sub>695</sub>, dan sejumlah kecil klorofil a khusus yang

---

<sup>31</sup> William G. Hopkins, Norman P. Huner, *Plant Physiology*, (The University of Western Ontario: John Wiley & Sons, Inc, 2009), hlm. 117

<sup>32</sup> Neil A. Campbell, Jane B. Reece. dkk, *BIOLOGI CAMPBELL jilid 1*, (Jakarta: Erlangga, 2008), hlm.200

mengabsorpsi cahaya dengan panjang gelombang 700 nm, disebut P<sub>700</sub>. P<sub>700</sub> merupakan pusat reaksi. Jika cahaya mengenai PS I, klorofil akan mengalami eksitasi, dan eksitasi ini menjaral di antara klorofil ke P<sub>700</sub>.

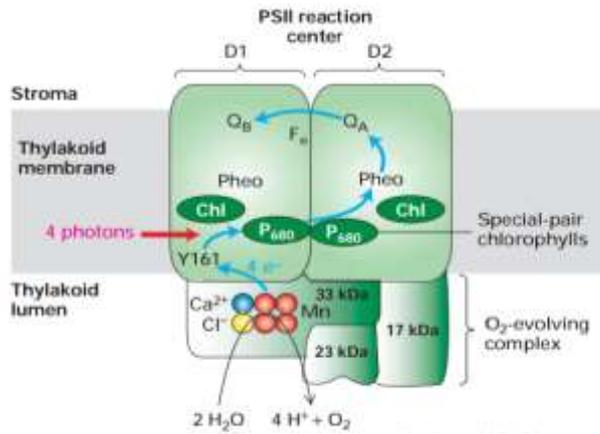
## **b. Fotosistem II**

Pusat reaksi fotosistem II dikenal sebagai P<sub>680</sub> karena pigmen ini paling bagus menyerap cahaya yang memiliki panjang gelombang 680 nm. Pada fotosistem II, dua molekul air teroksidasi oleh empat reaksi pemisahan berturut-turut oleh fotosistem II untuk menghasilkan satu molekul oksigen diatom dan empat ion hidrogen; elektron yang dihasilkan pada tiap tahap dipindahkan ke residu tirosin redoks-aktif yang kemudian mereduksi spesies klorofil a yang berpasangan yang telah terfotooksidasi yang disebut P<sub>680</sub> yang berguna sebagai donor elektron primer (digerakkan oleh cahaya) pada pusat reaksi fotosistem II.

Oksidasi air terkatalisasi pada fotosistem oleh fotosistem II oleh suatu struktur redoks-aktif yang mengandung empat ion mangan dan satu ion kalsium. Kompleks evolusi oksigen ini mengikat dua molekul air dan menyimpan empat padanannya yang telah teroksidasi yang diperlukan untuk melakukan reaksi oksidasi air. Fotosistem II adalah satu-satunya enzim biologi yang diketahui melaksanakan oksidasi air ini. Ion hidrogen berkontribusi terhadap potensi kemiosmosis transmembran yang berujung pada sintesis ATP. Oksigen adalah produk ampas dari reaksi cahaya, namun sebagian

besar organisme di bumi menggunakan oksigen untuk respirasi sel, termasuk organisme fotosintesis.<sup>33</sup>

Akseptor elektron diberi nama Q. Akseptor ini dapat menghilangkan fluoresensi klorofil a pada PS. II. Akseptor ini dapat berupa plastoquinon. Setelah elektron diterima Q, elektron yang bergerak menurunkan potensialnya melalui sitokrom b<sub>559</sub> dan plastoquinon ke P<sub>700</sub>. Pusat kedua pigmen ini, yaitu P<sub>680</sub> dan P<sub>700</sub> merupakan molekul klorofil a yang identik. Akan tetapi, asosiasi pigmen-pigmen tersebut dengan protein yang berbeda dalam membran tilakoid mempengaruhi distribusi elektron pada kedua pigmen dan penyebab sedikit perbedaan dalam hal sifat penyerapan cahayanya. Reaksi fotokimia P<sub>680</sub> direduksi kembali dengan elektron yang berasal dari air, dengan bagan reaksi  $2\text{H}_2\text{O} = 4\text{e} + 4\text{H} + \text{O}_2$ .



**Gambar 5.7.** Aliran Elektron dan Oksigen di PII (Molecular Cell Biology, 2004)

<sup>33</sup> Glencoe, *Biology a Molecular Approach*, (New York: BSCS, 2006), hlm.108

## **D. Mekanisme Aliran Elektron**

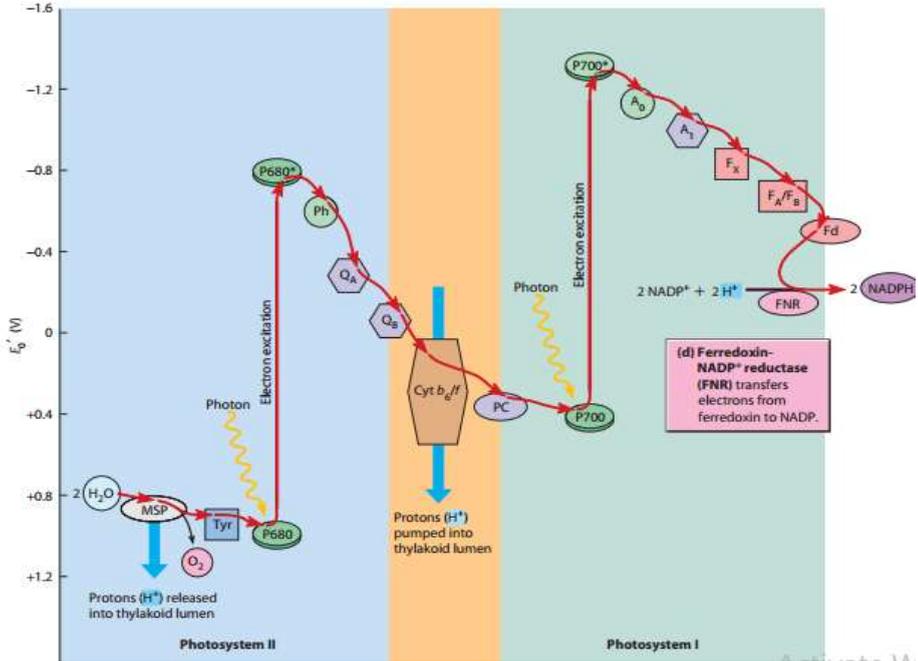
Dua jalur reaksi yang terjadi dalam reaksi terang dan bergantung pada cahaya adalah fotofosforilasi siklik (aliran elektron siklik) dan non siklik (aliran elektron linear). Jalur siklik yang lebih sederhana masih berjalan pada sebagian besar organisme fotosintetik. Fotofosforilasi siklik menghasilkan ATP. Siklus tersebut tidak membentuk NADPH dan tidak melepaskan oksigen. Elektron yang hilang dari PS I didaur ulang kembali di dalamnya. Setelah itu, sistem fotosintetik dalam beberapa organisme menjadi termodifikasi sehingga fotosistem II menjadi bagian di dalamnya. Modifikasi tersebut ialah awal dari kombinasi urutan reaksi yang menghilangkan elektron dari molekul air dengan pelepasan oksigen dan ion hydrogen. PS II ialah satu-satunya sistem biologis yang cukup kuat untuk teroksidasi menarik elektron dari air.

### **1. Aliran Elektron Nonsiklik**

Cahaya menggerakkan sintesis ATP dan NADPH dengan cara memberi energi pada kedua fotosistem yang tertanam dalam membran tilakoid kloroplas. Kunci transmorfasi energi ini adalah aliran elektron melalui fotosistem dan komponen-komponen molekuler lain tertanam dalam membran tilakoid. Reaksi ini disebut aliran elektron linear yang terjadi selama reaksi terang fotosintesis.<sup>34</sup> Aliran elektron nonsiklik memiliki rantai transport elektron yang lebih panjang dan menggunakan fotosistem I maupun fotosistem II.

---

<sup>34</sup> Neil A. Campbell, Jane B. Reece. dkk, *BIOLOGI CAMPBELL jilid 1*, (Jakarta: Erlangga, 2008), hlm.204



**Gambar 5.8.** Aliran elektron nonsiklik (Molecular Cell Biology, 2004)

Aliran elektron non siklik menghasilkan ATP dan NADPH, sedangkan aliran elektron siklik hanya menghasilkan ATP saja. Aliran jaringan inilah yang terjadi pada reaksi terang fotosintesis, dan biasa digambarkan dalam sebuah skema yang membentuk huruf Z. Mekanisme jalannya elektron adalah sebagai berikut:

- a. Foton cahaya menumbuk molekul pigmen dalam kompleks cahaya, mendorong satu elektronnya ke tingkat energi yang lebih tinggi. Ketika elektron ini jatuh kembali ke kondisi dasarnya, suatu elektron pada molekul pigmen di dekatnya secara bersamaan terangkat ke kondisi tereksitasi. Proses ini berlanjut hingga mencapai pasangan molekul klorofil a P<sub>680</sub> pada kompleks pusat reaksi PS II.

- b. Elektron ditransfer dari P680 yang tereksitasi ke penerima elektron primer.
- c. Suatu enzim mengkatalisis pemecahan satu molekul air menjadi dua elektron, dua ion hidrogen dan satu atom hidrogen. Elektron disuplai satu persatu pasangan P<sub>680</sub>, masing-masing menggantikan satu elektron yang ditransfer ke penerima elektron primer. P<sub>680</sub> merupakan agen pengoksidasi biologis terkuat yang lubang elektronnya harus diisi. Ini sangat memfasilitasi transfer elektron dari molekul air yang terurai. Atom oksigen segera berkombinasi dengan atom oksigen lain yang dihasilkan dari pemecahan molekul air sehingga menghasilkan O<sub>2</sub>.
- d. Masing-masing elektron yang terfotoeksitasi diteruskan dari penerima elektron primer di PS II ke PS I melalui rantai transport elektron, yang komponen-komponennya mirip dengan komponen pada rantai transport elektron yang berfungsi dalam respirasi seluler. Rantai transport elektron antara PS II dan PS I tersusun atas pembawa elektron bernama plastokuinon (*plastoquinone*, Pq), suatu kompleks sitokrom dan suatu protein yang disebut plastosianin (*plastocyanin*, Pc).<sup>35</sup>
- e. Kejatuhan eksergonik elektron-elektron ini menuju tingkat energi yang melewati kompleks sitokrom, pemompaan proton menciptakan gradien proton yang kemudian digunakan dalam kemiosmosis.
- f. Energi cahaya ditransfer melalui pigmen-pigmen kompleks pemanen cahaya menuju kompleks pusat reaksi PS I, mengeksitasi satu elektron pada pasangan

---

<sup>35</sup> Neil A. Campbell, Jane B. Reece. dkk, *BIOLOGI CAMPBELL jilid 1*, (Jakarta: Erlangga, 2008), hlm.205

molekul klorofil a  $P_{700}$  di tempat itu. Elektron yang terfotoeksitasi ini kemudian ditransfer ke penerima elektron primer PS I, menciptakan lubang elektron di  $P_{700}$  yang kini disebut  $P_{700}^+$ . Dengan kata lain,  $P_{700}^+$  sekarang dapat bertindak sebagai penerima elektron, menerima elektron yang mencapai dasar rantai transport elektron dari PS II.

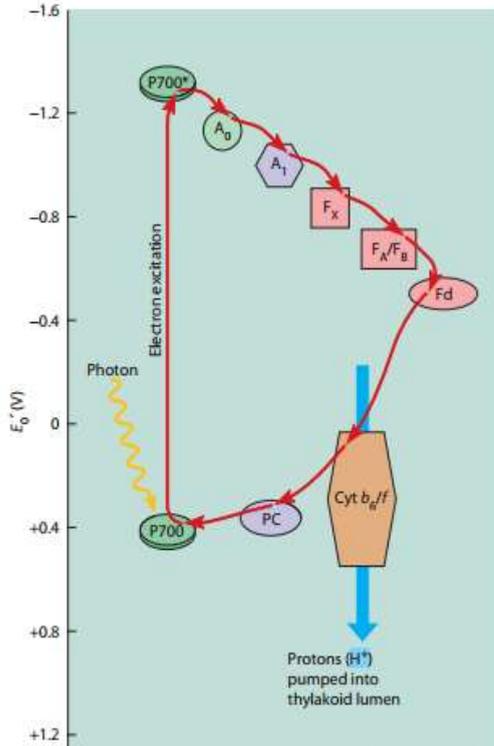
- g. Elektron yang terfotoeksitasi diteruskan dalam serangkaian reaksi redoks dari penerima elektron primer di PS I menuju rantai transport elektron kedua melalui protein ferredoksin (*ferredoxin*, Fd). Rantai ini tidak menciptakan gradient proton sehingga tidak menghasilkan ATP.
- h. Enzim  $NADP^+$  reduktase mengkatalisis transfer elektron dari Fd ke  $NADP^+$ . Dua elektron dibutuhkan untuk mereduksi  $NADP^+$  menjadi  $NADPH$ .<sup>36</sup>

## **2. Aliran Elektron Siklik**

Aliran elektron siklik memiliki rantai transport elektron yang lebih pendek dan bertujuan untuk menambah pasokan atau ketersediaan ATP, tetapi tidak memproduksi  $NADPH$ . Tambahan ketersediaan ATP ini sangat membantu pada reaksi selanjutnya yaitu pada siklus Calvin (reaksi gelap). Aliran elektron siklik terjadi jika kloroplas kekurangan ATP untuk siklus Calvin.

---

<sup>36</sup> *Ibid*, hlm, 205



**Gambar 5.9.** Aliran elektron siklik (Jeff, dkk., 2012)

Aliran elektron siklik melalui PSI memungkinkan fototrof oksigen untuk meningkatkan rasio produksi ATP atau NADPH dalam sel fotosintesis. Ketika konsentrasi rendah, *ferredoxin* (Fd) menyumbangkan elektron ke kompleks sitokrom. Elektron kemudian kembali ke P<sub>700</sub> via *plastocyanin* (PC). Karena aliran elektron siklik ini digabungkan ke proton dan melintasi membran tilakoid, kelebihan daya reduksi disalurkan ke sintesis ATP.

Fotofosforilasi ADP oleh ATP sintase digerakan oleh mekanisme kemiosmotik. Aliran elektron fotosintetik digabungkan dengan translokasi proton melintasi membran tilakoid sehingga stroma menjadi lebih basa dan lumen lebih asam. Proton gradien ini mendorong sistesis

ATP dengan stoikiometri empat  $H^+$  ion per ATP. NADPH dan ATP yang dibentuk oleh reaksi cahaya menyediakan energi untuk reduksi karbon. Kelebihan energi cahaya dapat merusak sistem fotosintesis, dan mekanisme ini digunakan untuk meminimalkan kerusakan tersebut.

Perubahan pada keadaan fosforilasi protein pigmen antena dapat mengubah distribusi energi antara PSI dan PSII ketika ada ketidakseimbangan antar energi yang diserap oleh masing-masing PS. Kloroplas mengandung DNA dan mengkodekan serta mensintesis beberapa protein yang penting untuk fotosintesis. Protein tambahan dikodekan oleh DNA nuklir dan disintesis dalam sitosol, kemudian diimpor ke kloroplas. Setelah disintesis, protein dan pigmen disatukan ke dalam membran tilakoid.<sup>37</sup>

### **E. Siklus Calvin dalam Fotosintesis**

Siklus Calvin disebut juga dengan daur reduksi karbon. Selain itu, siklus calvin juga dapat dikatakan sebagai lintasan fotosintesis C-3, yaitu lintasan fotosintesis yang produk pertamanya adalah 3-PGA yang mengandung 3 karbon. Siklus Calvin terjadi di stroma kloroplas. Siklus calvin terdiri dari tiga bagian utama, yaitu karboksilasi, reduksi, dan regenerasi. Pada peristiwa karboksilasi, terjadi penambahan  $CO_2$  dan  $H_2O$  ke RuBp untuk membentuk molekul 3-PGA. Gugus karboksil dalam 3-PGA selanjutnya direduksi menjadi sebuah gugus aldehyd dalam 3-fosfogliseraldehida. Di sisi lain RuBp diregenerasi sehingga RuBp bisa bereaksi dengan  $CO_2$ . Fungsi 3-fosfogliseraldehida adalah membentuk pati sebagai produk utama fotosintesis. Selain itu, 3-fosfogliseraldehida diangkut keluar kloroplas dan ada yang diubah menjadi

---

<sup>37</sup> Jeff Hardin, Gregory Bertoni, dkk, *Beckers World of the Cell* (New York: Pearson Education, 2012), hlm. 308

dehidroksi aseton fosfat dan triosa fosfat. Triosa fosfat terdapat di sitosol dan digunakan untuk sintesis sukrosa.

### **1. Tahapan siklus Calvin**

Reaksi gelap pada tumbuhan dapat terjadi melalui dua jalur, yaitu Siklus Calvin-Benson dan Siklus Hatch-Slack. Pada siklus Calvin-Benson, tumbuhan mengubah senyawa ribulosa 1,5 bisfosfat menjadi senyawa dengan jumlah atom karbon tiga yaitu senyawa 3-phosphoglisarat. Oleh karena itulah tumbuhan yang menjalankan reaksi gelap melalui jalur ini dinamakan tumbuhan penambatan CO<sub>2</sub> sebagai sumber karbon pada tumbuhan ini yang dibantu oleh enzim rubisco. Tumbuhan yang reaksi gelapnya mengikuti jalur Hatch-Slack disebut tumbuhan C-4 karena senyawa yang terbentuk setelah penambatan CO<sub>2</sub> adalah oksaloasetat yang memiliki empat atom karbon. Enzim yang berperan adalah Phosphoenolpyruvate Carboxilase.

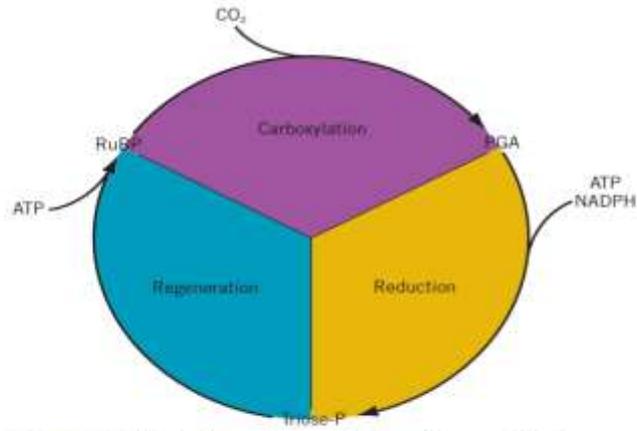
Mekanisme siklus Calvin-Benson dimulai dengan fiksasi CO<sub>2</sub> oleh ribulosa sifosfat kerboksolase (RuBP) membentuk 3-fosfogliserat. RuPB merupakan enzim alosetrik yang distimulasi oleh tiga jenis perubahan yang dihasilkan dari pencahayaan kloroplas. Pertama, reaksi dari enzim ini distimulus oleh peningkatan pH. Jika kloroplas diberi cahaya, ion H<sup>+</sup> ditranspor dari stroma ke dalam tilakoid dan menghasilkan pH stroma yang menstimulus enzim karboksilase, terletak di permukaan luar membran tilakos. Kedua reaksi ini distimulus oleh Mg<sup>2+</sup>, yang memasuki stroma daun sebagai ion H<sup>+</sup>, jika kloroplas diberi cahaya. Ketiga, reaksi ini distimulus oleh NADPH, yang dihasilkan oleh fotosistem I selama pemberian cahaya.

## *Pengantar Fisiologi Tumbuhan*

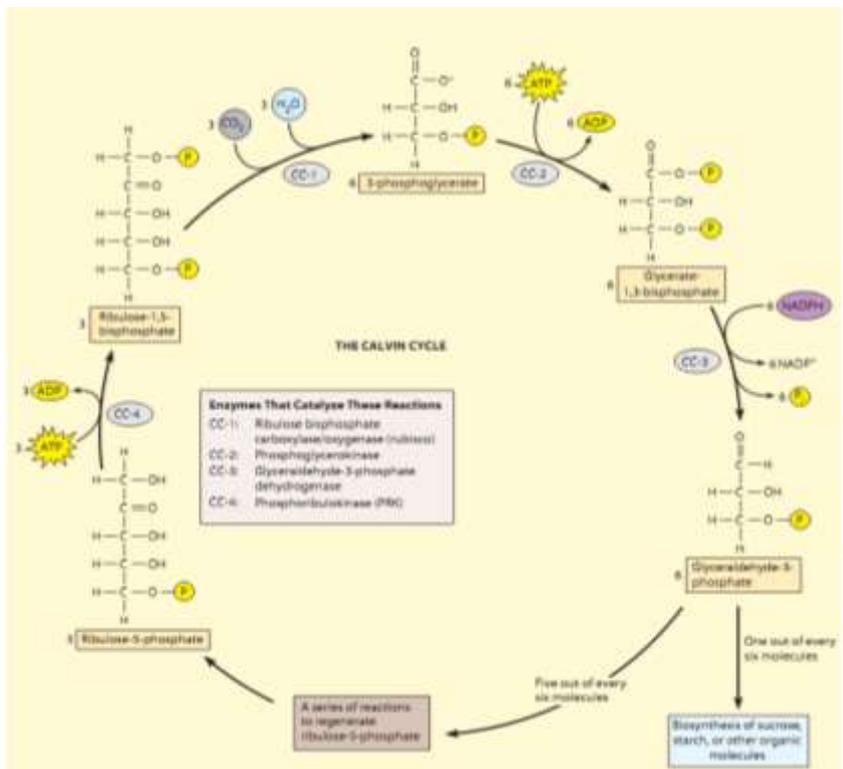
Fiksasi  $\text{CO}_2$  ini merupakan reaksi gelap yang distimulasi oleh pencahayaan kloroplas. Fiksasi  $\text{CO}_2$  melewati proses karboksilasi, reduksi, dan regenerasi. Karboksilasi melibatkan penambahan  $\text{CO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{O}$  ke RuPB membentuk dua molekul 3-fosfoglisarat (3-PGA). Kemudian pada fase reduksi, gugus karboksil dalam 3-PGA direduksi menjadi 1 gugus aldehida dalam 3-fosfogliseraldehida. Reduksi ini tidak terjadi secara langsung, tetapi gugus karboksil dari 3-PGA pertama-tama diubah menjadi ester jenis anhidrida asam pada asam 1,3-bifosfoglisarat (1,3-bisPGA) dengan penambahan gugus fosfat terakhir dari ATP. ATP ini timbul dari fotofosforilasi dan ADP yang dilepas ketika 1,3-bisPGA terbentuk, yang kemudian diubah kembali dengan cepat menjadi ATP oleh reaksi fotofosforilasi tambahan. Bahan pereduksi yang sebenarnya adalah NADPH, yang menyumbang 2 elektron. Secara bersamaan, Pi dilepas dan digunakan kembali untuk mengubah ADP menjadi ATP.

Pada fase regenerasi, yang diregenerasi adalah RuPB yang diperlukan untuk bereaksi dengan  $\text{CO}_2$  tambahan yang berdifusi secara konstan ke dalam dan melalui stomata. Pada akhir reaksi Calvin, ATP ketiga yang diperlukan bagi tiap molekul  $\text{CO}_2$  ditambat, digunakan untuk mengubah ribulosa 5-fosfat menjadi RuBP, kemudian daur ulang dimulai lagi.

Pada putaran daur ulang menambatkan 3 molekul  $\text{CO}_2$  dan produk akhirnya adalah 1,3 Pgaldehida. Sebagian digunakan kloroplas untuk membentuk pati dan sebagian lainnya keluar. Sistem ini membuat jumlah total fosfat menjadi konstan di kloroplas, tetapi menyebabkan munculnya triosafosfat di sitosol. Triosafosfat digunakan untuk membentuk sukrosa.



**Gambar 5.10.** Tiga tahap siklus reduksi karbon fotosintesis (Hopkins, dkk., 2008)

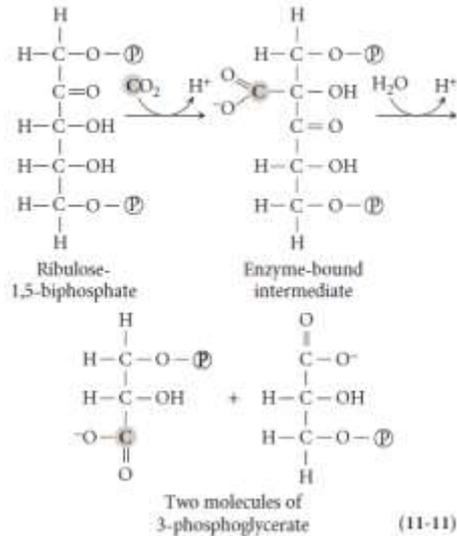


**Gambar 5.11.** Siklus Calvin untuk fotosintesis dan asimilasi karbon (Beckers, 2012)

Jalur fotosintesis dimana semua organisme eukariotik memasukkan CO<sub>2</sub> ke dalam karbohidrat dikenal sebagai fiksasi karbon atau siklus reduksi karbon fotosintesis (PCR). Siklus PCR dapat dibagi menjadi tiga tahap primer, yaitu karboksilasi, reduksi, dan regenerasi.

**a. Tahap 1: Karboksilasi**

Karboksilasi merupakan tahap pertama siklus Calvin. Pada tahap karboksilasi, Ribulose Bisphosphate dikatalisis oleh Enzim Rubisco. Karboksilasi dari molekul akseptor lima karbon akan menghasilkan produk berupa enam karbon. Produk pertama yang dapat dideteksi dari fiksasi karbon dioksida oleh jalur ini adalah molekul tiga karbon, 3-fosfogliserat. Reaksi karboksilasi dimana CO<sub>2</sub> ditambahkan ke RuBP, membentuk antara enam zat karbon. Zat ini bersifat sementara dan tidak stabil, namun tetap terikat pada enzim dan kemudian dengan cepat terhidrolisis menjadi dua molekul 3-PGA. Reaksi karboksilasi dikatalisis oleh enzim ribulosa-1,5-bifosfat karboksilase-oksigenase, atau Rubisco. Rupanya senyawa enam karbon hanya ada sebagai perantara terikat sementara transien, yang segera dihidrolisis untuk menghasilkan dua molekul 3-fosfogliserat.



**Gambar 5.12.** Karboksilasi ribulose bisphosphate yang dikatalisis oleh enzim rubisco (Beckers, 2009)

Rubisco merupakan protein paling melimpah di dunia, terhitung sekitar 50 persen protein terlarut di sebagian besar daun. Enzim ini juga memiliki afinitas yang tinggi terhadap  $\text{CO}_2$ , bersama dengan konsentrasinya yang tinggi dalam stroma kloroplas, memastikan karboksilasi cepat pada konsentrasi  $\text{CO}_2$  di atmosfer yang biasanya rendah. Dengan demikian, reaksi yang dikatalisis oleh Rubisco mempertahankan gradien konsentrasi  $\text{CO}_2$  ( $dc / dx$ ) antara ruang udara internal daun dan udara sekitar untuk memastikan pasokan konstan substrat ini untuk siklus PCR.

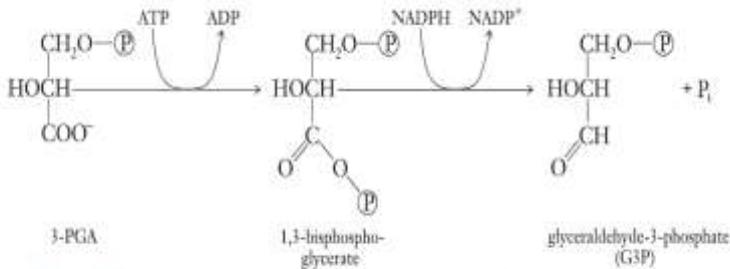
### b. Tahap 2: Reduksi

Reduksi merupakan tahap kedua siklus Calvin. Pada tahap reduksi, terjadi pengurangan 3-phosphoglycerate membentuk glyceraldehyde- 3-

phosphate karbohidrat. Reduksi menggunakan ATP dan NADPH yang dihasilkan dari transpor elektron fotosintetik untuk mengubah regenerasi. Reduksi memerlukan tambahan ATP untuk mengubah beberapa triosa fosfat kembali menjadi RuBP untuk memastikan kapasitas fiksasi CO<sub>2</sub> terus menerus. Energi diperlukan untuk dua hal, pertama untuk reduksi 3-PGA dan kedua untuk regenerasi molekul akseptor RuBP.

Pengurangan 3-PGA agar kloroplas terus mengambil CO<sub>2</sub> mensyaratkan dua kondisi yang harus dipenuhi. Pertama, molekul produk (3-PGA) harus terus dihilangkan dan kedua, ketentuan harus dibuat untuk menjaga pasokan molekul akseptor (RuBP) yang memadai. Keduanya membutuhkan energi dalam bentuk ATP dan NADPH. 3-PGA dihilangkan dengan mereduksi triosa fosfat gliseraldehida-3-fosfat. Ini merupakan reaksi dua langkah di mana 3-PGA pertama kali terfosforilasi menjadi 1,3-bifosfoglisarat melalui penggunaan ATP yang dihasilkan dalam reaksi cahaya, yang kemudian direduksi menjadi gliseraldehida-3-fosfat (G3P) melalui penggunaan NADPH yang dihasilkan oleh reaksi cahaya. Tahap reduksi memerlukan dua ATP untuk mengubah satu molekul CO<sub>2</sub> menjadi bagian dari suatu karbohidrat. Jadi, untuk setiap molekul CO<sub>2</sub> yang difiksasi diperlukan 2 NADPH<sub>2</sub> dan 2 ATP. Kemudian ada satu ATP ketiga yang diperlukan dalam fase regenerasi, sehingga tiga ATP dan dua NADPH<sub>2</sub> diperlukan untuk setiap molekul CO<sub>2</sub> yang difiksasi dan direduksi. Triose sugar-phosphate yang dihasilkan G3P tersedia untuk diekspor ke

sitoplasma, setelah dikonversi menjadi dihydroxyacetone phosphate (DHAP).



**Gambar 5.13.** Pengurangan asam fosfogliserat (PGA) menjadi gliseraldehida-3- fosfat (G3P) (Hopkins, dkk., 2008)

### c. Tahap 3: Regenerasi

Tahap ketiga dari siklus Calvin adalah regenerasi akseptor CO<sub>2</sub> ribulosa-1,5-bifosfat dari gliseraldehida-3-fosfat. Regenerasi RuBP diperlukan untuk bereaksi dengan CO<sub>2</sub> yang berdifusi melalui stomata. Fase ini sangat kompleks dan melibatkan gula empat sampai tujuh karbon. Dalam reaksi terakhir daur Calvin, ATP ketiga yang diperlukan untuk setiap molekul CO<sub>2</sub> yang difiksasi digunakan untuk mengubah Ru-5-P menjadi RuBP, kemudian daur dimulai lagi.<sup>38</sup> Penyerapan CO<sub>2</sub> yang berkelanjutan mensyaratkan bahwa akseptor CO<sub>2</sub>, ribulosa-1,5-bifosfat terus-menerus diperbarui.

Untuk mencegah penipisan intermediet siklus Calvin, tiga molekul ribulosa-1,5-bifosfat (total 15 karbon) terbentuk oleh reaksi yang merombak

---

<sup>38</sup> Dardjat Sasmitamihardja, Arbayah H. Siregar, *Dasar-Dasar Fisiologi Tumbuhan*, (Bandung: Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam ITB, 1990),115.

karbon dari lima molekul triose fosfat. Perombakan ini terdiri dari reaksi 4 hingga 12.

- 1) Satu molekul gliseraldehida-3-fosfat diubah melalui triose phosphate isomerase menjadi dihydroxyacetone-3-phosphate dalam reaksi isomerisasi (reaksi 4).
- 2) Dihydroxyacetone-3-phosphate mengalami kondensasi aldol dengan molekul kedua gliseraldehida-3-fosfat, suatu reaksi yang dikatalisis oleh aldolase untuk menghasilkan fruktosa-1,6-bifosfat (reaksi 5).
- 3) Fruktosa-1,6-bifosfat menempati posisi kunci dalam siklus dan dihidrolisis menjadi fruktosa-6-fosfat (reaksi 6), yang kemudian bereaksi dengan enzim transketolase.
- 4) Unit dua karbon (C-1 dan C-2 dari fruktosa-6-fosfat) ditransfer melalui transketolase ke molekul ketiga gliseraldehida-3-fosfat untuk menghasilkan erythrose- 4-fosfat (dari C-3 ke C) - 6 fruktosa) dan xilulosa-5-fosfat (dari C-2 fruktosa dan gliseraldehida-3-fosfat) (reaksi 7).
- 5) Erythrose-4-fosfat bergabung melalui aldolase dengan molekul keempat triosa fosfat (dihidroksiaseton-3-fosfat) untuk menghasilkan gula tujuh karbon sedoheptulosa-1,7-bisfosfat (reaksi 8).
- 6) Bifosfat tujuh karbon dihidrolisis dengan cara fosfatase spesifik untuk menghasilkan sedoheptulosa-7-fosfat (reaksi 9).
- 7) Sedoheptulosa-7-fosfat menyumbangkan unit dua-karbon ke molekul kelima (dan terakhir) gliseraldehida-3-fosfat melalui transketolase dan menghasilkan ribosa-5-fosfat (dari C-3 ke C-7 dari

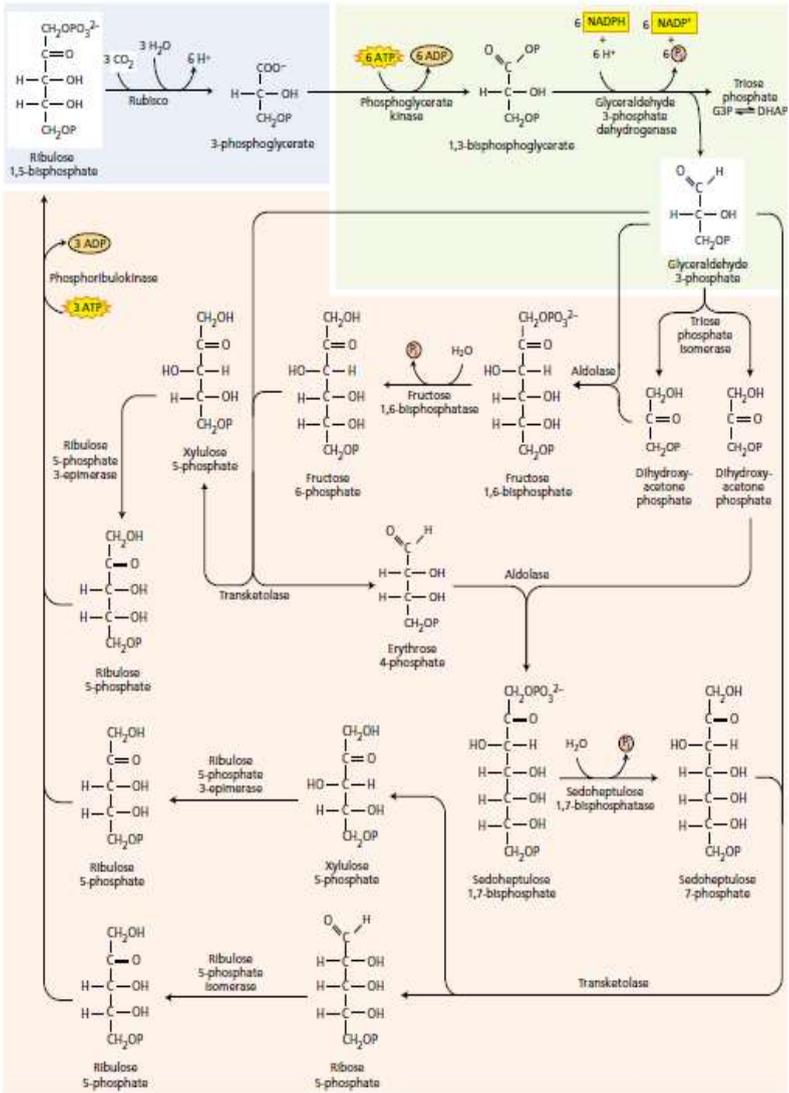
sedoheptulosa) dan xylulose -5-fosfat (dari C 2 dari sedoheptulosa dan gliseraldehida-3-fosfat) (reaksi 10).

- 8) Dua molekul xilulosa-5-fosfat dikonversi menjadi dua molekul gula ribulosa-5-fosfat oleh epimerase ribulosa-5-fosfat (reaksi 11a). Molekul ketiga ribulosa-5-fosfat terbentuk dari ribosa-5-fosfat oleh ribosa-5-fosfat isomerase (reaksi 11b).
- 9) Ribulosa-5-fosfat kinase mengkatalisis fosforilasi ribulosa-5-fosfat dengan ATP, sehingga meregenerasi tiga molekul yang diperlukan dari akseptor CO<sub>2</sub> awal, ribulosa-1,5-bifosfat (reaksi 12).<sup>39</sup>

---

<sup>39</sup> Lincoln Taiz and Eduardo Zeiger, *Plant Physiologi.*, hlm. 149.

## Pengantar Fisiologi Tumbuhan



**Gambar 5.15.** Siklus Calvin. Karboksilasi tiga molekul ribulosa-1,5-bisfosfat mengarah pada sintesis bersih satu molekul gliseraldehida-3-fosfat dan regenerasi tiga molekul bahan awal. Proses ini dimulai dan berakhir dengan tiga molekul ribulosa-1,5-bisfosfat, yang mencerminkan sifat siklik (Lincoln Taiz and Eduardo Zeiger, 2002)

## **2. Peraturan dalam siklus Calvin**

Efisiensi energi yang tinggi dari siklus Calvin menunjukkan beberapa bentuk regulasi yang memastikan bahwa semua perantara dalam siklus hadir pada konsentrasi yang memadai dan bahwa siklus akan berhenti saat tidak diperlukan dalam gelap. Secara umum, variasi konsentrasi atau aktivitas spesifik enzim memodulasi laju katalitik, sehingga menyesuaikan tingkat metabolisme dalam siklus.

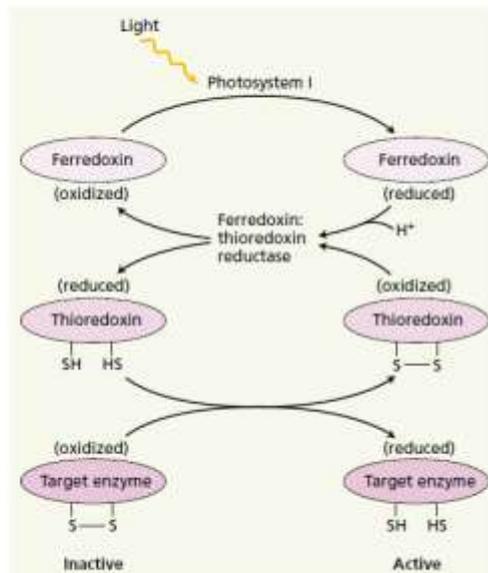
### **a. Aktivitas enzim bergantung pada cahaya dalam siklus Calvin**

Perubahan ekspresi gen dan biosintesis protein dapat mengatur konsentrasi enzim. Modifikasi protein posttranslasi berkontribusi pada pengaturan aktivitas enzim. Lima enzim yang diatur oleh cahaya dan beroperasi dalam siklus Calvin adalah sebagai berikut:

1. Rubisco
2. NADP: gliseraldehid-3-fosfat dehidrogenase
3. Fruktosa-1,6-bisphosphatase
4. Sedoheptulose-1,7-bisphosphatase
5. Ribulose-5-phosphate kinase

Empat enzim terakhir mengandung satu atau lebih kelompok disulfida ( $\text{—S — S—}$ ). Cahaya mengontrol aktivitas empat enzim ini melalui sistem ferredoxin-thioredoxin, mekanisme reduksi-oksidasi berbasis tiol kovalen yang diidentifikasi oleh Bob Buchanan dan rekannya. Dalam keadaan gelap, residu ini teroksidasi ( $\text{—S — S—}$ ), yang membuat enzim tidak aktif atau subaktif. Sedangkan dalam keadaan terang, kelompok  $\text{—S — S—}$  direduksi menjadi keadaan sulfhidril ( $\text{—SH HS—}$ ). Inaktivasi enzim target yang

diamati pada penggelapan tampaknya terjadi dengan pembalikan jalur reduksi (aktivasi), yaitu oksigen mengubah tioredoksin dan enzim target dari keadaan tereduksi ( $-SH HS-$ ) menjadi keadaan teroksidasi ( $-S-S-$ ) sehingga mengarah pada inaktivasi enzim. Empat enzim terakhir yang tercantum di sini diatur langsung oleh tioredoksin. Rubisco diatur secara tidak langsung oleh enzim aksesori tioredoksin, rubisco activase.



**Gambar 5.16.** Pengaruh cahaya terhadap aktivitas enzim (Lincoln Taiz and Eduardo Zeiger, 2002)

Sistem ferredoxin-thioredoxin mengurangi enzim spesifik dalam cahaya. Setelah reduksi, enzim biosintetik dikonversi dari keadaan tidak aktif ke keadaan aktif. Proses aktivasi ini dimulai dari reduksi ferredoksin oleh fotosistem I. Ferredoksin tereduksi ditambah dua proton yang digunakan untuk mengurangi gugus disulfida aktif katalitik (SSS) dari

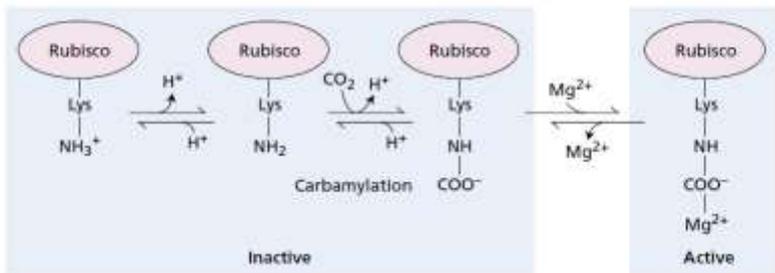
ferredoxin enzim besi-belerang: thioredoxin reduktase, yang pada gilirannya mengurangi ikatan disulfida yang sangat spesifik ( $-S-S-$ ) dari kelompok kecil protein regulator thioredoxin. Bentuk tereduksi ( $-SH HS-$ ) dari thioredoxin kemudian mengurangi ikatan disulfida kritis (mengubah  $-S-S-$  menjadi  $-SH HS-$ ) dari enzim target sehingga mengarah pada aktivasi enzim itu. Sinyal cahaya diubah menjadi sinyal sulfhydryl, atau  $-SH$ , melalui ferredoxin dan enzim ferredoxin: thioredoxin reductase.

#### **b. Aktivitas Rubisco meningkat dalam terang**

Aktivitas rubisco juga diatur oleh cahaya, tetapi enzim itu sendiri tidak merespons thioredoxin. George Lorimer dan koleganya menemukan bahwa rubisco diaktifkan ketika aktivator  $CO_2$  bereaksi lambat dengan kelompok lisin  $e-NH_2$  yang tidak bermuatan di dalam situs aktif enzim. Derivat karbamat yang dihasilkan (situs anionik baru), dengan cepat mengikat  $Mg^{2+}$  untuk menghasilkan kompleks yang diaktifkan. Salah satu cara aktivasi rubisco adalah dengan melibatkan pembentukan kompleks karbamat- $Mg^{2+}$  pada gugus amino-amino lisin dalam situs aktif enzim sehingga dua proton dilepaskan. Aktivasi ditingkatkan oleh peningkatan konsentrasi  $Mg^{2+}$  dan pH yang lebih tinggi (konsentrasi  $H^+$  rendah) yang dihasilkan dari pencahayaan.  $CO_2$  yang terlibat dalam reaksi karbamat- $Mg^{2+}$  tidak sama dengan  $CO_2$  yang terlibat dalam karboksilasi ribulosa-1,5-bisfosfat.

Ikatan gula fosfat, seperti ribulosa-1,5-bisfosfat dapat mencegah karbamatasi. Gula fosfat dapat dihilangkan oleh enzim rubisco activase, dalam suatu reaksi yang membutuhkan ATP. Peran utama rubisco

activase adalah mempercepat pelepasan gula fosfat terikat, sehingga mempersiapkan rubisco untuk karbamilasi. Rubisco juga diatur oleh gula fosfat alami, carboxyarabinitol-1-phosphate yang sangat mirip dengan transisi enam-karbon dari reaksi karboksilasi. Inhibitor ini hadir dengan konsentrasi rendah pada daun dari kebanyakan tumbuhan dan hadir dengan konsentrasi tinggi pada daun polong-polongan seperti kedelai dan kacang. Carboxyarabinitol-1-fosfat berikatan dengan rubisco di malam hari dan dihilangkan oleh aksi rubisco activase di pagi hari, yaitu ketika densitas fluks foton meningkat. Di beberapa pabrik, rubisco activase diatur oleh sistem ferredoxin-thioredoxin (Zhang dan Portis 1999).



**Gambar 5.17.** Aktivitas Rubisco meningkat dalam terang (Lincoln Taiz and Eduardo Zeiger, 2002)

### **c. Gerakan Ion Tergantung pada Cahaya yang Mengatur Enzim di Siklus Calvin**

Cahaya menyebabkan perubahan ion reversibel dalam stroma yang memengaruhi aktivitas rubisco dan enzim kloroplas lainnya. Setelah penerangan, proton dipompa dari stroma ke dalam lumen tilakoid. Proton digabungkan dengan Mg<sup>2+</sup> untuk penyerapan ke dalam stroma. Perubahan dalam komposisi ion stroma kloroplas ini dibalik pada saat gelap.

## **F. Faktor-faktor yang Memengaruhi Fotosintesis**

### **1. Cahaya matahari**

Cahaya merupakan salah satu faktor yang memengaruhi fotosintesis. Berdasarkan sifatnya, faktor cahaya terbagi menjadi beberapa aspek, di antaranya adalah intensitas cahaya, panjang gelombang cahaya, dan lama penyinaran.

#### **a. Intensitas cahaya**

Intensitas cahaya merupakan faktor yang paling berpengaruh dalam fotosintesis. Semakin rendah intensitas cahaya yang diterima tumbuhan, maka akan semakin sulit pula tumbuhan tersebut dalam melakukan fotosintesis. Pada intensitas cahaya yang rendah, energi yang diserap tumbuhan tidak mampu mencukupi untuk dapat diubah menjadi energi biokimia.

#### **b. Panjang gelombang**

Panjang gelombang cahaya ditunjukkan melalui spektrum warna, di antaranya adalah cahaya warna kuning, hijau, merah, jingga, dan biru. Masing-masing spektrum warna ini akan berpengaruh terhadap laju fotosintesis.

#### **c. Lama penyinaran**

Di beberapa belahan dunia, penyinaran matahari dapat berlangsung lebih dari 12 jam sehari. Pada daerah-daerah tersebut, proses fotosintesis yang dilakukan tumbuhan juga akan berlangsung secara terus-menerus.

Tidak semua cahaya matahari yang sampai di permukaan bumi dapat digunakan dalam proses

fotosintesis. Radiasi matahari yang berperan dalam proses fotosintesis disebut Photosynthetic Active Radiation (PAR). PAR adalah cahaya tampak (*visible light*) pada panjang gelombang 400-700 nm.

## **2. Konsentrasi karbondioksida**

Karbondioksida merupakan bahan baku fotosintesis. Konsentrasi karbondioksida merupakan faktor eksternal yang paling berpengaruh terhadap laju fotosintesis. Ketersediaannya yang terbatas, yaitu hanya sekitar 0.03% di atmosfer menjadikan tumbuhan saling bersaing untuk menyerapnya ke dalam klorofil melalui stomata. Semakin besar konsentrasi CO<sub>2</sub> di udara, maka laju fotosintesis juga akan semakin meningkat.

## **3. Ketersediaan air**

Air merupakan salah satu kebutuhan dasar bagi tumbuhan untuk dapat melakukan fotosintesis. Air memiliki fungsi sebagai bahan baku utama dalam proses fotosintesis bersama dengan karbondioksida. Selain itu, tumbuhan juga membutuhkan air untuk proses transpirasi. Jika kekurangan air, stomata pada daun akan menutup sehingga menjadikan karbondioksida tidak dapat terserap dan masuk ke dalam kloroplas. Semakin banyak air yang tersedia, maka laju fotosintesis semakin meningkat.

## **4. Suhu**

Setiap tumbuhan memiliki suhu optimum untuk fotosintesis yang berbeda. Terdapat kisaran suhu minimum, suhu optimum, dan suhu maksimum untuk berlangsungnya proses fotosintesis yang disebut dengan suhu kardinal.

## **5. Kandungan klorofil**

Klorofil atau zat hijau daun adalah suatu pigmen yang terdapat di dalam kloroplas daun dan digunakan sebagai katalisator dalam proses fotosintesis. Tanpa kehadiran klorofil, fotosintesis akan berlangsung sangat lambat bahkan tidak bisa terjadi hingga tumbuhan kehabisan energi. Karena klorofil terdapat di dalam tubuh tumbuhan, maka tergolong sebagai faktor internal yang berpengaruh terhadap proses fotosintesis.

## **6. Unsur hara**

Unsur hara adalah sumber nutrisi utama yang dibutuhkan oleh tumbuhan dalam melakukan metabolisme. Unsur hara berupa mineral maupun bahan organik yang dapat diperoleh melalui penyerapan oleh akar di dalam tanah. Sebagai contoh, dalam melakukan fotosintesis, klorofil membutuhkan ion magnesium yang hanya dapat diperoleh oleh akar dari tanah.

## **G. Soal Latihan**

1. Jelaskan pengertian fotosintesis!
2. Sebutkan macam-macam pigmen yang berperan dalam proses fotosintesis!
3. Sebutkan peran pigmen pada proses fotosintesis!
4. Sebutkan bahan dan produk dari fotosintesis!
5. Sebutkan faktor-faktor yang memengaruhi proses fotosintesis!

**Tugas!**

Buatlah skema keterkaitan antara mekanisme reaksi terang dan reaksi gelap pada proses fotosintesis

## BAB VI

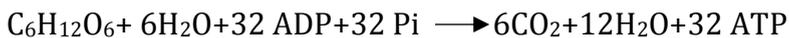
# RESPIRASI

---

---

### A. Pengertian Respirasi

Pengertian respirasi mencakup berbagai konsep. Respirasi dapat diartikan sebagai proses pembebasan energi yang terdapat pada senyawa organik untuk disimpan dalam molekul berenergi tinggi yang siap digunakan. Senyawa organik sebagai tempat menyimpan energi tersebut adalah karbohidrat, protein, dan lemak. Respirasi juga dapat dikatakan sebagai proses pemecahan senyawa organik karbondioksida (CO<sub>2</sub>), air (H<sub>2</sub>O), dan energi. Selain itu, respirasi merupakan reaksi redoks, yaitu oksidasi karbohidrat menjadi CO<sub>2</sub> serta penyerapan O<sub>2</sub> sebagai oksidator yang selanjutnya diubah menjadi H<sub>2</sub>O. Pengertian respirasi lainnya adalah proses pelepasan energi yang tersimpan melalui proses kimia menggunakan oksigen. Proses respirasi menghasilkan energi kimia berupa ATP. Respirasi terdiri dari rangkaian beberapa reaksi dari berbagai komponen. Reaksi respirasi adalah sebagai berikut:



## *Pengantar Fisiologi Tumbuhan*

Substrat respirasi adalah semua produk fotosintesis, antara lain karbohidrat, gula (glukosa, fruktosa, dan sukrosa), pati, lipid (lemak), protein, dan asam organik (Pujiwati, 2019). Jika karbohidrat yang digunakan sebagai substrat respirasi teroksidasi secara sempurna, maka jumlah  $O_2$  yang digunakan sama dengan jumlah  $CO_2$  yang dihasilkan (Lakitan, 2018). Substrat respirasi seluler adalah produk dari fotosintesis, yaitu karbohidrat, pati, gula (glukosa, fruktosa, sukrosa), lipid, protein, dan asam organik (Pujiwati, 2019).

Proses respirasi seluler menghasilkan ATP dan produk samping berupa  $H_2O$  dan  $CO_2$ . Hasil samping respirasi seluler digunakan sebagai substrat fotosintesis. Substrat fotosintesis diolah untuk menghasilkan produk fotosintesis. Produk samping dari proses fotosintesis adalah oksigen. Bagian-bagian tumbuhan yang aktif melakukan respirasi antara lain tunas, biji yang mulai tumbuh atau muncul akar, kuncup bunga, ujung batang, dan ujung akar (Pujiwati, 2019).

### **B. Macam- macam Respirasi**

Berdasarkan kebutuhan oksigen yang digunakan, respirasi dapat dibagi menjadi dua, yaitu respirasi aerob dan respirasi anaerob. Respirasi aerob adalah proses respirasi yang membutuhkan oksigen, sedangkan respirasi anaerob adalah respirasi yang tidak membutuhkan oksigen. Pada proses respirasi, baik respirasi aerob maupun anaerob terjadi pelepasan karbondioksida. Namun, pada respirasi anaerob tidak disertai penyerapan oksigen. Respirasi aerob dapat terjadi di sitoplasma dan mitokondria, sedangkan respirasi anaerob hanya terjadi di sitoplasma saja. Jumlah ATP yang dihasilkan pada kedua macam respirasi juga berbeda. Pada respirasi aerob dari tiap 1 mol glukosa dihasilkan 38 mol ATP, dalam arti energi yang dihasilkan besar. Sedangkan pada respirasi anaerob, energi yang dihasilkan lebih sedikit, yaitu 2 mol ATP per 1 mol glukosa.

## **C. Tahapan Respirasi**

Proses respirasi aerob terdiri dari tiga tahapan, yaitu glikolisis, siklus krebs, dan fosforilasi oksidatif.

### **1. Glikolisis**

Glikolisis merupakan tahapan perombakan glukosa menjadi dua molekul asam piruvat yang memiliki atom C3. Glikolisis terjadi di sitosol. Pada tahap ini dihasilkan dua molekul ATP sebagai energi dan dua molekul NADH yang digunakan untuk transport elektron. Asam piruvat selanjutnya diproses dalam tahap karboksilasi oksidatif. Pada respirasi anaerob, asam piruvat akan diubah menjadi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) dan etil alkohol. Pada respirasi anaerob, jumlah ATP yang dihasilkan hanya dua molekul per satu molekul glukosa. Namun hasilnya masih sangat jauh dari ATP yang dihasilkan dalam respirasi aerob, yaitu sebanyak 36 ATP. Enzim-enzim yang berperan dalam glikolisis yaitu enzim heksokinase, aldolase, triosa fosfat isomerase, fosfoheksokinase, fosfofruktokinase, enolase, fosfat dehidrogenase, piruvat kinase, dan fosfoglisero mutase. Manfaat glikolisis adalah sebagai berikut:

- a. Mereduksi dua molekul NAD<sup>+</sup> menjadi NADH
- b. Merombak molekul heksosa dan dihasilkan dua molekul ATP
- c. Dihasilkan senyawa-senyawa antara yang dapat menjadi bahan baku sintesis berbagai senyawa dalam tumbuhan

### **2. Siklus Kerb**

Siklus kreb merupakan pembongkaran asam piruvat secara aerob menjadi CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O serta energi kimia. Nama lain siklus kreb adalah daur trikarboksilat. Siklus kreb terjadi di dalam matriks membran mitokondria.

## *Pengantar Fisiologi Tumbuhan*

Dalam tahap ini beberapa senyawa dihasilkan seperti molekul ATP sebagai energi, satu molekul FADH, dan tiga molekul NADH yang digunakan dalam transport elektron serta dua molekul karbondioksida. Fungsi utama siklus kreb adalah sebagai berikut:

- a. Mengurangi  $\text{NAD}^+$  dan FAD menjadi NADH dan  $\text{FADH}_2$  yang kemudian dioksidasi membentuk ATP
- b. Sebagai tempat sintesis ATP secara langsung
- c. Pembentukan kerangka karbon dalam sistem asam amino tertentu dan kemudian dikonversi membentuk senyawa yang lebih besar

Dari siklus kreb akan dihasilkan elektron dan ion  $\text{H}^+$  kemudian dibawa sebagai  $\text{NADH}_2$  dan  $\text{FADH}_2$ . Selanjutnya dioksidasi dari sistem pengangkutan elektron dan membentuk  $\text{H}_2$  sebagai hasil sampingan respirasi. Oleh karena itu, hasil sampingan tersebut kemudian dibuang keluar tubuh melalui stomata.

### **3. Fosforilasi Oksidatif**

Pada tahap fosforilasi oksidatif terjadi peristiwa transfer elektron, yaitu rangkaian reaksi yang melibatkan pembawa elektron. Proses ini terjadi di membran mitokondria. Reaksi ini dibantu oleh enzim-enzim seperti sitokrom, quinon, piridoksin, dan flavoprotein. Reaksi transfer inilah yang menghasilkan  $\text{H}_2\text{O}$ . Rantai transport elektron adalah tahapan terakhir dari reaksi respirasi aerob. Transport elektron sering juga disebut sistem rantai respirasi atau sistem oksidasi terminal. Transport elektron berlangsung pada krista (membran dalam) mitokondria. Molekul yang berperan penting dalam reaksi ini adalah NADH dan  $\text{FADH}_2$  yang dihasilkan pada reaksi glikolisis, dekarboksilasi oksidatif, dan siklus kreb. Selain itu,

molekul lain yang juga berperan adalah molekul oksigen, koenzim Q (ubiquinone), sitokrom b, sitokrom c, dan sitokrom a.

#### **D. Faktor yang Memengaruhi Respirasi**

Respirasi dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu jenis dan jumlah substrat, ketersediaan oksigen, suhu, kelembaban, tipe dan umur tumbuhan, serta zat penghambat respirasi.

##### **1. Jenis dan jumlah substrat**

Substrat dalam tanaman merupakan bahan penting dalam proses respirasi. Jika kandungan substrat rendah, maka laju respirasi juga rendah dan begitu pula sebaliknya.

##### **2. Ketersediaan oksigen**

Ketersediaan oksigen berpengaruh terhadap laju respirasi. Namun, ketersediaan oksigen di udara umumnya lebih banyak dibandingkan dengan yang dibutuhkan oleh tanaman dalam respirasi. Fluktuasi kandungan oksigen di udara tidak banyak berpengaruh terhadap laju respirasi tumbuhan.

##### **3. Suhu**

Suhu merupakan faktor yang sangat berpengaruh terhadap laju respirasi. Semakin tinggi suhu, maka laju respirasi juga semakin tinggi. Namun, peningkatan laju respirasi juga tergantung pada masing-masing spesies.

##### **4. Kelembaban**

Pengaruh kelembaban terhadap laju respirasi sebagaimana pengaruh yang ditunjukkan pada suhu. Suhu yang tinggi akan menyebabkan tingkat kelembaban

tanaman rendah dan sebaliknya. Semakin rendah tingkat kelembaban, maka laju respirasi akan semakin rendah dan begitu pula sebaliknya.

### **5. Tipe dan umur tumbuhan**

Masing-masing tumbuhan memiliki perbedaan tingkat metabolisme. Proses respirasi dan metabolisme berbanding lurus. Pada tumbuhan yang masih muda, laju respirasi tinggi karena laju metabolismenya juga tinggi disebabkan masih dalam masa pertumbuhan. Sedangkan pada tumbuhan yang tua laju respirasinya lebih rendah.

### **6. Zat penghambat respirasi**

Zat penghambat respirasi antara lain sianida, fluorida, ion asetat, karbon monoksida, eter, aseton, dan kloroform. Zat-zat tersebut merupakan zat kimia yang juga bisa berpengaruh terhadap pertumbuhan dan perkembangan tanaman.

## **E. Soal Latihan**

1. Jelaskan pengertian respirasi tumbuhan secara singkat, padat, dan jelas!
2. Sebutkan bahan-bahan yang diperlukan untuk proses respirasi tumbuhan!
3. Jelaskan perbedaan antara respirasi aerob dan anaerob!
4. Sebutkan hasil akhir (produk) dari respirasi seluler pada tumbuhan!
5. Sebutkan faktor-faktor yang memengaruhi respirasi tumbuhan!

**Tugas!**

Lengkapilah tabel di bawah ini!

<b>Tahapan Respirasi</b>	<b>Tempat</b>	<b>Bahan</b>	<b>Produk</b>



## BAB VII

# PERGERAKAN TANAMAN

---

---

### A. Gerak pada Tumbuhan

Berdasarkan mekanismenya, gerak pada tumbuhan dibagi menjadi dua, yaitu gerakan pertumbuhan dan gerakan turgor. Gerakan pertumbuhan bersifat *irreversible* (tidak dapat balik), sedangkan gerakan turgor bersifat *reversible* (dapat balik). Gerak pertumbuhan merupakan gerak akibat diferensiasi pertumbuhan pada suatu organ maupun diferensiasi di antara dua organ yang berbeda. Gerakan turgor merupakan hasil dari perubahan volume pada sel-sel tertentu, terutama pulvinus (Hopkins, 2008).

### B. Macam-Macam Gerak pada Tumbuhan

Gerak pada tumbuhan terdiri dari beberapa macam, yaitu nutasi (circumnutasi), tropisme, dan nasti (Hopkins, 2008).

#### 1. Nutasi (circumnutasi)

Nutasi merupakan gerakan rotasi atau heliks pada organ tumbuhan, biasanya berupa gerakan ujung batang.

## **2. Tropisme**

Tropisme merupakan respon yang ditimbulkan oleh beberapa rangsangan, seperti cahaya (fototropisme), gravitasi (gravitropisme), air (hidrotropisme), atau sentuhan (tigmotropisme).

### **a. Fototropisme**

Fototropisme merupakan gerakan tumbuhan yang dirangsang oleh cahaya matahari. Hal ini dapat dilihat dari tanaman yang menghadap ke arah cahaya matahari. Namun demikian, respon tropis yang dihasilkan dapat berupa respon positif maupun respon negatif. Respon positif terjadi apabila arah gerakan sesuai dengan arah datangnya rangsangan, sedangkan respon negatif terjadi apabila arah gerakan berlawanan dengan arah datangnya rangsangan. Respon fototropik positif atau negatif sangat tergantung pada sifat atau umur organ. Gerakan pemanjangan batang, koleoptil, dan hipokotil umumnya mengalami fototropisme positif, sedangkan gerakan sulur pada tanaman memanjat bersifat negatif. Daun normalnya mengalami plagiotrop. Akar umumnya bersifat nonfototropik, namun ada beberapa akar yang menunjukkan fototropisme negatif.

Fototropisme dapat digunakan untuk optimalisasi fotosintesis. Pengaruh dari fototropisme adalah mengarahkan pertumbuhan dan sudut daun ke arah cahaya untuk memaksimalkan penyerapan cahaya untuk fotosintesis. Selain itu, cahaya biru juga digunakan untuk mengontrol pembukaan stomata dan memfasilitasi pertukaran gas serta merelokasi kloroplas dalam sel. Sebagaimana yang diketahui,

pembukaan stomata dikendalikan oleh cahaya. Di sisi lain, cahaya diserap oleh klorofil (misalnya cahaya merah) yang menstimulasi pembukaan stomata dan tergantung pada reaksi fotosintetik di sel penjaga kloroplas. Namun lebih dari itu, cahaya biru menimbulkan respon yang dominan pada fase awal pembukaan stomata, seperti terbukanya stomata pada saat fajar (sebelum fotosintesis dimulai). Tumbuhan juga menggunakan cahaya biru untuk mengontrol respon penghindaran kloroplas di dalam sel mesofil. Dalam cahaya rendah, klorofil selalu berkumpul di dinding sel yang sejajar dengan permukaan (misalnya dinding periklinal) yang tegak lurus terhadap cahaya yang datang. Dalam cahaya tinggi, seperti paparan sinar matahari secara langsung, kloroplas menghindari kerusakan dengan mengantre di sepanjang dinding anticlinal (Hopkins, 2008).

## **b. Geotropisme**

Geotropisme merupakan gerakan yang dipengaruhi oleh gravitasi (pusat bumi). Gravitropisme dibagi menjadi dua macam, yaitu gravitropisme positif dan gravitropisme negatif. Gravitropisme positif seperti terlihat pada pertumbuhan akar utama yang menuju pusat bumi, sedangkan gravitropisme negatif seperti terlihat pada pertumbuhan tunas yang menjauhi pusat bumi. Gerakan ke arah horizontal disebut diagravitropik, sedangkan gerakan ke arah vertikal disebut plagiogravitropik. Contoh gerakan diagravitropik yaitu pertumbuhan stolon, rimpang, dan beberapa cabang lateral. Sedangkan gerakan plagiotropik seperti gerakan organ akar. Organ-organ lainnya yang tidak peka terhadap gravitasi dikatakan

sebagai agravitropik. Organ akar harus ada di dalam tanah untuk penyerapan nutrisi dan air. Akar utama menunjukkan ortogravitropik yang sangat positif, namun akar sekunder umumnya bersifat agravitropik. Sebagaimana gerakan ortogravitropisme positif, ortogravitropisme negatif, diagravitropik, dan plagiotropik juga mengarahkan gerakan organ untuk efisiensi penangkapan sinar matahari untuk membantu proses fotosintesis. Gravitropisme akar terjadi melalui empat fase, yaitu persepsi, transduksi, transmisi, dan respon pertumbuhan. Fase persepsi bisa terjadi dalam waktu 1 detik untuk menggerakkan akar menuju vertikal dan melibatkan mekanisme biofisik (misalnya tekanan) sebagai respon terhadap tarikan gravitasi. Fase transduksi terjadi dalam waktu 1-15 detik mengikuti reorientasi dan melibatkan redistribusi auksin ke ujung akar. Distribusi auksin pada organ akar tidak merata sehingga dapat menyebabkan pertumbuhan akar menuju ke arah vertikal.

Gravitasi dirasakan oleh sel kolumela di tudung akar. Persepsi gravitropik pada akar terlokalisasi di tudung akar. Tudung akar terdiri dari kolumela (inti pusat sel) yang tersusun secara reguler dengan satu atau lebih lapisan luar. Tudung akar memiliki fungsi ganda, yaitu melindungi meristem apikal akar dan sel penjaga yang mengeluarkan polisakarida berlendir dan dapat digunakan untuk melumasi bagian dari pertumbuhan akar. Selain itu, fungsi tudung akar adalah sebagai persepsi gravitasi. Ketidakhadiran tudung akar memang tidak mengganggu proses pemanjangan akar, namun berpengaruh terhadap respon gravitasi. Akar yang tanpa disertai tudung akar sulit menerima respon gravitasi. Akar yang rusak (tanpa tudung akar) maka

tidak dapat merespon gravitasi dan akar tersebut dapat merespon gravitasi kembali setelah sekitar 24 jam, yaitu waktu yang dibutuhkan oleh akar untuk meregenerasi tudung akarnya kembali.

Persepsi gravitasi melibatkan perpindahan amiloplas yang mengandung pati. Dalam sel tanaman terkandung kumpulan atau endapan butiran-butiran tepung yang disebut dengan statosit. Jaringan yang mengandung statosit disebut staterkim. Butiran-butiran pati yang terkandung di dalam statosit terbungkus oleh suatu membran. Butiran-butiran pati yang dibungkus oleh membran ini disebut dengan amiloplas. Jadi di dalam statosit terdapat beberapa atau sejumlah amiloplas.

Tidak semua amiloplas di dalam sel dapat bergerak dengan mudah. Pada statolit atau amiloplas yang dapat bergerak dengan mudah tampaknya terbatas pada daerah sensitifitas gravitasi yang tinggi. Hal ini termasuk juga massa sel kolumela di pusat inti pada bagian tudung akar, hipokotil, dan zona sel endodermal yang meliputi jaringan vaskular (juga disebut sebagai selubung pati). Amiloplas juga ditemukan di bagian dalam sel kortikal pada organ aerial dan pulvini atau organ motorik di dalam nodus pada batang rumput yang responsif terhadap gravitasi.

Gravitropisme secara umum terdapat pada spesies tanaman yang tidak memunyai butir pati atau amiloplas. Pada tumbuhan tingkat rendah seperti alga dan fungi, kelebihan karbohidrat tidak disimpan dalam bentuk pati. Dalam hal ini beberapa substansi yang lain dapat berfungsi sebagai statolit. Kandungan pati pada tanaman dapat hilang akibat perlakuan hormon atau

mutasi. Hilangnya pati ini diikuti dengan hilangnya respon gravitasi (Hopkins, 2008).

### **c. Hidrotropisme**

Hidrotropisme merupakan gerak akar tumbuhan yang dipengaruhi oleh ketersediaan air tanah. Pada umumnya, akar tumbuhan lurus ke bawah. Namun, jika pada arah ini tidak terdapat cukup air, maka akar akan tumbuh membelok ke arah yang cukup air.

## **3. Nasti**

Nasti merupakan respon yang tidak terkait dengan rangsangan, namun nasti termasuk gerakan yang ditimbulkan oleh jaringan, seperti epinasti (membengkok ke bawah), hiponasti (membengkok ke atas), niktinasti (gerakan daun yang berirama), seismonasti (respon terhadap kejutan mekanis), termonasti (gerakan akibat pengaruh suhu), dan tigmonasti (gerakan akibat sentuhan).

Gerak nasti tidak dipengaruhi oleh arah datangnya rangsangan. Gerak nasti bersifat permanen, namun ada juga yang gerakannya bersifat *reversible* (dapat balik). Gerak *reversible* pada gerak nasti disebabkan oleh perubahan turgor pada organ motor yang spesifik. Epinasti dan termonasti merupakan contoh respon nasti yang melibatkan pertumbuhan diferensial. Epinasti adalah gerakan organ menekuk ke bawah, biasanya petiol dan ujung daun condong ke bawah. Gerakan condong ke bawah ini bukan akibat pengaruh gravitasi, melainkan akibat dari aliran auksin yang tidak merata melalui sisi atas dan bawah petiol (tangkai daun). Epinasti juga merupakan respon umum terhadap etilen atau auksin yang berlebihan. Kebalikan dari epinasti adalah hiponasti. Hiponasti dapat

diinduksi dengan giberelin. Gerak hiponasti ini jarang terjadi. Contoh gerak termonasti adalah gerakan membuka dan menutupnya kelopak bunga yang berulang-ulang seperti pada bunga tulip. Gerak termonasti bersifat permanen. Gerak nasti dibagi menjadi tiga kategori, yaitu gerak irama daun pada tumbuhan niktinastik, gerakan yang sangat cepat pada seismonastik pada sebagian kecil spesies, dan gerakan tigmonastik atau tigmotropik yang menghasilkan sulur keriting pada tanaman tipe memanjat atau merambat. Respon niktinastik dan seismonastik dipengaruhi oleh gerakan turgor pada organ motor tertentu yang disebut dengan pulvinus. Pulvinus merupakan struktur berbentuk bulat yang sering dijumpai pada tanaman yang familinya dikelompokkan ke dalam daun majemuk seperti Leguminosae dan Oxalidaceae (Hopkins, 2008).

## **C. Faktor yang Memengaruhi Pergerakan Tanaman**

### **1. Faktor Internal**

Perilaku geotropis dari sebuah organ tidaklah tetap dan tidak dapat diubah. Ia dapat diubah oleh sekumpulan kondisi. Jadi satu organ bisa memodifikasi reaksi geotropis organ lainnya, misalnya pengaruh apeks dari sumbu utama (ortogeotropis) pada cabang-cabang lateral (plagiotropis), sebuah situasi yang erat dengan dominasi apikal. Jika porsi apikal dari sumbu utama beberapa pohon monopodial, misalnya pinus strobus dihilangkan, cabang lateral yang berdekatan akan meninggalkan pertumbuhan miring mereka dan menjadi vertikal (geotropis negatif). Begitu juga, rhizoma plagiotropis dari kentang berubah tegak dan mengeluarkan daun jika pucuk utama dihilangkan, termasuk tunas-tunas axilari dan apikalnya. Perubahan dapat terjadi dari sebuah reaksi ortogeotropis

negatif (tunas bunga) menjadi positif (bunga yang terbuka sebagian) dan akhirnya menjadi negatif (buah matang).

## **2. Faktor Eksternal**

Faktor lingkungan dapat mengubah reaksi geotropis. Perubahan temperatur akan menginduksi gerakan organ dan dapat mengubah reaksi geotropis secara kualitatif, misalnya batang lamium ortogeotropis negatif menjadi plagiotropis pada temperatur di atas pembekuan. Satu dari faktor lingkungan yang paling penting adalah cahaya, yang menghasilkan perubahan-perubahan kualitatif dan kuantitatif untuk reaksi geotropisme. Sebagai contoh, beberapa organ plagiotropis bisa menjadi ortogeotropis jika kondisi pencahayaan berubah. Jadi rhizoma dari *Aegopodium podagraria* yang diageotropis waktu gelap, menjadi plagiotropis positif setelah dipaparkan pada cahaya merah meskipun dalam waktu yang singkat. Dipihak lain, stolon dari rumput *Cynodon dactylon* adalah diageotropis atas cahaya, tetapi menjadi geotropis negatif jika tanaman induk digelapi. Contohnya yang paling menarik diperlihatkan oleh *Hosta caerulea* yang geotropis positif di dalam gelap tetapi menjadi geotropis negatif jika diterangi. Seperti juga efek kuantitatif cahaya, baik kecepatan maupun besar reaksi bisa diubah, umumnya dalam cara yang berlawanan. Pada koleoptil avena, iradiasi dengan cahaya merah (661 nm) meningkatkan reaksi pelengkungan geotropis.

Efek cahaya merah (660 nm) dapat diinduksikan hanya sekali, sedangkan pemaparan kedua tidak berefek. Cahaya merah jauh tidak memiliki efek langsung terhadap kepekaan geotropis, tetapi akan membalik efek perangsangan cahaya merah. Beberapa bahan kimia tertentu dalam lingkungan dapat mengubah reaksi,

misalnya pada Aegopodium dengan pemberian atmosfer sekitarnya dengan CO<sub>2</sub> akan membuat rhizoma yang biasanya diageotropis menjadi negatif. Bahkan rangsangan mekanis dapat mengubah reaksi, misalnya akar utama meorientasi diri mereka kembali dari sebuah posisi horizontal, akhirnya akan mencapai arah ke bawah yang vertikal (ortogeotropis).

#### **D. Soal Latihan**

1. Sebutkan dan jelaskan macam-macam gerak tumbuhan ditinjau dari mekanisme geraknya!
2. Sebutkan macam-macam gerak tumbuhan yang dipengaruhi oleh rangsangan cahaya!
3. Jelaskan perbandingan antara gerak nutasi, tropisme, dan nasti!
4. Sebutkan faktor internal dan eksternal yang memengaruhi pergerakan tumbuhan!

#### **Tugas!**

Isilah tabel di bawah ini dan lengkapi dengan contoh!

Tabel 1. Perbandingan Gerak Tumbuhan yang Dipengaruhi oleh Cahaya

<b>Fototropisme</b>	<b>Fotonasti</b>	<b>Fototaksis</b>

Tabel 2. Perbandingan Gerak Reversibel dan Irreversibel

<b>Reversibel</b>	<b>Irreversibel</b>



## BAB VIII

# PERTUMBUHAN DAN PERKEMBANGAN TANAMAN

---

---

### **A. Pengertian Pertumbuhan dan Perkembangan**

Secara umum, pertumbuhan merupakan penambahan ukuran yang meliputi tinggi atau panjang, volume, dan massa. Pertambahan ukuran tentunya terjadi dengan pertambahan jumlah sel. Sehingga pengertian pertumbuhan juga mencakup adanya pertambahan jumlah sel. Namun pada organisme uniseluler pertumbuhan diartikan sebagai pertambahan ukuran sel. Hal ini disebabkan organisme uniseluler hanya terdiri dari satu sel. Pertambahan jumlah sel pada organisme uniseluler termasuk proses reproduksi (Hopkins, 2008).

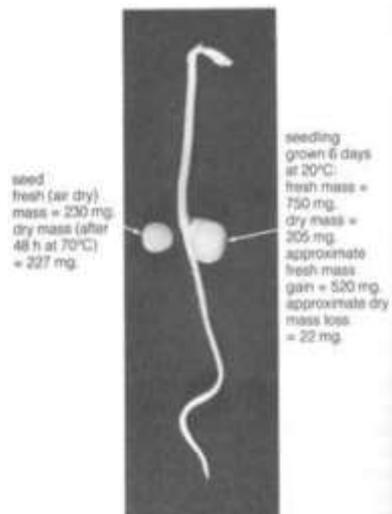
Pertumbuhan adalah istilah kuantitatif, hanya terkait dengan perubahan dalam ukuran dan massa. Bagi sel, pertumbuhan hanyalah hal yang tidak dapat dibalikkan peningkatan volume. Untuk jaringan dan organ, pertumbuhan biasanya mencerminkan peningkatan jumlah sel dan ukuran sel. Karena organisme multiseluler tumbuh dari zigot, pertambahan itu bukan hanya dalam volume, tetapi juga dalam bobot, jumlah sel, banyaknya protoplasma,

## *Pengantar Fisiologi Tumbuhan*

dan tingkat kerumitan. Pada banyak kajian, pertumbuhan perlu diukur. Teorinya, semua ciri pertumbuhan yang disebutkan tadi bisa diukur, tapi ada dua macam pengukuran yang lazim digunakan untuk mengukur pertambahan volume atau massa. Pertambahan volume (ukuran) sering ditentukan dengan cara mengukur perbesaran ke satu atau dua arah, seperti panjang (misalnya, tinggi batang), diameter (misalnya, diameter batang) atau luas (misalnya, luas daun); pengukuran volume, misalnya dengan cara pemindahan air, yang bersifat tidak merusak, sehingga tumbuhan yang sama dapat diukur berulang-ulang pada waktu yang berbeda. Pertambahan massa sering ditentukan dengan cara memanen seluruh tumbuhan atau bagian yang diinginkan, dan menimbanginya dengan cepat sebelum air terlalu banyak menguap dari bahan tersebut. Ini adalah massa segar yang nilainya beragam dan bergantung pada status air tumbuhan.

Contoh pertama adalah biji kacang polong yang berkecambah dalam cahaya gelap. Dalam kegelapan, embrio di dalam benih akan mulai tumbuh dan menghasilkan sumbu pucuk yang mungkin panjangnya mencapai 10 hingga 12 inchi. Meskipun secara intuitif dapat dirasakan bahwa pertumbuhan yang cukup besar telah terjadi, total berat kering bibit ditambah benih akan benar-benar menurun dibandingkan dengan bobot kering benih sendiri sebelum berkecambah. Berat kering dalam hal ini berkurang karena sebagian karbon tersimpan dalam benih yang bernafas hilang sebagai karbon dioksida. Dalam terang, karbon yang hilang ini akan diganti dan bahkan ditambah oleh fotosintesis tetapi fotosintesis tidak beroperasi dalam kegelapan. Dalam situasi seperti ini, baik berat segar atau panjang sumbu bibit adalah ukuran pertumbuhan yang lebih baik. Pengukuran panjang

dan lebar daun juga akan menjadi langkah yang cocok untuk menentukan pertumbuhan daun yang mengembang.<sup>40</sup>



**Gambar 8.1.** Perubahan berat basah dan berat kering biji selama perkembangannya pada tempat gelap (Salisbury F.B. and Ross C.W., 1992)

Contoh kedua adalah daun selalu memiliki massa segar lebih besar di pagi hari daripada tengah hari, hanya karena adanya transpirasi. Karena berbagai masalah yang timbul dari adanya kandungan air yang beragam tersebut, maka banyak orang, terutama yang tertarik pada produktivitas tanaman budidaya, lebih suka budidaya menggunakan pertambahan massa kering tumbuhan atau bagian tumbuhan sebagai ukuran bagi pertumbuhannya. Massa kering lazim diperoleh dengan cara mengeringkan bahan tumbuhan yang baru saja dipanen.<sup>41</sup>

---

<sup>40</sup>William G Hopkins & Nurman PA Huner. *Introduction of Plant Physiology (Fourth Edition)*. (New York: John Wiley & Sons Inc, 2009) hlm 275 - 276

<sup>41</sup>Frank B Salisbury & Cleon W Ross. *Fisiologi Tumbuhan Jilid 3* (Bandung: ITB, 1995) hal 4

Perkembangan merupakan jumlah dari pertumbuhan dan diferensiasi. Perkembangan merupakan istilah umum, mengacu pada jumlah dari semua perubahan baik sel, jaringan, organ, atau organisme. Perkembangan yang paling tampak dimanifestasikan sebagai perubahan dalam bentuk organ atau organisme, seperti transisi dari embrio ke bibit, dari primordia daun ke daun sepenuhnya, atau dari produksi organ vegetatif menuju produksi struktur bunga. Embriogenesis, vegetatif, dan perkembangan reproduksi adalah tahap perkembangan sporofitik tanaman yang lebih tinggi.<sup>42</sup>

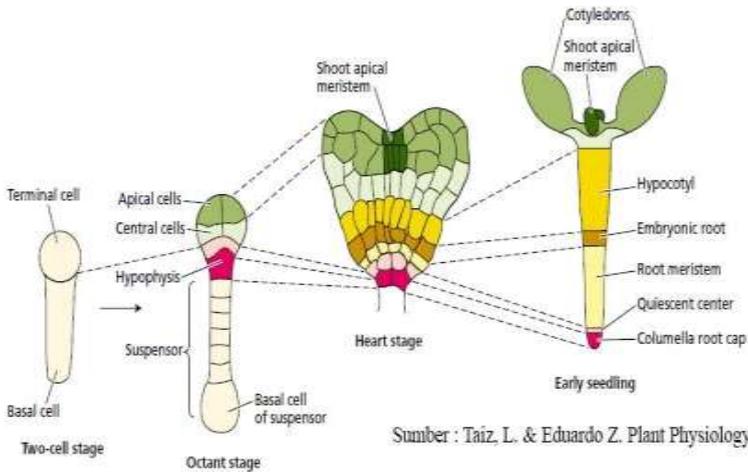
Proses awal perkembangan dikenal sebagai embriogenesis. Meskipun embriogenesis biasanya dimulai dengan penyatuan sperma dengan sel telur sehingga membentuk zigot bersel tunggal, sel somatik juga dapat menjalani embriogenesis dalam keadaan khusus. Pemupukan juga memprakarsai tiga program pengembangan lainnya, yaitu endosperma, benih, dan pengembangan buah. Embriogenesis mengubah zigot sel tunggal menjadi tanaman multiseluler, mikroskopis, dan embrionik. Embrio yang lengkap memiliki rancangan struktur dasar dari tanaman dewasa, meskipun dalam bentuk yang belum sempurna.

Pada tanaman, seperti pada semua eukariota lainnya, penyatuan satu sperma dengan sel telur membentuk zigot bersel tunggal. Dalam angiospermae, bagaimanapun, peristiwa ini disertai dengan peristiwa pembuahan kedua, di mana sperma lain bersatu dengan dua inti polar untuk membentuk inti triploid endosperma. Endosperma (jaringan

---

<sup>42</sup>Vince Ordog. *Plant Physiology* (Hongaria: XMLmind XSL-FO Converter, 2011) hal 66

yang memasok makanan untuk embrio yang tumbuh) ini nantinya akan berkembang.



**Gambar 8.2.** Proses embriogenesis (Lincoln Taiz and Eduro Zeiger, 2002)

## B. Tahapan Pertumbuhan dan Perkembangan Sel

Proses pertumbuhan dan perkembangan pada tumbuhan merupakan kolaborasi dari tiga peristiwa yang terjadi pada tingkat sel, yaitu pembelahan sel, pembesaran sel, dan diferensiasi sel (Hopkins, 2008).

### 1. Pembelahan Sel

Sel membelah ke arah yang berbeda-beda. Pembelahan sel menghasilkan sel-sel baru. Dengan adanya sel-sel baru, maka jumlah sel semakin bertambah sehingga ukurannya bertambah, baik semakin besar ataupun semakin panjang (dalam arti lain mengalami pertumbuhan). Selain mengalami pertumbuhan, bentuk dan susunan sel juga menjadi lebih kompleks dan hal inilah yang disebut sebagai perkembangan. Dengan demikian,

proses pertumbuhan dan perkembangan sel terjadi secara beriringan.

## **2. Pembesaran Sel**

Pembentukan berbagai struktur tumbuhan tidak hanya dipengaruhi oleh arah pembelahan sel saja, namun arah pembesaran sel juga berperan penting. Pembesaran sel sebagian besar merupakan peristiwa penyerapan air ke dalam vakuola. Air yang masuk ke dalam vakuola menyebabkan dinding sel merenggang sehingga volume sel meningkat. Pada organ tumbuhan yang memanjang seperti batang dan akar, pembesaran terjadi terutama ke satu dimensi, yaitu hanya ke arah memanjang.

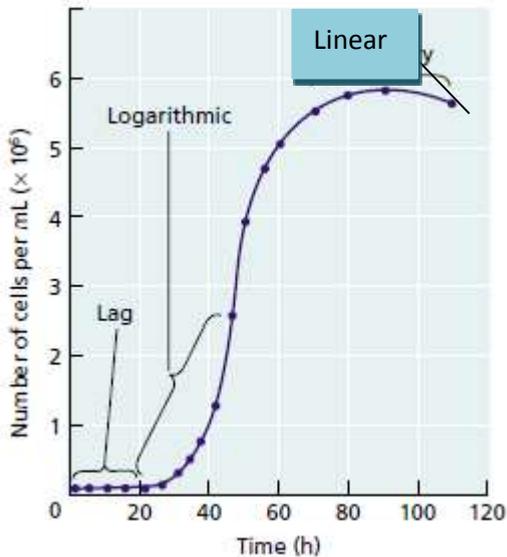
## **3. Diferensiasi Sel**

Sel sebagai bentuk yang lebih kompleks tersebut selanjutnya mengalami spesialisasi yaitu perubahan sel hingga menghasilkan tumbuhan dewasa yang tersusun dari berbagai jenis sel. Proses spesialisasi sel inilah yang disebut dengan diferensiasi.

Pertumbuhan dan diferensiasi sel membentuk jaringan, organ, hingga organisme disebut sebagai perkembangan. Dengan demikian, perkembangan merupakan gabungan antara proses pertumbuhan dan diferensiasi. Perkembangan juga disebut sebagai morfogenesis. Istilah morfogenesis berasal dari Bahasa Yunani “morpho” (bentuk) dan “genesis” (asal). Melalui perkembangan (morfogenesis) inilah tumbuhan mengubah bentuk dirinya dari sebuah sel telur yang dibuahi (zigot) menjadi sebuah tanaman utuh (individu).

### C. Kinetika Pertumbuhan

Kinetika pertumbuhan merupakan pergerakan tumbuhan dari waktu ke waktu. Pertumbuhan dilihat dengan hitungan jumlah sel per mililiter pada waktu yang meningkat setelah sel ditempatkan dalam media tumbuh yang mendukung pertumbuhan. Suhu, cahaya, dan nutrisi yang diberikan optimal untuk pertumbuhan. Berdasarkan kurva sigmoid fase dalam pertumbuhan tanaman dapat dibagi menjadi empat fase. Keempat fase tersebut yaitu fase lag, fase logaritmik, fase linear dan fase stasioner.



**Gambar 8.3.** Pertumbuhan alga hijau *Chlamydomonas* (Lincoln Taiz and Eduardo Zeiger, 2002)

#### 1. Fase Lag

Fase Lag dimulai dengan sel terlebih dahulu mensintesis enzim yang diperlukan untuk persiapan proses pertumbuhan (Lag). Pada fase ini sejumlah sel mulai membelah namun pertumbuhannya masih lambat.

## **2. Fase Logaritmik**

Pada fase logaritmik, jumlah sel meningkat secara eksponensial. Pertumbuhan sel yang awalnya lambat menjadi semakin meningkat secara eksponensial. Dalam fase ini berarti ukuran sel ( $V$ ) bertambah sejalan dengan waktu ( $t$ ), sehingga laju pertumbuhan dinyatakan dengan persamaan:  $dv/dt$ .

## **3. Fase Linear**

Fase linear ditandai dengan periode pertumbuhan yang mulai melambat. Biasanya fase ini menunjukkan laju maksimum selama beberapa waktu lamanya. Sehingga pada fase ini peningkatan jumlah sel terjadi secara linear, dalam arti hanya ada sedikit pertumbuhan.

## **4. Fase Stasioner**

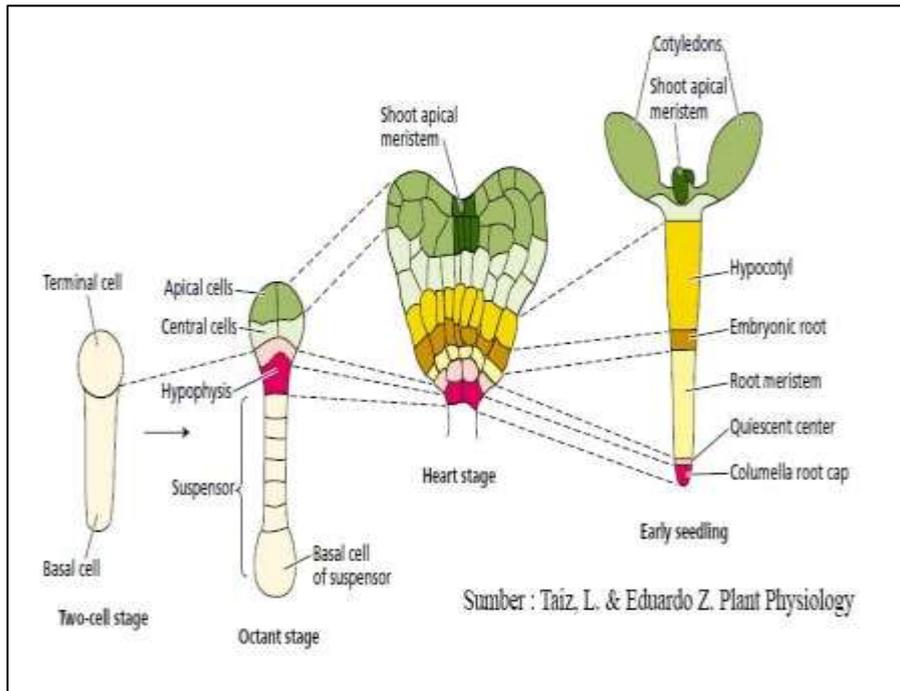
Pada fase stasioner, jumlah sel tetap konstan, dalam arti tidak terjadi penambahan jumlah sel. Bahkan, juga dikatakan menurun karena nutrisi pada medium telah habis. Fase ini juga sering disebut dengan fase penuaan, sebab sel sudah mengalami penurunan kemampuan untuk tumbuh.

## **D. Soal Latihan**

1. Jelaskan pengertian pertumbuhan dan perkembangan!
2. Sebutkan beberapa macam cara yang dapat digunakan untuk mengukur pertumbuhan tanaman!
3. Sebutkan macam-macam bentuk perkembangan yang terjadi pada tumbuhan!
4. Sebutkan dan jelaskan tahapan pertumbuhan dan perkembangan tanaman!
5. Sebutkan fase-fase kinetika pertumbuhan dan perkembangan tanaman!

## Tugas!

Deskripsikan tahapan pertumbuhan dan perkembangan tanaman pada proses embriogenesis dari gambar di bawah ini!





BAB IX  
FITOHORMON

---

---

**A. Perbedaan Hormon dan Zat Pengatur Tumbuh**

Pertumbuhan dan perkembangan tanaman dapat dipengaruhi oleh senyawa organik. Senyawa organik tersebut dapat berasal dari dalam tubuh tumbuhan (endogen) maupun dari luar tumbuhan (eksogen). Senyawa organik endogen disintesis oleh salah satu bagian tumbuhan dan dapat ditranslokasikan ke bagian tumbuhan lainnya. Senyawa organik endogen pada konsentrasi rendah dapat menimbulkan respon fisiologis. Senyawa organik inilah yang sering disebut sebagai hormon tumbuhan. Jadi, hormon tumbuhan merupakan senyawa organik yang disintesis oleh salah satu bagian tumbuhan dan dapat ditranslokasikan ke bagian tumbuhan lainnya serta dapat menimbulkan respon fisiologis pada konsentrasi rendah. Respon fisiologis yang ditimbulkan oleh hormon tidak selalu bersifat memacu, namun terdapat beberapa jenis hormon yang bersifat menghambat pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Selain itu, hormon tersebut dapat memberikan respon, baik pada bagian yang mensintesis hormon maupun bagian tumbuhan lainnya yang ditranslokasi.

Berbeda dengan senyawa organik endogen, senyawa organik eksogen disintesis oleh ahli kimia organik. Senyawa organik inilah yang umumnya disebut zat pengatur tumbuh (ZPT). Dengan demikian, pengertian hormon memiliki beberapa batasan sebagai berikut:

1. Hormon disintesis oleh tumbuhan

## *Pengantar Fisiologi Tumbuhan*

2. Hormon dapat ditranslokasikan ke bagian yang lain pada tumbuhan
3. Hormon dapat menimbulkan respon secara efektif pada konsentrasi rendah

Respon fisiologis yang ditimbulkan oleh hormon dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain jenis tumbuhan (spesies), bagian tumbuhan, fase perkembangan, konsentrasi hormon, interaksi antar hormon yang terdapat di dalam tumbuhan, dan lingkungan. Selain itu, terdapat syarat agar hormon dapat memberikan respon, yaitu hormon harus ada dalam jumlah cukup, berada di dalam sel yang tepat, dapat dikenali dan diikat oleh sel sasaran, protein sasaran (penerima) harus menyebabkan perubahan metabolik (Salisbury, 1995 jilid 3).

Hormon merupakan alat komunikasi antar sel di dalam tumbuhan. Hormon adalah sinyal molekuler yang baik secara sendiri maupun bekerja sama dengan sinyal molekuler lain, secara langsung berpengaruh pada perkembangan sel itu sendiri maupun membawa informasi di antara sel dan kemudian bekerja sama dalam pertumbuhan dan perkembangan.

Konsep hormon pada tanaman memiliki spesifikasi tersendiri. Hormon tanaman diartikan sebagai messenger kimia yang dapat menyebabkan sel dapat berkomunikasi satu sama lain. Hormon tanaman terbentuk secara alami, merupakan molekul organik, terdapat pada konsentrasi rendah, dan dapat memengaruhi proses fisiologis. Sedangkan hormon pada hewan disintesis di suatu organ atau jaringan, ditransportasikan melalui pembuluh darah ke jaringan target, dan pada konsentrasi tertentu dapat mengontrol respon fisiologis. Terdapat perbedaan batasan pengertian hormon tanaman dengan hewan. Persamaan hormon hewan

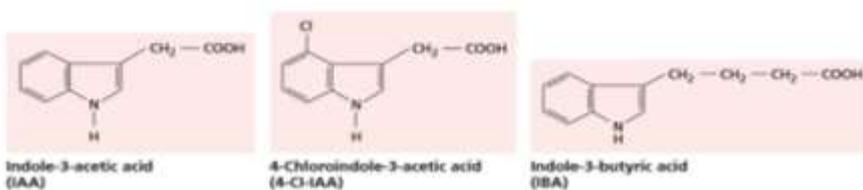
dan tumbuhan adalah sama-sama terbentuk dari bahan organik dan pada konsentrasi rendah dapat memengaruhi proses fisiologis. Namun hormon pada tumbuhan tempat sintesis dan transportnya tidak selalu terlokalisasi pada organ yang menghasilkan (Hopkins, 2008).

## **B. Macam-macam Hormon dan ZPT**

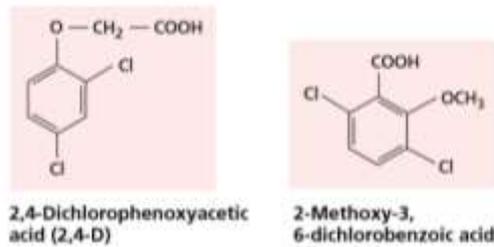
Hormon terdiri dari beberapa macam, yaitu auksin, sitokinin, giberelin, etilen, dan asam absisat.

### **1. Auksin**

Auksin merupakan hormon pertama yang ditemukan pada tanaman dan mempunyai peran dasar dalam respon tanaman. Auksin disintesis di bagian meristematik dan organ-organ pertumbuhan aktif lainnya. Jaringan meristem ini antara lain pucuk tunas. Salah satu auksin yang dikenal adalah Indole-Acetic-Acid (IAA). IAA disintesis di meristem, daun muda, serta biji dan buah yang sedang berkembang (Taiz and Zeiger, 2002). Jumlah IAA dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu tipe dan umur jaringan serta fase pertumbuhan. Kelimpahan IAA pada tiap-tiap lokasi berbeda. Kelimpahan IAA pada jaringan vegetatif sekitar 1-100  $\mu\text{g}$ . Kelimpahan IAA lebih tinggi terdapat pada organ biji. Tingginya konsentrasi IAA pada biji dapat membantu pertumbuhan secara cepat ketika biji berkecambah (Hopkins, 2008).



**Gambar 9.1.** Struktur auksin alami (Lincoln Taiz and Eduro Zeiger, 2002)



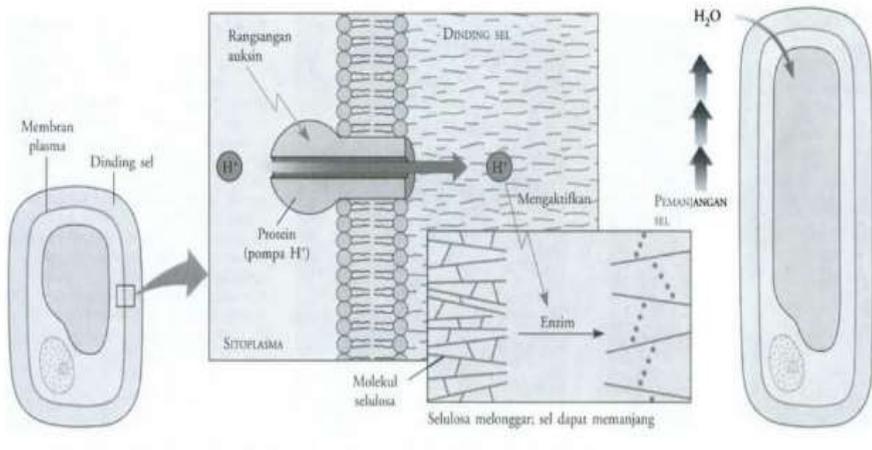
**Gambar 9.2.** Struktur auksin buatan (Lincoln Taiz and Eduro Zeiger, 2002)

Auksin berperan hampir pada setiap tahapan pertumbuhan dan perkembangan tanaman serta perkembangan buah. Pada tahapan pertumbuhan dan perkembangan tanaman, peran auksin antara lain mengatur diferensiasi sel termasuk diferensiasi vascular di tanah, menstimulasi pemanjangan sel pada potongan batang koleoptil, respon perkembangan seperti inisiasi akar sekunder/adventif, diferensiasi vascular, serta perkembangan tunas aksilar, bunga, dan buah. Selain itu, auksin juga berperan dalam diferensiasi vascular serta dapat mengontrol pertumbuhan tunas aksilar (Hopkins, 2008).

### **a. Pemanjangan sel**

Menurut hipotesis pertumbuhan asam, pompa yang terletak di dalam membran plasma memainkan peranan dalam respon pertumbuhan dari berbagai sel terhadap auksin. Pada daerah pemanjangan suatu tunas, auksin merangsang pompa proton, yaitu suatu tindakan yang menurunkan pH pada dinding sel. Pengasaman dinding ini mengaktifkan enzim-enzim yang memecahkan ikatan silang (ikatan hidrogen) yang terdapat antara mikrofibril-mikrofibril selulosa,

sehingga melonggarkan serat-serat dinding sel. Hal ini disebabkan dindingnya sekarang lebih plastis, sebas mengambil air melalui osmosis dan bertambah panjang. Namun, agar bisa tumbuh terus setelah perubahan awal ini, sel-sel harus membuat lebih banyak sitoplasma dan bahan-bahan dinding selnya.<sup>43</sup>



**Gambar 9.3.** Pemanjangan sel sebagai respon terhadap auksin (Cambell, dkk., 2003)

Auksin sintetis digunakan dalam aplikasi komersial. Selain stabilitasnya yang lebih besar, auksin sintetis seringkali lebih efektif daripada IAA dalam aplikasi spesifik. Salah satu penggunaan auksin yang paling luas ditemui oleh konsumen adalah penggunaan 2,4-D dalam pengendalian gulma. Zat pengatur tumbuh 2,4-D dan senyawa sintetis lainnya, mengekspresikan aktivitas auksin pada konsentrasi rendah, tetapi pada konsentrasi yang lebih tinggi berfungsi sebagai herbisida yang efektif.

<sup>43</sup> Neil A. Cambell. dkk, Biologi Jilid 2 edisi 5. (Jakarta, Penerbit Erlangga,2003)., hlm. 382

Pengenalan 2,4-D dan 4-chlorophenoxyacetic acid (4-CPA) sebagai herbisida pada tahun 1946 merevolusi dunia pertanian. Untuk alasan yang tidak jelas, asam fenoksiasetat terklorinasi secara selektif beracun bagi spesies berdaun lebar. Zat pengatur tumbuh 2,4-D tetap menjadi komponen utama campuran 'gulma-dan-pakan' untuk perawatan di halaman rumah serta untuk mengendalikan gulma daun lebar dalam tanaman sereal. Auksin sintetik disukai dalam aplikasi komersial karena biayanya yang rendah dan stabilitas kimianya yang lebih besar.

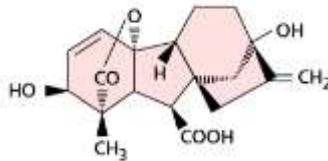
Asam indolebutirat (IBA) dan asam naftalenasetat (NAA), keduanya banyak digunakan dalam perbanyakkan vegetatif seperti perbanyakkan tanaman dari stek batang dan daun. Aplikasi ini dapat ditelusuri sebagai kecenderungan auksin untuk merangsang pembentukan akar adventif. Umumnya ZPT ini dipasarkan sebagai preparasi 'hormon rooting', yang dicampur dengan bahan lembam seperti bedak. Stek batang dicelupkan ke dalam bubuk sebelum ditanam di hamparan pasir basah untuk mendorong pembentukan akar. ZPT NAA umumnya digunakan untuk menginduksi bunga pada pohon-pohon apel. Efek samping ini secara otomatis disebabkan oleh produksi etilen yang diinduksi auksin. NAA juga digunakan baik untuk menipiskan buah maupun mencegah rusaknya di masa pra panen.<sup>44</sup>

---

<sup>44</sup> William G. Hopkins dan Norman P. A., *Introduction to Plant Physiology fourth edition*, ..., hlm. 314

## 2. Giberelin

Giberelin berperan dalam meningkatkan pemanjangan batang melalui pemanjangan internodus. Giberelin menstimulasi pemanjangan tanaman utuh dan roset. Berbeda dengan auksin, giberelin memacu pemanjangan tanaman utuh. Sedangkan auksin memacu pemanjangan pada potongan jaringan (Hopkins, 2008).



**Gambar 9.4.** Gibberelic acid (GA<sub>3</sub>) (Lincoln Taiz and Eduro Zeiger, 2002)

Giberelin sebagai hormon tumbuh pada tanaman sangat berpengaruh pada sifat genetik (*genetic dwarfism*), pembuangan, penyinaran, partenokarpi, mobilisasi karbohidrat selama perkecambahan (*germination*), dan aspek fisiologi lainnya. Giberelin mempunyai peranan dalam mendukung perpanjangan sel (*cell elongation*), aktivitas cambium, serta mendukung pembentukan RNA baru dan sintesa protein.

### a. *Genetic dwarfism*

Giberelin dapat mengatasi gejala *genetic dwarfism*. Dengan adanya fungsi giberelin dalam pemanjangan sel, sehingga tanaman yang kerdil bisa menjadi lebih tinggi. *Genetic dwarfism* adalah suatu gejala kerdil yang disebabkan oleh adanya mutasi. Gejala ini terlihat dari memendeknya internodus (ruas batang). Terhadap *genetic dwarfism* ini, giberelin mampu merubah

tanaman yang kerdil menjadi tinggi. Hal ini telah dibuktikan oleh Brian dan Hemming (1955). Dalam eksperimennya dilakukan penyemprotan *gibberellic acid* pada berbagai varietas kacang. Hasil dari eksperimen ini menunjukkan bahwa *gibberellic acid* berpengaruh terhadap tanaman kacang yang kerdil menjadi tinggi. Mengenai hubungannya dengan pemanjangan sel, dikemukakan bahwa giberelin mendukung pengembangan dinding sel. Penggunaan giberelin akan mendukung pembentukan enzim protolictik yang akan membebaskan triptofan sebagai asal bentuk dari auksin. Hal ini berarti bahwa kehadiran giberelin tersebut akan meningkatkan kandungan auksin. Mekanisme lain menerangkan bahwa giberelin akan menstimulasi pemanjangan sel, karena adanya hidrolisa pati yang dihasilkan dari giberelin akan mendukung terbentuknya amilase. Sebagai akibat dari proses tersebut, maka konsentrasi gula meningkat yang mengakibatkan tekanan osmotik di dalam sel menjadi naik, sehingga ada kecenderungan sel tersebut berkembang.<sup>45</sup>

---

<sup>45</sup> *Ibid.*, hlm. 9



**Gambar 9.5.** Efek  $GA_1$  eksogen pada jagung normal dan kerdil (d1)  
(Lincoln Taiz and Eduro Zeiger, 2002)

### **b. Pembungaan (*flowering*)**

Giberelin sebagai salah satu hormon tumbuh pada tanaman, mempunyai peranan dalam pembungaan. Umumnya kandungan giberelin tinggi menyebabkan pembungaan pada tanaman menjadi terhambat. Sebaliknya, tanaman akan terinduksi untuk berbunga apabila kandungan giberelinnya menurun. Namun demikian, hal tersebut tidak berlaku umum untuk semua tanaman karena pada berbagai tanaman pembungaanya justru memerlukan kandungan giberelin yang tinggi.

### **c. *Parthenocarp* dan *fruit-set***

Giberelin dapat merangsang terbentuknya buah partenokarpi seperti anggur dan tomat, sebab GA dapat merangsang pembuahan tanpa melalui penyerbukan. Seperti auksin, giberelinpun berpengaruh terhadap

partenokarpi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *gibberellic acid* (GA<sub>3</sub>) lebih efektif memacu terjadinya partenokarpi dibandingkan dengan auksin yang dilakukan pada blueberry. Hasil eksperimen lain menunjukkan pula bahwa GA<sub>3</sub> dapat meningkatkan tandan buah (*fruit set*) dan hasil panen.

Peranan Giberelin dalam pematangan buah (*fruit ripening*)

Pematangan (*ripening*) adalah suatu proses fisiologis, yaitu terjadinya perubahan dari kondisi yang tidak menguntungkan ke suatu kondisi yang menguntungkan, ditandai dengan perubahan tekstur, warna, rasa, dan aroma. Dalam proses pematangan ini, giberelin memunyai peran penting yaitu mampu mengundurkan pematangan (*repening*) dan pemasakan (*maturing*) suatu jenis buah. Dari hasil penelitian menunjukkan aplikasi giberelin pada buah tomat dapat memperlambat pematangan buah, sedangkan *gibberellic acid* yang diterapkan pada buah pisang matang, pemasakannya dapat ditunda.<sup>46</sup>

#### **d. Mobilisasi bahan makanan selama fase perkecambahan (*germination*)**

Biji cerealia terdiri dari embrio dan endosperm. Didalam endosperm terdapat masa pati (*starch*) yang dikelilingi oleh suatu lapisan "aleurone". Sedangkan embrio itu sendiri merupakan suatu bagian hidup yang suatu saat akan menjadi dewasa. Pertumbuhan embrio selama perkecambahan bergantung pada persiapan bahan makanan yang berada di dalam endosperm. Untuk keperluan kelangsungan hidup embrio, maka

---

<sup>46</sup> *Ibid.*, hlm. 10.

terjadilah penguraian secara enzimatik yaitu terjadi perubahan pati menjadi gula yang selanjutnya ditranslokasikan ke embrio sebagai sumber energi untuk pertumbuhannya. Dari hasil penelitian menunjukkan bahwa giberelin berperan penting dalam proses aktivitas amilase. Hal ini telah dibuktikan dengan menggunakan GA yang mengakibatkan aktivitas amilase meningkat. Aktivitas enzim  $\alpha$ -amilase dan protease di dalam endosperm juga didukung oleh GA melalui *de-novo synthesis*. Hal ini ada hubungannya dengan terbentuknya DNA baru yang kemudian menghasilkan RNA.



**Gambar 9.6.** Perkembangan tanduk rusa pada jagung yang kekurangan giberelin (*Zea mays*) (Bawah) dan jagung yang telah dirawat dengan giberelin (Atas) (Lincoln Taiz and Eduardo Zeiger, 2002)

**e. Stimulasi aktivitas kambium dan perkembangan xilem**

Giberelin mempunyai peranan dalam aktivitas kambium dan perkembangan xilem. Aplikasi  $GA_3$  dengan konsentrasi 100, 250, dan 500 ppm mendukung terjadinya diferensiasi xilem pada pucuk olive. Begitu pula aplikasi  $GA_3+IAA$  dengan konsentrasi masing-

masing 250 dan 500 ppm, memberikan pengaruh sinergis pada xilem.<sup>47</sup>

**f. Pemecahan Dormansi**

Fungsi penting giberelin yang lain adalah dalam hal mematahkan dormansi dengan kata lain mempercepat perkecambahannya. Dormansi adalah masa istirahat bagi suatu organ tanaman atau biji. Bisa juga diartikan sebagai adalah kemampuan biji untuk mengundurkan fase perkecambahannya hingga saat dan tempat itu menguntungkan untuk tumbuh. Pematahan dormansi terjadi dengan cara GA yang dihasilkan di embrio masuk ke lapisan aleuron dan di sana menstimulir terbentuknya amilase dan enzim hidrolitik. Enzim itu disekresikan ke endosperm dan mendorong hidrolisis cadangan makanan (merubah pati menjadi gula dan energi). Jadi, GA mendorong pertumbuhan biji dengan meningkatkan plastisitas dinding sel diikuti hidrolisis pati menjadi gula. Proses-proses tersebut menyebabkan potensial air sel turun, air masuk ke sel dan akhirnya sel memanjang.<sup>48</sup> Selain itu, GA juga dapat menyebabkan kulit lebih permeabel terhadap air dan udara.

Secara umum, terjadinya dormansi disebabkan oleh faktor internal dan eksternal. Faktor yang menyebabkan dormansi pada biji adalah:

1. Tidak sempurnanya embrio (*rudimentary embryo*);
2. Embrio yang belum matang secara fisikologis (*physiological immature embryo*);

---

<sup>47</sup> *Ibid.*, hlm. 12

<sup>48</sup> *Ibid.*, hlm. 13.

3. Kulit biji yang tebal (tahan terhadap gerakan mekanis);
4. Kulit biji impermeabel (*impermeable seed coat*); dan
5. Adanya zat penghambat (inhibitor) untuk perkecambahan (*presence of germination inhibitors*).

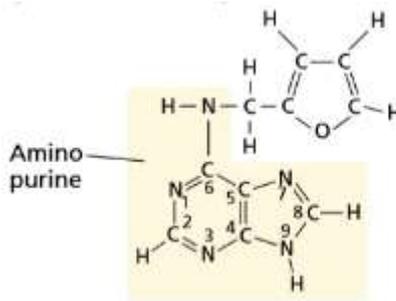
### **3. Sitokinin**

Sitokinin dibutuhkan untuk proliferasi sel. Sitokinin disintesis di akar dan ditranslokasikan ke xilem. Sitokinin di akar ditemukan pada konsentrasi tinggi, khususnya pada ujung akar yang aktif dalam pembelahan mitosis di xilem.

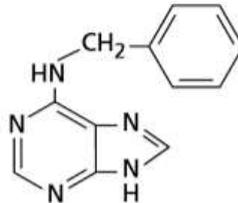
Sitokinin menstimulasi pembelahan sel pada kultur jaringan. Sitokinin juga memengaruhi sejumlah respon perkembangan lainnya, termasuk diferensiasi tunas dan akar pada kultur jaringan, pertumbuhan tunas lateral, dan memperlambat penuaan. Rasio sitokinin dan auksin dalam media kultur menentukan jenis respon yang ditimbulkan mengontrol inisiasi akar dan tunas pada jaringan kalus dan pertumbuhan tunas aksilar. Jika yang ditambahkan pada media kultur hanya auksin, maka akan terjadi inisiasi pembentukan akar. Begitu pula jika rasio auksin dan sitokinin tinggi maka menginisiasi pembentukan akar. Jika konsentrasi sitokinin lebih tinggi daripada auksin maka memacu produksi tunas dan jika konsentasi auksin sama dengan sitokinin maka memacu proliferasi kalus yang tidak berdiferensiasi.

Sitokinin juga bekerja secara antagonis dengan auksin dalam regulasi pertumbuhan tunas aksilar atau dominansi apikal. Jika konsentrasi auksin tinggi maka meningkatkan dominansi apikal, sebaliknya jika

konsentrasi sitokinin tinggi maka akan mengurangi dominansi apikal (Hopkins, 2008).



**Gambar 9.7.** Kinetin (Lincoln Taiz and Eduro Zeiger, 2002)



**Gambar 9.8.** Benziladenine (BA) (Lincoln Taiz and Eduro Zeiger, 2002)

**a. Sitokinin memacu pembelahan sel dan pembentukan organ**

Fungsi utama sitokinin adalah memacu pembelahan sel. Skoog dan beberapa kawannya menemukan bahwa jika empulur batang tembakau, kedelai dan beberapa tumbuhan dikotil lain dipisahkan dan dibiakkan secara aseptik pada medium agar yang mengandung auksin dan hara yang tepat, akan terbentuk masa sel yang tak terspesialisasi, tak beraturan, dan khususnya poliploid, yang disebut kalus. Jika sitokinin juga ditambahkan, maka sitokinesis juga akan terpacu.

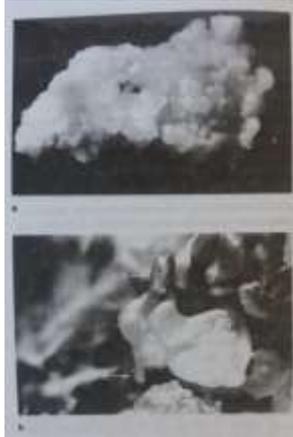
Skoog dan beberapa kawannya juga mendapati bahwa jika nisbah sitokinin terhadap auksin

dipertahankan, akan tumbuh sel meristem pada kalus tersebut; sel itu membelah dan memengaruhi sel lainnya untuk berkembang menjadi kuncup, batang, dan daun. Dengan memilih nisbah yang tepat, kalus dari sebagian besar spesies (terutama jenis dikotil) dapat didorong perkembangannya menjadi tumbuhan utuh yang baru. Kemampuan kalus untuk menghasilkan tumbuhan lengkap digunakan sebagai alat untuk menyeleksi tanaman yang memiliki ketahanan terhadap kekeringan, rawan garam, patogen dan herbisida tertentu, atau yang memiliki ciri lain yang bermanfaat.

Cara kalus membentuk tumbuhan baru cukup beragam. Jika nisbah sitokinin-auksin cukup tinggi, sistem tajuk mula-mula berkembang; kemudian akar liar juga terbentuk secara spontan dari batang saat masih berada dalam kalus. Pembentukan tajuk atau akar liar oleh kalus disebut organogenesis. Namun, terkadang kalus menjadi embriogenik dan membentuk embrio yang berkembang menjadi akar dan tajuk; ini disebut embriogenesis.<sup>49</sup>

---

<sup>49</sup> *Ibid.*, hlm. 67-69



**Gambar 9.9.** (a) kalus yang tumbuh dari skutelum biji padi (b) kalus embriogenik yang telah membentuk tajuk muda dan sistem akar (Salisbury and Ross, 1995)

### **b. Sitokinin menunda penuaan**

Saat kita memetik sehelai daun yang masih aktif, daun tersebut akan mulai kehilangan klorofil, RNA, protein dan lipid dari membran kloroplas lebih cepat dari pada jika daun itu masih melekat pada induknya, walaupun diberi garam mineral dan air melalui ujungnya yang terpotong. Penuaan prematur ini, yang ditandai dengan menguningnya daun, berlangsung sangat cepat jika daun diletakkan di dalam gelap.

Pada daun tumbuhan dikotil, akar liar sering terbentuk pada pangkal tangkai, dan kemudian penuaan helai daun sangat tertunda. Akar tampaknya memberikan sesuatu kepada daun untuk mempertahankannya tetap muda secara fisiologis. Sesuatu tersebut hampir dapat dipastikan mengandung sitokinin yang diangkut melalui xilem.

Pada tanaman bunga matahari, kandungan sitokinin dalam cairan xilem meningkat selama masa

pertumbuhan, kemudian sangat menurun saat pertumbuhan berhenti dan tanaman mulai berbunga. Hal tersebut menunjukkan bahwa berkurangnya angkutan sitokinin dari akar ke tajuk mengakibatkan penuaan terjadi lebih cepat.



**Gambar 9.10.** Penuaan pada daun trifoliata (Salisbury and Ross, 1995)

Sitokinin mendorong pengangkutan sebagian besar linarut dari bagian daun yang lebih tua dan bahkan dari daun tua ke daerah yang diberi perlakuan. Di situ, daun yang paling tua (daun pertama) pada tumbuhan kacang-kacangan diolesi dengan sitokinin sintetik berupa benziladenin (BA) setiap empat hari sekali. Biasanya, dedaunan itu menua lebih lebih cepat daripada daun trifoliata yang terletak di atasnya. Namun pada contoh tersebut, pola penuaan menjadi terbalik. Daun pertama yang diberi perlakuan menyerap hara dari daun trifoliata yang berdekatan dan mengakibatkan daun trifoliata menua lebih dahulu.

Kajian lebih lanjut, dengan menggunakan tumbuhan kacang-kacangan, memperlihatkan dua macam perlakuan yang dapat sangat menunda penuaan daun pertama, dan bahkan dapat mengembalikan kemudaan segera setelah warna daun menjadi hijau-kuning pucat.

Salah satu perlakuan itu adalah dengan memetik dedaunan dan batang di bagian atas, dan perlakuan lainnya ialah dengan mencelupkan daun pertama ke dalam larutan benziladenin (BA). Sejumlah kajian lain yang menggunakan berbagai jenis tumbuhan dikotil dan monokotil menunjukkan bahwa bila hanya satu bagian daun yang diberi perlakuan dan tertimbun disana, maka hal itu menandakan bahwa daun muda dapat mengambil hara dari daun yang lebih tua, antara lain karena daun muda kaya akan sitokinin. Oleh karena itu disimpulkan bahwa sitokinin memacu kemampuan jaringan muda untuk berlaku sebagai wadah penampung bagi pengangkutan floem.

Kemampuan sitokinin menunda penuaan juga berlaku pada bunga potong tertentu dan sayur mayur segar. Ulasan yang baik mengenai penuaan daun mahkota diberikan oleh Borochoy dan Woodsoon. Konsentrasi sitokinin di daun mahkota bunga mawar dan anyelir menurun sejalan dengan bertambahnya umur, dan penambahan sitokinin dapat memperlambat proses penuaan itu. Anyelir paling banyak diteliti; dan untuk spesies tersebut, larutan yang mengandung dihidrozeatin atau benziladenin terbukti paling efektif (Van Staden dkk). Namun, untuk sebagian besar jenis bunga potong, sitokinin eksogen tidak mampu menanggulangi efek etilen yang dihasilkan bunga untuk mempercepat penuaan.<sup>50</sup>

**c. Sitokinin memacu perkembangan kuncup samping tumbuhan dikotil**

---

<sup>50</sup>*Ibid.*, hlm. 69-71

Dalam kajian awal mengenai fenomena ini, kinetin sintetik digunakan sebagai senyawa utamanya, dan pertumbuhan kuncup samping hanya mampu berlangsung selama beberapa hari. Pemanjangan kuncup untuk rentang waktu lebih lama dapat diperoleh hanya dengan menambahkan IAA atau giberelin pada kuncup tersebut. Jenis sitokinin lain, yaitu benziladenin, kadang menyebabkan pemanjangan yang lebih nyata daripada kinetin, namun efeknya dikaji hanya pada beberapa spesies saja. Pillay dan Rilton memperlihatkan bahwa benziladenin dan zeatin sangat memacu pemanjangan kuncup samping tumbuhan kapri selama sekurangnya dua minggu, sedangkan isopentenil adenine dan kinetin memacu pertumbuhan selama waktu yang lebih pendek. Belum diketahui mengapa hormon zeatin dan isopentenil adenine yang berkerabat sangat dekat itu memberikan efek yang berbeda. Tapi, kedua penulis itu memperkirakan bahwa isopentenil adenine tidak begitu aktif, sebab senyawa tersebut terhidroksilasi dengan lambat menjadi zeatin yang jauh lebih aktif dalam kuncup. Hasil pengamatan yang dilaporkan King dan van Staden umumnya mendukung pentingnya hidroksilasi ini. Terdapat pula bukti lain bahwa kuncup samping yang pasif tidak mensintesis sitokinin-aktif, namun masih belum bisa dipastikan kepentingan hubungan antara sitokinin dan hormone lain serta berbagai faktor hara dalam pengendalian perkembangan kuncup samping.<sup>51</sup>

---

<sup>51</sup>*Ibid.*, hlm. 71-72



Tumbuhan Liar



Tumbuhan Mutan

**Gambar 9.11.** Pemacuan pertumbuhan kuncup samping pada mutan tembakau yang menghasilkan sitokinin berlebihan. Kuncup samping pada tumbuhan jenis liar dan tumbuhan mutan (Salisbury and Ross, 1995)

**d. Sitokinin memacu pembesaran sel pada kotiledon dan daun tumbuhan dikotil**

Banyak biji tumbuhan dikotil yang dikecambahkan di tempat gelap memunculkan kotiledonnya ke atas tanah, tetapi kotiledon itu tetap berwarna kuning dan kecil. Jika kotiledon itu dikenai cahaya, pertumbuhannya meningkat pesat, walaupun energi cahaya yang diberikan sebenarnya terlalu rendah untuk melangsungkan fotosintesis. Inilah efek fotomorfogenetik yang antara lain dikendalikan oleh fitokrom dan barang kali juga sitokinin. Jika kotiledon dipisahkan dan dipelihara dengan diberi sitokinin, laju pertumbuhan meningkat 2 atau 3 kali lipat dibandingkan dengan kotiledon pembanding yang tidak mendapat tambahan hormon, baik dengan gelap maupun dalam terang.

Pemacuan pertumbuhan ini terjadi pada lebih dari banyak spesies tumbuhan yang sudah dikenal, termasuk lobak, bunga matahari, mentimun dan labu

kuning. Sebagian besar sepsies tersebut mengandung lemak sebagai cadangan utama dalam kotiledon. Kotiledon biasanya muncul di atas tanah dan mampu melakukan fotosintesis. Tidak terlihat adanya respon pada spesies yang kotiledonnya tetap di bawah tanah setelah berkecambah, atau jenis kacang - kacangan yang kotiledonnya muncul namun tidak menyerupai daun. Hal ini menunjukkan efek zeatin dalam memacu pembesaran kotiledon lobak, dalam gelap dan terang, sehingga hal ini juga memperlihatkan bahwa cahaya bisa efektif dalam keadaan tanpa zeatin. Auksin tidak memacu pertumbuhan kotiledon dan gibberelin juga hanya memberikan efek kecil bila kotiledon dibiakkan dalam air atau dalam keadaan gelap. Jadi, respon ini dapat digunakan sebagai uji biologi bagi sitokinin.

Semua hasil percobaan menunjukkan bahwa sitokinin meningkatkan baik sitokinesis maupun pembesaran sel, tetapi sitokinesis tidak meningkatkan pertumbuhan organnya sendiri, sebab sitokinesis hanya merupakan proses pembelahan saja. Oleh karena itu, pertumbuhan membutuhkan pemelaran sel, dan pertumbuhan yang terpacu oleh sitokinin meliputi pemelaran sel yang lebih cepat dan produksi sel yang lebih banyak.

**e. Efek sitokinin pada batang dan akar**

Pertumbuhan normal batang dan akar diduga membutuhkan sitokinin, namun sitokinin endogen jarang ditemukan sebagai faktor pembatas pertumbuhan. Akibatnya, pemberian sitokinin eksogen pun tidak berhasil meningkatkan pertumbuhan organ tersebut.

Untuk memastikan peran sitokinin bagi pertumbuhan normal pada batang dan akar adalah dengan membuat irisan jaringan dan menumbuhkannya secara *in vitro*. Dalam percobaan tersebut dianggap bahwa irisan jaringan akan kehabisan sitokinin saat dipisahkan dari ujung tajuk atau ujung akarnya yang diperkirakan bertindak sebagai sumber hormon. Jika irisan akar atau batang ditumbuhkan secara *in vitro* dengan tambahan sitokinin, maka pemanjangan hampir selalu terlambat dibandingkan dengan irisan pembanding.

Ada dua kasus yang dikenal, yang menunjukkan bahwa pemberian sitokinin benar-benar memacu pemanjangan potongan koleoptil muda tanaman gandum dan hipokotil utuh pada tanaman semangka, terutama dari kultivar katai dan kerdil. Pada koleoptil gandum, pemacuan pertumbuhan terjadi hanya jika jaringan tersebut masih muda dan pembelahan sel masih berlangsung, namun teramati pula sitokinin menyebabkan pertumbuhan dengan cara mendorong pemanjangan sel. Pada semangka katai, sitokinin eksogen terbukti memacu pemanjangan hipokotil, terutama karena laju pemanjangan sel selalu meningkat. Peningkatan ini dihasilkan dari sitokinin yang diberikan pada ujung tajuk atau pada akar. Singkatnya, sitokinin eksogen memacu pembesaran sel pada daun muda, kotiledon, koleoptil gandum, dan hipokotil semangka, tetapi masih banyak yang perlu diteliti mengenai peranan hormon secara normal dalam pembesaran sel, terutama pada batang dan akar.

**f. Sitokinin memacu perkembangan kloroplas dan sintesis klorofil**

Dari kecambah tanaman angiosperma yang ditumbuhkan di tempat gelap, daun muda dan kotiledonnya dipetik untuk diuji apakah penambahan sitokinin berpengaruh pada perkembangan kloroplas atau sintesis klorofil. Percobaan ini dapat dilakukan karena dalam keadaan gelap klorofil tidak terbentuk dan perkembangan kloroplas terhambat. Plastid muda berhenti pada tahap proplastid atau tahap etioplas. Etioplas (dari kecambah yang ditumbuhkan dalam gelap atau teretiolasi) berwarna kuning karena mengandung karotenoid. Etioplas memiliki sistem membran dalam yang menarik, yang tersusun rapat menjadi kisi-kisi dalam yang disebut badan prolamela. Setelah terkena cahaya, badan prolamela akan menghasilkan sistem tilakoid seperti yang ditemukan pada kloroplas hijau yang normal. Perkembangan ini disertai dengan pembentukan protein.

Pemberian sitokinin pada daun atau kotiledon yang teretiolasi menghasilkan dua efek utama, yaitu memacu perkembangan lanjut (dalam keadaan terang, etioplas menjadi kloroplas, khususnya dengan mendorong pembentukan grana, dan kedua adalah meningkatkan laju pembentukan klorofil. Alasan utama munculnya kedua efek itu mungkin karena sitokinin mendorong terbentuknya protein.<sup>52</sup>

**4. Etilen**

Etilen diproduksi dalam jumlah besar jaringan yang mengalami penuaan atau pematangan. Etilen umumnya

---

<sup>52</sup> *Ibid.*, hlm. 73-75

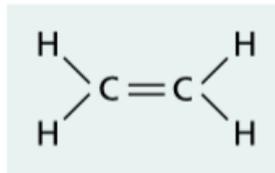
digunakan untuk meningkatkan pematangan pada pisang dan buah-buahan lainnya. Etilen diproduksi saat konsentrasi auksin yang tinggi dipasok ke jaringan tanaman. Etilen terdapat pada semua organ tanaman meliputi akar, daun, umbi-umbian, buah-buahan, biji-bijian, dan sebagainya. Namun, konsentrasi etilen pada masing-masing organ tersebut berbeda-beda, tergantung dari fase perkembangannya. Produksi etilen pada tiap-tiap jaringan bervariasi dan umumnya terletak di jaringan perifer. Pada biji alpukat, produksi etilen terlokalisasi terutama di dalam mantel biji, sedangkan pada buah tomat dan hipokotil kacang hijau etilen berasal dari daerah epidermis (Hopkins, 2008).

Tidak seperti hormon lainnya, etilen ini berupa gas yang bersifat *volatile* (mudah menguap). Etilen berperan dalam pematangan buah dan senesensi (penuaan). Ethepon (2-chloroethylphosphonic acid) adalah senyawa yang pada pH fisiologis mudah terurai dan menghasilkan etilen. Ethepon juga sering digunakan untuk percobaan di dalam laboratprium (Hopkins, 2008).

Etilen berpengaruh terhadap beberapa aspek dalam perkembangan vegetatif. Etilen berpengaruh terhadap pematangan buah klimakterik. Perkembangan buah klimakterik ditandai dengan regulasi respirasi yang disebut dengan kenaikan klimakterik. Hal ini berarti pada proses pematangan buah klimakterik terjadi peningkatan proses respirasi. Kenaikan klimakterik biasanya disertai dengan produksi etilen dan diikuti dengan ekspresi gen yang meningkatkan aktivitas terkait pematangan, seperti perkembangan warna buah, rasa, dan tekstur (Hopkins, 2008).

Etilen juga berperan dalam merangsang pemanjangan batang, tangkai daun, akar, dan struktur bunga pada tanaman akuatik dan semiakuatik. Pengaruh etilen lebih nyata terdapat pada tanaman akuatik karena perendaman di dalam air dapat mengurangi penguapan gas etilen sehingga etilen yang terkandung di dalam tanaman lebih tinggi. Etilen dapat merangsang terjadinya epinasti, yaitu pembengkokan jaringan batang sehingga tangkai daun melengkung ke bawah. Epinasti pada tangkai daun terjadi akibat pemanjangan sel yang berlebihan pada sisi atas (adaksial) tangkai daun (Hopkins, 2008).

Pembengkokan daun epinasti ke arah bawah dapat mengurangi penyerapan energi matahari sehingga mengurangi terjadinya transpirasi. Selain itu, etilen juga berperan dalam memacu perkecambahan biji, mengurangi dominansi apikal, memacu pematangan buah, dan kematian sel (Hopkins, 2008).



**Gambar 9.12.** Etilen (Lincoln Taiz and Eduro Zeiger, 2002)

Etilen dalam tumbuhan memiliki peranan sebagai berikut:

**a. Etilen sebagai hormon pematangan**

Gas etilen digunakan untuk mengendalikan pemasakan beberapa jenis buah. Teknik ini cukup cepat dan memberikan pemasakan yang seragam sebelum dipasarkan. Buah yang umum dikendalikan

pemasakannya dengan etilen adalah pisang, tomat, pear, dan pepaya. Buah non-klimakterik seperti anggur, jeruk, nenas, dan strawberry tidak dapat dimasakkan dengan cara ini. Dalam kaitannya dengan proses pematangan buah, etilen berfungsi untuk memecahkan klorofil pada buah hingga mengakibatkan buah tersebut hanya memiliki xantofil dan karoten atau zat lain yang membuat kulit buah menjadi merah atau orange.

Etilen merupakan hormon tanaman yang mempunyai efek merangsang proses kematangan buah, tetapi juga berpengaruh mempercepat terjadinya kerusakan pada sayur, bunga potong, dan tanaman hias lain. Etilen merupakan suatu gas yang disintesis oleh tanaman dan mempunyai pengaruh pada proses fisiologi. Penggunaan gas etilen eksogen mempunyai pengaruh yang sama dengan etilen yang disintesis dari tanaman. Pengaruh etilen merangsang pematangan pada buah klimakterik, dan membuat terjadinya puncak produksi etilen seperti pada buah non-klimakterik. Daya simpan buah akan menurun dengan adanya pengaruh etilen. Pengaruh buruk etilen pada sayur umumnya adalah mempercepat timbulnya gejala kerusakan seperti bercak-bercak coklat pada daun. Pengaruh etilen pada tanaman hias seperti terjadinya gugur pada daun, kuncup bunga, kelopak bunga, atau secara umum terjadi pada daerah sambungan atau sendi tanaman (*abscission zone*).<sup>53</sup>

Sama seperti hormon lainnya mekanisme kerja hormon etilen melibatkan reseptor dan sinyal. Dengan tidak adanya etilen, sinyal rantai dimulai dengan

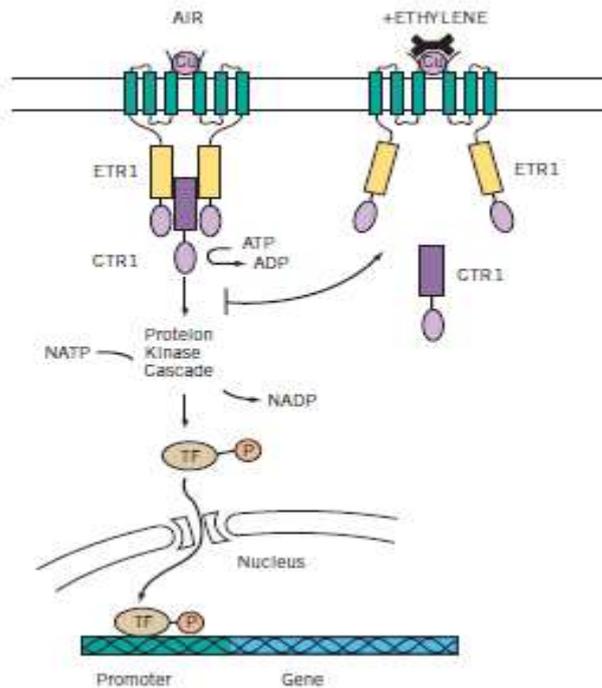
---

<sup>53</sup> I. M. S Utama, *Penanganan Pascapanen Buah dan Sayuran Segar*, hlm. 25

protein yang disebut *Constitutive Triple Response 1* (CTR1). CTR1 berinteraksi secara fisik dengan domain histidin kinase dari reseptor ETR1. Interaksi ini mengarah ke fosforilasi CTR1 dan memulai aliran transduksi sinyal. CTR1 adalah serin/ treonin protein kinase. Menurut model ini, CTR1 memulai membentuk protein kinase itu pada akhirnya menghasilkan fosforilasi satu atau lebih faktor transkripsi dan ekspresi konstitutif dari gen tertentu. Rangkaian protein kinase sangat mirip untuk kelompok protein yang diaktifkan mitogen yang dikenal luas kinase yang berperan penting dalam transduksi banyak sinyal pada hewan, tumbuhan, dan jamur. Ketika etilen berikatan dengan reseptor, ia mencegah interaksi CTR1 dengan ETR1. Ini akan memblokir inisiasi pembentukann protein kinase dan selanjutnya aktivasi gen. Hasilnya adalah bahwa dengan tidak adanya etilen, ekspresi gen yang dikendalikan etilena selalu aktif. Efek etilen adalah untuk mencegah aktivasi yang diperlukan faktor transkripsi.<sup>54</sup>

---

<sup>54</sup> William G. Hopkins and Norman P. A. Horner, *Introduction to Plant Physiology Fourth Edition*, hlm. 364-366



**Gambar 9.13.** Reseptor dan sinyal pada hormon etilen (Lincoln Taiz and Eduro Zeiger, 2002)

### **b. Absisi pada daun**

Kehilangan daun pada setiap musim gugur merupakan suatu adaptasi untuk menjaga agar tumbuhan yang berganti daun selama musim dingin tetap hidup ketika akar tidak bisa mengabsorpsi air dari tanah yang membeku. Sebelum daun itu mengalami absisi, beberapa elemen essensial diselamatkan dari daun yang mati, dan disimpan di dalam sel parenkim batang. Nutrisi ini dipakai lagi untuk pertumbuhan daun pada musim semi berikutnya.

Ketika daun pada musim gugur rontok, maka titik tempat terlepasnya daun merupakan suatu lapisan absisi yang berlokasi dekat dengan pangkal tangkai

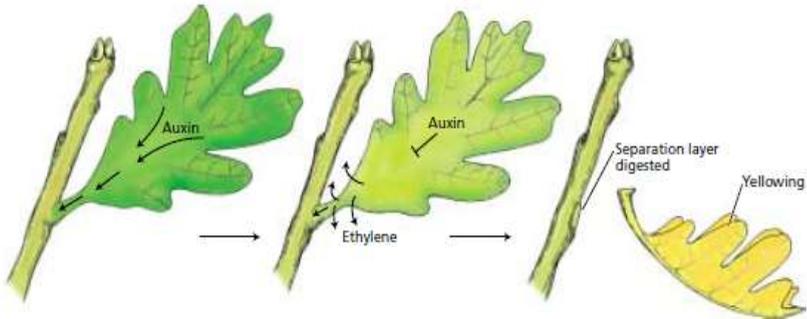
daun. Sel parenkim berukuran kecil dari lapisan ini memunyai dinding sel yang sangat tipis, dan tidak mengandung sel serat di sekeliling jaringan pembuluhnya. Lapisan absisi selanjutnya melemah, ketika enzimnya menghidrolisis polisakarida di dalam dinding sel. Akhirnya dengan bantuan angin, terjadi suatu pemisahan di dalam lapisan absisi. Sebelum daun itu jatuh, selapisan gabus membentuk suatu berkas pelindung di samping lapisan absisi dalam ranting tersebut untuk mencegah patogen yang akan menyerbui bagian tumbuhan yang ditinggalkannya.<sup>55</sup>

Absisi diatur oleh perubahan keseimbangan etilen dan auksin. Lapisan absisi dapat dilihat sebagai suatu lapisan vertikal pada pangkal tangkai daun. Setelah daunnya gugur, suatu lapisan pelindung dari gabus, menjadi bekas tempelan daun yang membantu mencegah serbuan patogen. Suatu perubahan keseimbangan antara etilen dan auksin akan mengontrol absisi. Daun yang tua, menghasilkan semakin sedikit auksin; yang menyebabkan sel lapisan absisi lebih sensitif terhadap etilen. Pada saat pengaruh etilen terhadap lapisan absisi kuat, maka sel itu memproduksi enzim, mencerna selulosa, dan komponen dinding sel lainnya.<sup>56</sup>

---

<sup>55</sup> N. A Campbell and J. B. Reece, *Biology Sixth Edition*, (San Francisco: Pearson Education. Inc, 2004)., hlm. 831.

<sup>56</sup> Lincoln Taiz and Eduardo Zeiger, *Plant Physiology Trith Edition*, hlm. 529-530



**Gambar 9.14.** Absisi pada daun (Lincoln Taiz and Eduardo Zeiger, 2002)

### c. Etilen dan Permeabilitas Membran

Etilen adalah senyawa yang larut di dalam lemak sedangkan membran dari sel terdiri dari senyawa lemak. Oleh karena itu, etilen dapat larut dan menembus ke dalam membran mitokondria. Apabila mitokondria pada fase pra klimakterik ditambah etilen, maka terjadi pengembangan volume yang akan meningkatkan permeabilitas sel sehingga bahan-bahan dari luar mitokondria akan dapat masuk. Dengan perubahan-perubahan permeabilitas sel akan memungkinkan interaksi yang lebih besar antara substrat buah dengan enzim-enzim pematangan.

Peran etilen lainnya antara lain:

- a. mendukung epinasti
- b. menghambat perpanjangan batang (*elongation growth*) dan akar pada beberapa spesies tanaman walaupun etilen ini dapat menstimulasi perpanjangan batang, koleoptil dan mesokotil pada tanaman tertentu, misalnya *Collettriche* dan padi
- c. menstimulasi perkecambahan

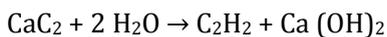
- d. menstimulasi pertumbuhan secara isodiametrikal lebih besar dibandingkan dengan pertumbuhan secara longitudinal
- e. mendukung terbentuknya bulu-bulu akar
- f. mendukung proses pembungaan pada nanas
- g. mendukung adanya *flower fading* dalam persarian anggrek
- h. menghambat transportasi auksin secara basipetal dan lateral

Hormon etilen dapat diaplikasikan dalam kehidupan sehari-hari, misalnya Kalsium Karbida ( $\text{CaC}_2$ ) atau yang biasa disebut dengan karbit, yaitu senyawa kimia  $\text{CaC}_2$ . Karbit digunakan dalam proses mempercepat pematangan buah. Karbit yang terkena uap air akan menghasilkan gas asetilen yang memiliki struktur kimia mirip dengan etilen alami, zat yang membuat proses pematangan di kulit buah.



**Gambar 9.15.** Kalsium Karbida ( $\text{CaC}_2$ ) (Sumber: Wikipedia.org, 2019)

Proses fermentasi berlangsung serentak sehingga terjadi pematangan merata. Proses pembentukan etilen dari karbit adalah sebagai berikut:



Dengan penambahan karbit pada buah, maka menyebabkan konsentrasi etilen menjadi meningkat. Hal tersebut menyebabkan kecepatan pematangan buah pun bertambah. Semakin besar konsentrasi gas etilen maka semakin cepat pula proses stimulasi respirasi pada buah. Hal ini disebabkan karena etilen dapat meningkatkan kegiatan-kegiatan enzim karatalase, peroksidase, dan amilase dalam buah. Selain itu juga, etilen dapat menghilangkan zat-zat serupa protein yang menghambat pemasakan buah. Respirasi merupakan proses pemecahan komponen organik (zat hidrat arang, lemak dan protein) menjadi produk yang lebih sederhana dan energi. Aktivitas ini ditujukan untuk memenuhi kebutuhan energi sel agar tetap hidup.

## **5. Asam Absisat (ABA)**

Asam absisat (ABA) memiliki efek yang lebih spesifik dibandingkan dengan auksin, giberelin, dan sitokinin. Fungsi utama ABA adalah menghambat perkecambahan sebelum waktunya dan memacu dormansi biji. Selain itu, ABA juga berperan dalam menginduksi penutupan stomata dan memproduksi molekul-molekul yang melindungi sel terhadap kekeringan. Fungsi lain dari ABA adalah memacu induksi sintesis protein di dalam biji, induksi heterofili (terjadinya bentuk daun yang berbeda-beda pada satu tumbuhan yang sama), inisiasi akar sekunder/adventif, bunga, dan penuaan (Hopkins, 2008).

ABA disintesis di sel mesofil, sel penjaga, dan jaringan vaskular. ABA meregulasi maturasi embrio dan perkecambahan biji. Perkembangan embrio dan perkecambahan biji sering mengalami perubahan secara drastis yang diakibatkan oleh perubahan kadar hormon di dalamnya (Hopkins, 2008).

Pada kebanyakan biji, kadar sitokinin tertinggi pada perkembangan embrio terjadi saat fase yang paling awal ketika laju pembelahan sel paling tinggi. Ketika konsentrasi sitokinin menurun dan benih biji memasuki periode perbesaran sel yang cepat, konsentrasi GA dan IAA meningkat. Pada fase awal embriogenesis terdapat ABA dalam jumlah sedikit atau terkadang tidak terdapat sama sekali. ABA hanya terdapat pada perkembangan embrio di tahap-tahap selanjutnya, yaitu ketika konsentrasi GA dan IAA mulai menurun. Jadi pada saat konsentrasi GA dan IAA mulai menurun, maka konsentrasi ABA mulai meningkat (Hopkins, 2008).

Secara umum, konsentrasi ABA memuncak paling tinggi selama fase maturasi, yaitu ketika volume biji dan berat kering mencapai maksimal. Konsentrasi ABA kembali menurun saat biji kering. Maturasi embrio ditandai dengan penghentian pertumbuhan embrio, akumulasi nutrisi cadangan makanan dalam endosperm, dan pengembangan toleransi terhadap kekeringan (Hopkins, 2008).

ABA memediasi respon stress air (kekeringan). Secara umum, tanaman merespon kekeringan dengan cara menutup stomatanya untuk mengurangi kehilangan air melalui permukaan daunnya pada peristiwa transpirasi. ABA dikatakan sebagai antitranspirant, artinya ABA mampu mencegah atau mengurangi peristiwa transpirasi sehingga mengurangi kehilangan air melalui penutupan stomata. ABA terakumulasi pada organ daun yang mengalami kekeringan. Kekurangan atau defisit air pada daun dapat berdampak pada proses fotosintesis. Mekanisme akumulasi ABA di daun yang kekeringan adalah jika pada daun mengalami defisit air, maka

transport elektron dan fosforilasi di dalam kloroplas terhambat. Jika transport elektron dan fosforilasi di dalam kloroplas terhambat, maka akumulasi proton di lumen tilakoid menurun dan pH di stroma juga menurun. Penurunan pH di stroma mengakibatkan peningkatan pH pada apoplas (yang mengelilingi sel mesofil) sehingga terjadi pelepasan ABA dari sel-sel mesofil di dalam apoplas. Selanjutnya ABA dibawa ke sel penjaga (Hopkins, 2008). Di dalam daun yang layu konsentrasi ABA tinggi. Namun demikian, penutupan stomata terjadi sebelum adanya akumulasi ABA yang tinggi. Hal ini disebabkan adanya pelepasan ABA yang disimpan ke dalam apoplas.

Fungsi ABA yang lain adalah berperan dalam perkembangan akar lateral. Inisiasi dan perkembangan akar lateral dikontrol oleh auksin, namun perkembangan akar lateral dihambat oleh ABA (Hopkins, 2008). Peranan ABA sangat nyata dalam proses pertumbuhan dan perkembangan tanaman. ABA berinteraksi dengan zat-zat pengatur tumbuh tanaman yang lain pada proses tersebut, biasanya interaksi ini bersifat menghambat (antagonisma). Pada kebanyakan hal, sifat menghambat ABA dapat diatasi dengan pemberian lebih banyak zat-zat tumbuh tersebut. Sebagai contoh, pengaruh IAA dalam mendorong pembengkakan koleoptil *Avena* dihambat oleh ABA. Jika diberikan IAA yang lebih banyak lagi, maka pengaruh ABA ini dapat dihilangkan. Penghambatan ABA terhadap perkecambahan biji selada tidak dapat diatasi dengan pemberian IAA, di sini diperlukan zat tumbuh selain IAA (misalnya asam giberelat dan sitokinin).

Pada proses pematangan biji-biji dari kebanyakan tanaman biasanya terjadi penimbunan ABA yang menyebabkan terjadi dorminasi dari biji tersebut. Pada

biji-biji tanaman yang memerlukan "stratifikasi" (suhu rendah dan basah) untuk mendorong proses perkecambahan, keberadaan ABA dan GA dapat diikuti selama proses tersebut. Selama proses tersebut konsentrasi ABA dalam biji menurun, sebaliknya konsentrasi GA meningkat. Demikian juga pada mata tunas. Pada awal masa dormansi, kandungan ABA tinggi dan GA rendah. Kemudian pada keadaan "stress" fisik maupun kimia kandungan ABA itu meningkat dan segera turun kembali setelah hilangnya "stress". Pada keadaan "stress air", daun kehilangan turgor dan layu, kandungan ABA meningkat dan stomata menutup. Jika tanaman diberi air, turgor daun menjadi normal kembali dan konsentrasi ABA menurun. Di sini terlihat bahwa ABA terbentuk di dalam daun pada waktu "stress" dan diuraikan dan dinaktifkan sesudah tidak ada "stress" lagi.<sup>57</sup>

Fungsi utama ABA adalah menghambat perkecambahan sebelum waktunya, mempromosikan dormansi dalam biji, mendorong penutupan stomata dan memproduksi molekul yang melindungi sel terhadap pengeringan pada saat tekanan air. ABA juga terlibat dalam respons perkembangan lainnya, termasuk induksi sintesis protein penyimpanan dalam biji, heterofil (daun dengan bentuk berbeda pada tanaman yang sama), inisiasi akar sekunder, pembungaan, dan penuaan.<sup>58</sup>

#### **a. Asam Absisat Mengatur Pertumbuhan dan Perkembangan Embrio serta Germinasi Benih**

Perkembangan embrio dan perkecambahan benih selanjutnya ditandai dengan perubahan dramatis dalam

---

<sup>57</sup>, Fauziyah Harahap, *Fisiologi Tumbuhan: Suatu Pengantar*, hlm. 91

<sup>58</sup> William G. Hopskin and Norman P. A. Horner, *Introduction to Plant Physiology Fourth Edition*, hlm. 355

kadar hormon. Pada sebagian besar biji, kadar sitokinin tertinggi selama tahap awal perkembangan embrio ketika tingkat pembelahan sel juga tertinggi. Ketika tingkat sitokinin menurun dan benih memasuki periode pembesaran sel yang cepat, tingkat GA dan IAA meningkat. Pada tahap awal embriogenesis, ada sedikit atau tidak ada ABA yang terdeteksi. Hanya pada tahap akhir perkembangan embrio, ketika level GA dan IAA mulai menurun, level ABA mulai meningkat. Tingkat ABA umumnya memuncak selama tahap pematangan, ketika volume benih dan berat kering juga mencapai maksimum, dan kemudian kembali ke tingkat yang lebih rendah pada benih kering. Pematangan embrio ditandai oleh berhentinya pertumbuhan embrio, akumulasi cadangan nutrisi dalam endosperma, dan perkembangan toleransi terhadap pengeringan.

Waktu akumulasi ABA yang bertepatan dengan pematangan embrio mencerminkan peran penting yang dimainkan ABA dalam proses pematangan. Salah satu fungsi benih, tentu saja, adalah untuk membubarkan populasi dan memastikan kelangsungan hidup spesies melalui kondisi yang tidak menguntungkan. Sebuah benih akan bernilai kecil jika embrio tidak memasuki dormansi tetapi terus tumbuh dan membangun tanaman baru sebelum penyebaran dapat terjadi. Salah satu fungsi ABA adalah untuk mencegah perkecambah sebelum waktunya, sementara benih masih pada tanaman induk.

Embrio kedelai dapat didorong untuk berkecambah sebelum waktunya melalui perawatan seperti mencuci atau pengeringan lambat, yang keduanya menurunkan tingkat ABA endogen.

Perkecambahan sebelum waktunya akan terjadi ketika konsentrasi ABA berkurang menjadi 3 hingga 4  $\mu\text{g}$  per g berat segar benih, tingkat yang biasanya tidak tercapai sampai tahap akhir pematangan benih.

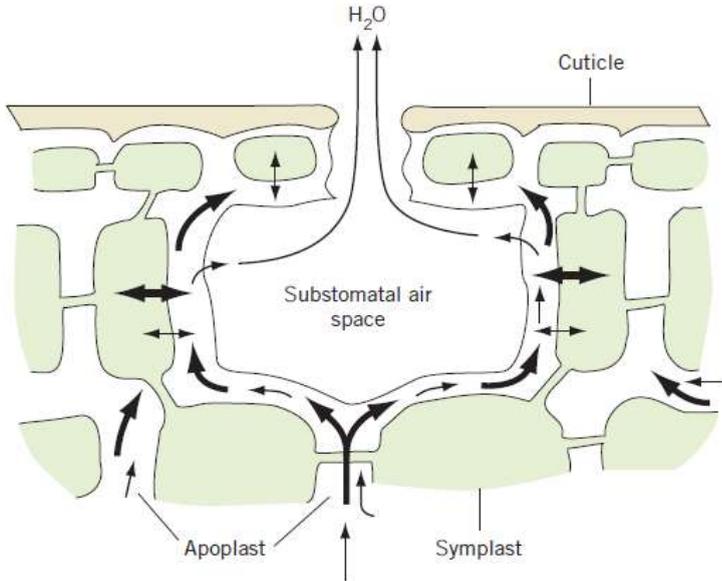
ABA juga menstimulasi akumulasi protein pada tahap akhir pengembangan embrio kedelai dan diketahui mencegah biosintesis  $\alpha$ -amilase yang diinduksi oleh GA dalam biji-bijian sereal. Semua hasil ini membangun hubungan yang kuat antara ABA dan pematangan benih dan atau pencegahan perkecambahan dini.<sup>59</sup>

#### **b. Asam Absisat dalam Merespon Stres Air**

Tanaman umumnya menanggapi defisit air akut dengan menutup stomata mereka agar sesuai dengan kehilangan air transpirasional dari permukaan daun dengan tingkat di mana air dapat disuplai kembali oleh akar. Sejak ditemukannya ABA pada akhir 1960-an, telah diketahui memiliki peran penting dalam penutupan stomata selama tekanan air. Faktanya, ABA telah lama dikenal sebagai antitranspiran karena kemampuannya untuk menginduksi penutupan stomata dan dengan demikian mengurangi kehilangan air melalui transpirasi.

---

<sup>59</sup> *Ibid.*, hlm. 358



**Gambar 9.16.** Gerakan ABA di apoplas (Lincoln Taiz and Eduardo Zeiger, 2002)

Penghambatan transpor elektron dan fotofosforilasi dalam kloroplas akan mengganggu akumulasi proton dalam lumen tilakoid dan menurunkan pH stroma. Pada saat yang sama, ada peningkatan pH apoplas yang mengelilingi sel-sel mesofil. Gradien pH yang dihasilkan merangsang pelepasan ABA dari sel-sel mesofil ke dalam apoplas, di mana ia dapat dibawa dalam aliran transpirasi ke sel-sel penjaga.

Daun layu mengakumulasi ABA dalam jumlah besar. Dalam kebanyakan kasus, bagaimanapun, penutupan stomata dimulai sebelum ada peningkatan konsentrasi ABA yang signifikan. Hal ini dapat dijelaskan dengan pelepasan ABA yang disimpan ke

dalam apoplas, yang terjadi cukup awal dan dalam jumlah yang cukup, konsentrasi apoplas setidaknya akan berlipat ganda untuk menjelaskan penutupan awal. Sintesis ABA yang meningkat mengikuti dan berfungsi untuk memperpanjang efek penutupan.

Penutupan stomata tidak selalu bergantung pada persepsi kekurangan air dan sinyal yang muncul di dalam daun. Dalam beberapa kasus tampak bahwa stomata menutup sebagai respons terhadap pengeringan tanah jauh sebelum ada pengurangan turgor yang terukur dalam sel mesofil daun.<sup>60</sup>

### **c. Respon Asam Absisat Lainnya**

Ada pendapat yang menyatakan bahwa ABA juga memiliki peran dalam perkembangan akar lateral atau sekunder. Inisiasi dan pengembangan akar lateral diketahui terutama di bawah kendali auksin, tetapi perkembangan akar lateral dapat dihambat oleh ABA jika hormon diterapkan selama tahap awal perkembangan akar lateral, sebelum meristem akar lateral menjadi terorganisir.

Mutan *Arabidopsis* yang kekurangan ABA menghasilkan bunga agak lebih awal daripada tanaman *wildtype*. Pengamatan ini menunjukkan bahwa ABA endogen biasanya dapat menghambat atau menunda pembungaan di *Arabidopsis*. Dukungan lebih lanjut datang dari penemuan bahwa gen (FCA) yang sebelumnya diketahui terlibat dalam mengendalikan waktu berbunga juga memiliki sifat reseptor asam absisat.

---

<sup>60</sup> *Ibid.*, hlm. 359

**C. Soal Latihan**

1. Jelaskan definisi hormon!
2. Jelaskan perbedaan antara hormon dengan zat pengatur tumbuh!
3. Sebutkan macam-macam hormon pada tumbuhan!
4. Sebutkan jenis hormon yang berperan dalam perkecambahan biji!
5. Jelaskan kerja antagonis auksin dan sitokinin dalam peristiwa dominansi apikal!

**Tugas!**

Lengkapilah tabel di bawah ini!

No.	Jenis Hormon	Struktur Kimia	Fungsi

## BAB X

# FOTOMORFOGENESIS

---

---

### A. Pengertian Fotomorfogenesis

Fotomorfogenesis adalah pengendalian morfogenesis (perkembangan struktur tubuh) oleh cahaya. Pada tumbuhan, fotomorfogenesis merupakan salah satu mekanisme perkembangan struktur tumbuhan yang dipengaruhi oleh cahaya. Pada peristiwa ini, tumbuhan menyerap cahaya melalui reseptor cahaya. Setelah itu, cahaya yang telah diserap turut serta dalam mengendalikan perkembangan tumbuhan (morfogenesis). Ada beberapa macam reseptor cahaya, yaitu fitokrom, kriptokrom, penerima cahaya UV-B, dan protoklorofilid a. Fitokrom dan protoklorofilid a merupakan reseptor yang bertugas menyerap cahaya merah dan biru, kriptokrom hanya bertugas menyerap cahaya biru, sedangkan penerima cahaya UV-B menyerap radiasi ultraviolet.

Fitokrom adalah reseptor cahaya, suatu pigmen yang digunakan oleh tumbuhan untuk menyerap atau mendeteksi cahaya. Sebagai sensor, fitokrom terangsang oleh cahaya merah dan infra merah. Cahaya infra merah memiliki panjang gelombang yang lebih besar daripada cahaya merah.

Fitokrom ditemukan pada semua tumbuhan. Molekul yang serupa juga ditemukan pada bakteri. Tumbuhan menggunakan fitokrom untuk mengatur beberapa aspek fisiologi adaptasi terhadap lingkungan seperti fotoperiodisme (pengaturan saat berbunga pada tumbuhan), perkecambahan, pemanjangan dan pertumbuhan kecambah (khususnya pada tanaman dikotil), morfologi daun, pemanjangan ruas batang, serta pembuatan (sintesis) klorofil. Berdasarkan struktur kimianya, bagian sensor fitokrom adalah suatu kromofor dari kelompok bilin (disebut fitokromobilin) yang masih sekeluarga dengan klorofil atau hemoglobin. Kromofor ini dilindungi atau diikat oleh apoprotein, yang juga berpengaruh terhadap kinerja bagian sensor. Kromofor dan apoprotein inilah yang secara bersama-sama disebut sebagai fitokrom.

## **B. Penemuan dan Sejarah Fitokrom**

Fitokrom adalah pigmen protein berwarna biru dengan massa molekul sebesar 125 kDa (Taiz and Zeiger, hal 377). Petunjuk pertama tentang peran fitokrom dalam pengembangan tanaman berasal dari studi yang dimulai pada 1930-an pada respon morfogenik yang diinduksi lampu merah, terutama pada perkecambahan biji. Daftar respon semacam itu sekarang sangat besar dan mencakup satu atau lebih pada setiap tahap dalam sejarah kehidupan berbagai tanaman hijau yang berbeda.

Penelitian rintisan terhadap pengaruh cahaya merah dan cahaya merah jauh terhadap pertumbuhan tumbuhan antara 1940-1960 dilakukan oleh Sterling Hendricks dan Harry Borthwick dari pusat Penelitian Pertanian Beltsville di Maryland, menggunakan spektograf dari bahan-bahan sisa perang dunia kedua. Dari hasil penelitian diketahui bahwa cahaya merah memacu perkecambahan dan memicu

pembungaan. Lebih lanjut, cahaya merah jauh berpengaruh terbalik terhadap pengaruh cahaya merah. Penelitian lanjutan menunjukkan bahwa bagian yang peka terhadap rangsang cahaya ini berada di daun.

Penelitian awal oleh para penemu fitokrom dan peneliti-peneliti lain menunjukkan bahwa Pfr khususnya, bekerja dengan cara mengubah permeabilitas membran dan bahwa respon fotomorfogenetik adalah akibat perubahan. Penelitian selanjutnya menegaskan bahwa pada beberapa sel dari beberapa spesies terjadi respon yang cepat (beberapa detik sampai dengan beberapa menit), bukan hanya terhadap Pfr, tetapi juga terhadap kriptokrom yang diaktifkan cahaya biru. Salah satu efek Pfr yang paling cepat ternyata terjadi pada potongan ujung akar jelai dan kacang hijau, oleh karena itu fenomena ini dinamakan efek Tanada. Efek Tanada adalah sebagai berikut, apabila potongan ujung akar jelai dicampur dalam gelas piala dengan IAA atau ATP dan beberapa garam mineral +++, maka perlakuan singkat dengan cahaya merah akan menyebabkan potongan akar tersebut menempel pada dinding gelas dalam waktu beberapa detik. Dalam hal ini dinding gelas memunyai muatan yang agak negatif (sebab gelas tersebut telah dicuci dengan larutan fosfat encer) yang berarti ujung akar yang diberi perlakuan cahaya merah menjadi bermuatan sedikit positif (barangkali karena adanya perpindahan  $H^+$  dari sitosol ke dinding sel oleh ATPase di membran plasma. Selanjutnya perlakuan singkat dengan cahaya merah jauh dengan cepat menurunkan muatan positif pada ujung akar dan menyebabkan terlepas dari dinding gelas. Fitokrom yang menyebabkan respon ini terletak di tudung akar. Pada tahun 1955 Hideo Toriyama dan Tariyama, 1962 mengamati pulvinus pada putri malu (*Mimosa pudica*) dan menemukan bahwa ion  $K^+$  bergerak keluar dari sel yang kehilangan air. Kemudian penelitian lain

menemukan bahwa konsentrasi  $K^+$  pada pulvinus *Albizzia* sangat tinggi dan menutupnya anak daun disertai kehilangan ion  $K^+$ . Perubahan serupa pernah terlihat pada *Sammanea*. Jadi pada *Mimosa*, *Albizzia*, dan *Sammanea* pergerakan air terjadi sebagai responnya terhadap gaya penggerak osmotik pengangkutan ion, persis seperti pada pembukaan dan penutupan stomata. Sebuah terobosan kunci dalam sejarah fitokrom adalah penemuan bahwa efek lampu merah (650-680 nm) pada morfogenesis dapat dibalik dengan iradiasi. Berikutnya cahaya dengan panjang gelombang yang lebih panjang (710-740 nm) disebut lampu merah jauh. Fenomena ini pertama kali ditunjukkan pada biji yang berkecambah, tetapi juga diamati dalam kaitannya dengan pertumbuhan batang dan daun, serta induksi bunga. Pengamatan awal bahwa perkecambahan biji selada dirangsang oleh lampu merah dan dihambat oleh lampu merah jauh. Tapi terobosan nyata dibuat bertahun-tahun kemudian ketika biji selada terkena pengobatan bergantian lampu merah dan merah jauh. Hampir 100% dari biji yang menerima lampu merah saat perawatan akhir, berkecambah. Sedangkan pada biji yang menerima cahaya merah jauh sebagai pengobatan terakhir, perkecambahannya sangat dihambat. Dua interpretasi hasil ini dimungkinkan bahwa ada dua pigmen, pigmen penyerap lampu merah dan pigmen penyerap lampu merah jauh, serta dua pigmen bertindak antagonis dalam regulasi perkecambahan biji. Sebagai alternatif, mungkin ada pigmen tunggal dalam dua bentuk yang dapat ditukar yaitu bentuk penyerap cahaya merah dan bentuk penyerap cahaya merah jauh.

Model yang dipilih, yaitu model satu pigmen, adalah yang lebih radikal dari keduanya karena tidak ada preseden untuk pigmen yang dapat dipulihkan seperti itu. Beberapa tahun kemudian fitokrom didemonstrasikan dalam ekstrak

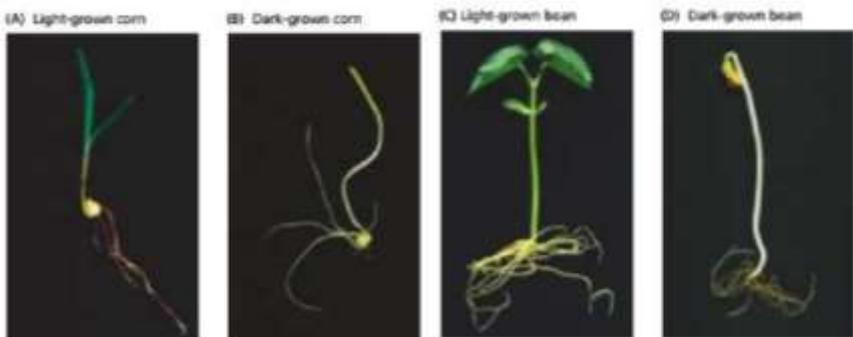
tumbuhan untuk pertama kalinya, dan sifat fotoreversibelnya yang unik diperlihatkan secara *in vitro* (Butler et al. 1959).

### C. Sifat Fisika dan Kimia Fitokrom

Fitokrom merupakan homodimer dari dua polipeptida yang identik dan masing-masing memiliki bobot molekul 120 kDa. Masing-masing polipeptida memiliki gugus prostetik yang disebut dengan kromofor. Kromofor adalah tetrapirrol rantai terbuka. Kromofor inilah yang berperan dalam penyerapan cahaya pada fitokrom. Berdasarkan sifat kimianya, fitokrom memiliki dua tipe, yaitu tipe 1 dan tipe 2. Perbedaan fitokrom tipe 1 dan 2 dapat dilihat pada tabel berikut.

**Tabel 10.1.** Perbandingan fitokrom tipe 1 dan 2

<b>Fitokrom tipe 1</b>	<b>Fitokrom tipe 2</b>
Terdapat pada kecambah teretiologi	Terdapat pada tumbuhan hijau dan biji
Serapan maksimum Pr 666 nm	Serapan maksimum Pr 654 nm

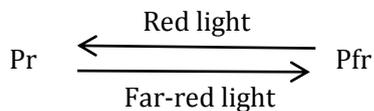


**Gambar 10.1.** Perbedaan kecambah dalam tempat terang dan gelap (Lincoln Taiz dan Eduardo Zeiger, 2002).

**a. Fitokrom dapat Berinteraksi antara Bentuk Pr dan Pfr**

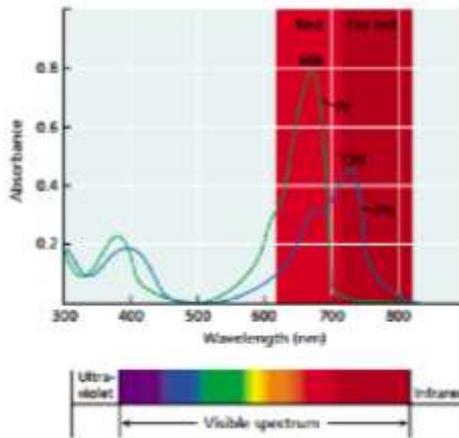
Pada tanaman yang tumbuh gelap atau teretiolasi, terdapat fitokrom dalam bentuk penyerap cahaya merah, disebut sebagai Pr karena disintesis dalam bentuk ini. Pr bagi mata manusia berwarna biru, dikonversi oleh cahaya merah menjadi bentuk penyerap cahaya merah-jauh yang disebut Pfr yang berwarna biru-hijau.

Pfr pada gilirannya, dapat dikonversi kembali ke Pr dengan lampu merah jauh. Dikenal sebagai fotoreversibilitas, properti konversi atau pengubahan ini adalah properti fitokrom yang paling khas, dan dapat dinyatakan dalam bentuk singkat sebagai berikut:



Interkonversi bentuk Pr dan Pfr dapat diukur secara *in vivo* atau *in vitro*. Faktanya, sebagian besar sifat spektral fitokrom yang dimurnikan lalu diukur secara *in vitro* adalah sama dengan yang diamati secara *in vivo*. Ketika molekul Pr terpapar ke lampu merah, sebagian besar dari mereka menyerapnya dan dikonversi ke Pfr, tetapi beberapa Pfr juga menyerap lampu merah dan dikonversi kembali ke Pr, karena Pr dan Pfr menyerap cahaya merah. Dengan demikian proporsi fitokrom dalam bentuk Pfr setelah penyinaran jenuh oleh lampu merah hanya sekitar 85%. Demikian pula, jumlah yang sangat kecil dari lampu merah-jauh yang diserap oleh Pr membuatnya tidak mungkin untuk mengubah Pfr sepenuhnya menjadi Pr oleh spektrum cahaya merah-jauh yang luas. Sebagai gantinya, tercapai keseimbangan 97% Pr dan 3% Pfr. Keseimbangan ini disebut sebagai kondisi fotostasioner. Selain menyerap

cahaya merah, kedua bentuk fitokrom menyerap cahaya di wilayah spektrum biru. Oleh karena itu, efek fitokrom dapat ditimbulkan juga oleh cahaya biru, yang dapat mengkonversi Pr ke Pfr dan sebaliknya. Respon cahaya biru juga dapat dihasilkan dari aksi satu atau lebih fotoreseptor cahaya biru tertentu. Fitokrom terlibat dalam respon terhadap cahaya biru, sering ditentukan oleh tes kemampuan cahaya merah jauh untuk membalikkan respon, karena hanya respon yang diinduksi fitokrom dibalik oleh cahaya merah jauh. Cara lain untuk membedakan antara fotoreseptor adalah dengan mempelajari mutan yang kurang di salah satu fotoreseptor.



**Gambar 10.2.** Spektra serapan fitokrom gandum murni dalam bentuk Pr (garis hijau) dan Pfr (garis biru) yang tumpang tindih. (Lincoln Taiz dan Eduardo Zeiger, 2002)

Intermediet fitokrom berumur pendek. Konversi cahaya dari Pr ke Pfr dan dari Pfr ke Pr, bukanlah proses satu langkah. Kilatan cahaya yang disinari fitokrom dengan sangat singkat, dapat diamati perubahan penyerapan yang terjadi dalam waktu kurang dari satu milidetik. Tentu saja, sinar matahari termasuk campuran dari semua panjang

gelombang yang terlihat. Dalam kondisi cahaya putih seperti itu, baik Pr dan Pfr bersemangat, dan siklus fitokrom terus menerus terjadi di antara keduanya. Dalam situasi ini, bentuk-bentuk menengah fitokrom terakumulasi dan membentuk sebagian besar dari total fitokrom. Perantara semacam itu bahkan dapat memainkan peran dalam memulai atau memperkuat respon fitokrom di bawah sinar matahari alami, tetapi pertanyaan ini belum diselesaikan.

**b. Pfr adalah Bentuk Fitokrom yang Aktif secara Fisiologis**

Karena respon fitokrom diinduksi oleh lampu merah, secara teori mereka bisa dihasilkan dari kemunculan Pfr atau dari hilangnya Pr. Dalam kebanyakan kasus yang dipelajari, hubungan kuantitatif berlaku antara besarnya respon fisiologis dan jumlah Pfr yang dihasilkan oleh cahaya, tetapi tidak ada hubungan yang terjadi antara respon fisiologis dan hilangnya Pr. Bukti ini telah mengarah pada kesimpulan bahwa Pfr adalah bentuk fitokrom yang aktif secara fisiologis. Dalam kasus di mana telah ditunjukkan bahwa respons fitokrom tidak secara kuantitatif terkait dengan jumlah absolut Pfr, telah diusulkan bahwa rasio antara Pfr dan Pr atau antara Pfr dan jumlah total fitokrom menentukan besarnya tanggapan/ respon. Kesimpulan bahwa Pfr adalah bentuk fitokrom yang aktif secara fisiologis didukung oleh penelitian dengan mutan Arabidopsis yang tidak dapat mensintesis fitokrom. Pada semai tipe liar, pemanjangan hipokotil sangat dihambat oleh cahaya putih, dan fitokrom adalah salah satu fotoreseptor yang terlibat dalam respon ini. Ketika tumbuh di bawah cahaya putih terus menerus, bibit mutan dengan hipokotil panjang ditemukan dan

disebut mutan. Mutan hy yang berbeda ditentukan oleh angka: hy1, hy2, dan sebagainya. Karena cahaya putih adalah campuran beberapa panjang gelombang (termasuk merah, merah jauh, dan biru) tetapi tidak semua dari mutan hy telah terbukti kurang untuk satu atau lebih fitokrom fungsional (s). Fenotip dari mutan yang kekurangan fitokrom telah berguna dalam mengidentifikasi bentuk fitokrom yang aktif secara fisiologis. Jika respon yang diinduksi fitokrom terhadap cahaya putih (penghambatan pertumbuhan hipokotil) disebabkan oleh tidak adanya Pr, mutan yang kekurangan fitokrom tersebut (yang tidak memiliki Pr atau Pfr) harus memiliki hipokotil pendek baik dalam keadaan gelap maupun terang. Sebaliknya, mereka memiliki hipokotil panjang baik dalam gelap maupun terang. Tidak adanya Pfr mencegah bibit merespon cahaya putih. Dengan kata lain, Pfr membawa respon fisiologis.

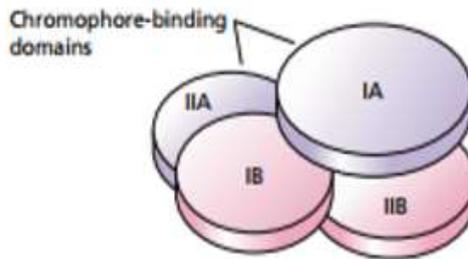
### **c. Fitokrom sebagai Dimer yang Terdiri dari Dua Polipeptida**

Fitokrom asli adalah protein asli dengan massa molekul kurang lebih 250 kilodalton. Secara kimiawi, fitokrom merupakan homodimer dan suatu polipeptida yang masing-masing memiliki gugus prostetik yang disebut kromofor. Dan dalam setiap subunit fitokrom sendiri terdiri dari dua komponen, di antaranya adalah molekul pigmen penyerap cahaya yang disebut kromofor dan rantai polipeptida yang disebut apoprotein. Pada tanaman tinggi, kromofor fitokrom adalah tetrapirrol linier yang akrab disebut fitokromobilin. Dan hanya ada satu kromofor per monomer apoprotein, yang melekat pada protein melalui hubungan thioether dengan residu sistein. Sedangkan apoprotein yang monomernya memiliki

## *Pengantar Fisiologi Tumbuhan*

massa molekul sekitar 125 kilodalton. Selanjutnya apoprotein bersama dengan kromofor membentuk holoprotein.

Para peneliti telah menggambarkan bentuk Pr fitokrom menggunakan mikroskop elektron dan hamburan sinar X, polipeptida terlipat menjadi dua daerah utama yang dipisahkan oleh engsel. Daerah N-terminal yang lebih besar adalah sekitar 70 kilodalton dan mengandung kromofor, daerah C-terminal yang lebih kecil sekitar 55 kilodalton dan berisi tempat kedua monomer saling berhubungan untuk membentuk dimer.

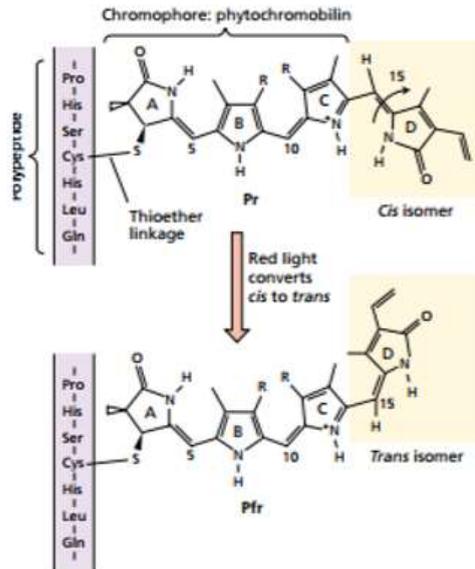


**Gambar 10.3.** Struktur dimer fitokrom. Monomer diberi label I dan II. Setiap monomer terdiri dari domain pengikatan kromofor (A) dan domain nonkromofor yang lebih kecil (B). Molekul secara keseluruhan memiliki bentuk elipsoidal dibandingkan globular (Lincoln Taiz and Eduro Zeiger, 2002)

### **d. Fitokrom disintesis dalam Plastid**

Apoprotein fitokrom saja tidak dapat menyerap cahaya merah atau merah jauh. Cahaya dapat diserap hanya ketika polipeptida secara kovalen terkait dengan fitokromobilin untuk membentuk holoprotein. Pr dan Pfr dapat menyerap cahaya tetapi pada tingkat dan radiasi yang rendah tidak mampu membentuk respon fisiologis. Fitokromobilin disintesis dalam bentuk plastid yang berasal dari asam 5 aminolevulinik melalui jalur

bercabang dari biosintesis klorofil yang diperkirakan bocor dari plastid ke dalam sitosol melalui proses pasif. Perakitan apoprotein fitokrom dengan kromofornya bersifat autokatalitik yaitu terjadi secara spontan ketika polipeptida fitokrom murni dicampur dengan kromofor murni dan berisi tempat kedua monomer yang saling berhubungan untuk membentuk dimer tabung reaksi, tanpa protein atau kofaktor tambahan. Holoprotein yang dihasilkan memiliki sifat spektral yang mirip dengan yang diamati untuk holoprotein yang dimurnikan dari tanaman, dan menunjukkan reversibilitas merah atau merah jauh.



**Gambar 10.4.** Struktur bentuk Pr dan Pfr dari kromofor (fitokromobilin) dan daerah peptida terikat ke kromofor melalui hubungan thioether.

Kromofor mengalami isomerisasi cis-trans pada karbon 15 merespon terhadap cahaya merah dan merah jauh (Sumber: Introduction to Plant Physiology, 2008). Tumbuhan mutan yang tidak memiliki kemampuan untuk

mensintesis kromofor cacat dalam proses yang memerlukan peran fitokrom, meskipun di dalamnya terdapat polipeptida apoprotein. Misalnya seperti beberapa mutan *hy* yang disebutkan sebelumnya, dimana cahaya putih gagal menekan perpanjangan hipokotil, sehingga memiliki cacat dalam biosintesis kromofor. Pada tanaman mutan *hy* 1 dan *hy* 2, kadar fitokrom apoprotein normal, namun ada sedikit bahkan tidak ada holoprotein yang aktif secara spektral. Ketika prekursor kromofor didistribusi ke bibit ini, pertumbuhan normal dipulihkan. Jenis mutasi yang diamati dari spesies lain, sebagai contoh, mutan kuning-hijau tomat memiliki sifat yang mirip dengan mutan *hy*, yang menunjukkan bahwa dia juga merupakan mutan kromofor. Kromofor dan protein mengalami perubahan konformasi. Karena kromofor menyerap cahaya, perubahan konformasi pada protein dimulai dari kromofor. Setelah penyerapan cahaya, Pr kromofor mengalami isomerisasi *cis-trans* dari ikatan rangkap antara karbon 15 dan 16 dan rotasi C14-C15. Selama konversi Pr ke Pfr, bagian protein dari fitokrom holoprotein I nya juga mengalami perubahan konformasi yang halus. Beberapa baris bukti yang menunjukkan bahwa perubahan yang diinduksi cahaya pada konformasi polipeptida terjadi dalam domain pengikatan kromofor terminal-N dan di daerah terminal-C dari protein.

Fitokrom paling banyak terdapat pada bibit yang terisolasi, demikian besar studi biokimia telah dilakukan pada fitokrom yang dimurnikan dari jaringan tidak hijau. Sangat sedikit fitokrom yang dapat diekstraksi dari jaringan hijau, dan sebagian dari fitokrom yang dapat diekstraksi berbeda dalam massamolekuler dari bentuk fitokrom yang berlimpah yang ditemukan pada tanaman yang diisolasi.

Penelitian telah menunjukkan bahwa ada dua kelas fitokrom yang berbeda dengan sifat yang berbeda yang disebut fitokrom Tipe I dan Tipe II. Tipe I kira-kira sembilan kali lebih banyak dari Tipe II pada bibit kacang hijau tua, sedangkan pada bibit kacang hijau muda jumlah kedua jenisnya hampir sama. Baru-baru ini, kedua jenis ini telah terbukti sebagai protein yang berbeda.

**e. Fitokrom dikodekan oleh Keluarga Multigen**

Kloning gen fitokrom memungkinkan untuk melakukan perbandingan terperinci dari urutan asam amino dari protein terkait. Hal ini juga memungkinkan studi pola ekspresi mereka, baik pada tingkat mRNA maupun protein. Urutan fitokrom pertama yang dikloning berasal dari monokotil. Penelitian selanjutnya menunjukkan bahwa fitokrom adalah protein yang larut. Sebuah temuan yang konsisten dengan studi pemurnian sebelumnya. Klon pengkode pelengkap DNA digunakan untuk mengidentifikasi lima gen fitokrom yang terkait secara struktural di Arabidopsis. Keluarga gen fitokrom ini bernama PHY, dengan lima anggota individu antara lain PHYA, PHYB, PHYC, PHYD, dan PHYE. Apoprotein tanpa kromofor ditetapkan sebagai PHY, holoprotein dengan kromofor disebut PHY. Secara konvensional urutan fitokrom dari tanaman tingkat tinggi lainnya yang dinamai sesuai dengan homologinya dengan gen PHY Arabidopsis. Monokotil hanya memiliki perwakilan PHYA dari keluarga PHYC, sementara dikotil memiliki keturunan lain yang berasal dari duplikasi gen. Beberapa mutan *hy* ternyata kurang selektif dalam fitokrom spesifik. Misalnya, *hy3* kekurangan *phyB*, dan *hy1* dan *hy2* kekurangan kromofor. Mutan *phy* dan yang lain ini telah digunakan untuk menentukan fungsi fisiologis dari berbagai fitokrom. Gen

PHY mengkodekan dua jenis fitokrom atas dasar pola ekspresi mereka, produk anggota keluarga gen PHY dapat diklasifikasikan sebagai fitokrom Tipe I atau Tipe II. PHYA adalah satu-satunya gen yang mengkodekan fitokrom Tipe I. Kesimpulan ini didasarkan pada pola ekspresi promotor PHYA (disebut alel *phyA*) telah mengkonfirmasi kesimpulan ini dan telah memberikan beberapa petunjuk tentang peran fitokrom ini di seluruh tanaman. Gen PHYA aktif secara transkripsi dalam bibit yang tumbuh gelap, tetapi ekspresinya sangat terhambat dalam cahaya pada monokotil. Pada dewasa, pengobatan dengan lampu merah mengurangi sintesis fitokrom karena bentuk Pfr dari fitokrom menghambat ekspresi gennya sendiri. mRNA PHYA tidak stabil, jadi setelah diisolasi bibit gandum dipindahkan ke cahaya, PHYA mRNA dengan cepat menghilang. Efek penghambatan cahaya pada transkripsi PHYA kurang dramatis pada dikotil, dan pada Arabidopsis, lampu merah tidak memiliki efek terukur pada PHYA.

Jumlah PHYA dalam sel juga diatur oleh penghancuran protein. Bentuk Pfr dari protein yang dikodekan oleh gen PHYA, yang disebut PfrA, tidak stabil. Ada bukti bahwa PfrA dapat ditandai untuk dihancurkan oleh sistem ubiquitin. Ubiquitin adalah polipeptida kecil yang berikatan kovalen protein yang berfungsi sebagai situs pengenalan untuk kompleks proteolitik besar, proteasom. Oleh karena itu, oat dan monocot lainnya dengan cepat kehilangan sebagian besar fitokrom Tipe I (PHYA) akibat cahaya dari kombinasi faktor penghambatan transkripsi, degradasi mRNA dan proteolisis. Dalam dikotil kadar PHYA juga menurun dalam cahaya sebagai akibat proteolisis, tetapi tidak secara dramatis. Gen PHY yang tersisa (PHYB melalui PHYE)

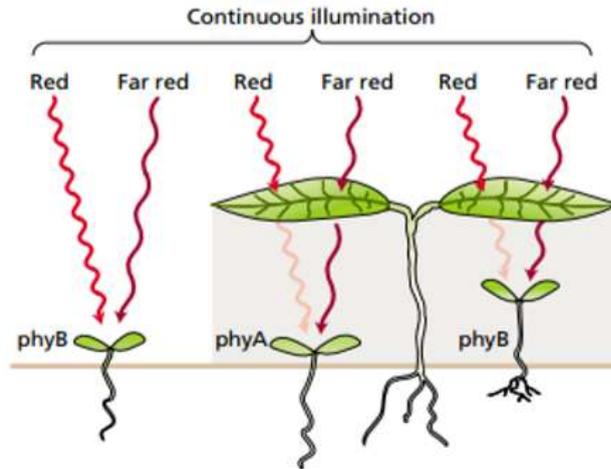
mengkodekan fitokrom Tipe II. Meskipun terdeteksi pada tanaman hijau, fitokrom juga ada pada tanaman yang mengalami etiolasi. Alasannya adalah bahwa ekspresi mRNA mereka tidak berubah secara signifikan oleh cahaya, dan PHYB yang dikodekan melalui protein PHYB yang dikodekan melalui protein PHYE lebih stabil dalam bentuk Pfr dari pada PfrA.

#### **D. Spesialisasi Fitokrom**

Fitokrom adalah salah satu pigmen unik yang bekerja pada dua sinar, yaitu sinar merah dan sinar merah jauh. Fitokrom dibagi menjadi 5 jenis tetapi masih dalam satu gen yang sama, yaitu phyA, phyB, phyC, phyD, phyE. Perbedaan dari masing-masing fitokrom tersebut berada pada protein yang dikandungnya. Fitokrom A dan B memiliki protein yang lebih kompleks sehingga memiliki peran yang lebih besar. Meskipun ada kesamaan dalam strukturnya, tetapi masing-masing fitokrom ini memiliki peran yang berbeda-beda dalam kehidupan tanaman.

##### **1. Fitokrom A**

Fitokrom A diperlukan untuk respon terhadap sinar Far-Red lanjutan. Fitokrom A menjadi foto reseptor yang terlibat dalam persepsi sinar merah jauh yang datang secara terus menerus, seperti fluence HIRs. PhyA memiliki peran terbatas dalam fotomorfogenesis terutama pada fase de etiolasi dan merespon sinar merah jauh. PhyA juga berperan dalam proses perkecambahan biji yang tumbuh di bawah naungan kanopi yang menyerap sebagian besar cahaya merah yang dibutuhkan oleh tumbuhan.



**Gambar 10.5.** Peran antagonis antara fitokrom A dan fitokrom B (Lincoln Taiz and Eduro Zeiger, 2002)

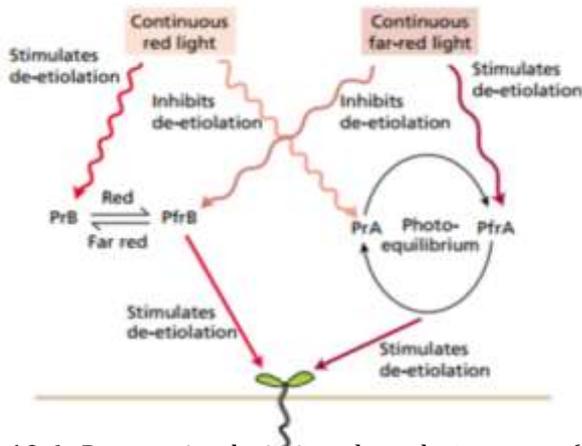
## 2. Fitokrom B

Fitokrom B berfungsi untuk memediasi sinar merah dan sinar putih lanjutan. Pertama kali diduga berperan dalam respon cahaya kontinyu karena mutan. Pada tumbuhan hipokotil yang terpapar sinar putih lanjutan ditemukan perubahan gen PHYB. Gen PHYB mRNA dan protein phyB ditemukan disangat sedikit hampir tidak ada. Sebaliknya, kadar PHYA mRNA dan protein phyA ditemukan dalam keadaan normal. Fitokrom B berfungsi untuk mengatur perkecambahan biji, dan bekerja dalam mekanisme menghindari naungan dengan mengatur panjang hipokotil sebagai respon dari kekurangan sinar merah secara terus menerus, sebaliknya, phyB mutan tidak dapat merespon tanggapan tanggapan seperti yang dijalankan oleh fitokrom B. PhyB tidak mampu menghindari naungan dengan meningkatkan ekstensi hipokotil, dan tidak dapat merespon sinar merah jauh yang diberikan pada setiap akhir fase. PhyB memiliki sedikit

klorofil dan dalam mRNA ikut dalam pengkodean protein kloroplas. Mutan yang kekurangan phyB cenderung untuk tidak dapat merespon cahaya dengan fluorecence yang rendah. Hal ini membuktikan bahwa phyB juga berperan dalam proses perkecambahan biji dan dapat dipulihkan.

### 3. Pengembangan untuk Fitokrom C, D, dan E

Fitokrom C, D, dan E memiliki fungsi yang tumpang tindih dengan fitokrom A dan B. Seperti pada mekanisme menghindari naungan yang dilakukan oleh fitokrom B, fitokrom D dan E berfungsi untuk membantu fitokrom B dalam menjalankan tugasnya. Fitokrom D juga membantu fitokrom B dalam mengatur proses pemanjangan tangkai daun dan fase pembungaan, sedangkan fitokrom E membantu fitokrom A dan B untuk menghambat perpanjangan internodus. Intinya, fitokrom C, fitokrom D dan fitokrom E bekerja hanya membantu dari fitokrom A dan B agar menghasilkan hasil akhir yang optimal. Selama fitokrom B terlibat dalam hampir semua proses perkembangan, fungsi fitokrom yang lain dibatasi oleh respon perkembangan yang spesifik.



**Gambar 10.6.** Proses simulasi sinar kapada tanaman (Lincoln Taiz and Eduro Zeiger, 2002)

## **E. Lokasi Fitokrom**

Fitokrom dapat ditemukan pada berbagai macam tumbuhan, yaitu angiospermae, gimnospermae, beberapa jenis lumut, dan paku-pakuan. Pada organ tumbuhan, fitokrom dapat ditemukan di akar.

## **F. Respon Fitokrom Terhadap Tanaman**

Tanggapan fitokrom dapat dibedakan melalui jumlah cahaya yang diperlukan untuk menginduksi tumbuhan. Jumlah cahaya disebut fluence, yang didefinisikan sebagai jumlah foton yang menimpa area permukaan per unit. Unit yang paling umum digunakan untuk fluence adalah mol kuantum per meter persegi ( $\text{mol m}^{-2}$ ). Selain jumlah cahaya, fitokrom juga sensitif terhadap radiasi. Satuan penyinaran dalam foton adalah mol kuantum per meter persegi per detik ( $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). Berdasarkan kekuatannya, cahaya (fluence) dapat dibedakan menjadi tiga kelompok, yaitu:

### **1. *Low Fluence Respons (LFR)***

*Low Fluence Respons (LFR)* dirangsang oleh cahaya yang memiliki dosis kira-kira  $1 \mu \text{ mole m}$  hingga  $1000 \mu \text{ mole m}$ . Setara dengan sekitar 0,1 detik paparan di bawah kanopi tanaman lebat di ujung bawah dan sekitar satu detik dari siang hari penuh di ujung atas.

### **2. *Very Low Fluence Respon (VLFR)***

*Very Low Fluence Respon (VLFR)* dirangsang oleh tingkat cahaya pada kisaran  $10^{-6}$  hingga  $10^{-3} \mu \text{mole}$  atau sebanding dengan cahaya yang dihasilkan oleh kunang-kunang. Sinar ini dapat merubah atau bahkan tidak merubah sama sekali fitokrom yang terkandung di dalam tanaman. Jumlah waktu yang diperlukan untuk menginduksi VLFR fitokrom menjadi Pfr kurang dari

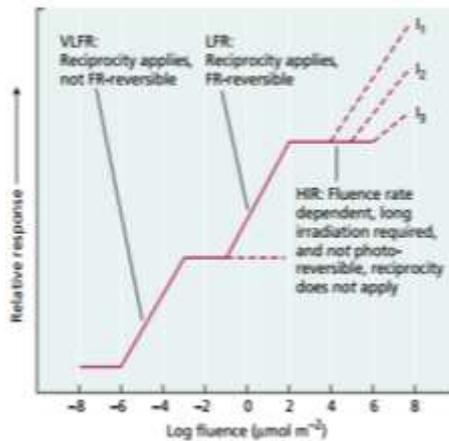
0,02%. Karena sinar merah jauh yang biasanya dibutuhkan 97% sinar untuk membalikkan efek sinar merah mengubah Pfr menjadi Pr, sekitar 3% fitokrom tetap disimpan sebagai Pfr. LFR maupun VLFR masih dapat mempengaruhi kerja dari fitokrom apabila jumlah fluence yang terakumulasi sudah dirasa cukup untuk memberikan sinyal kepada tanaman, maka semakin rendah kekuatan cahaya, maka akan semakin lama juga waktu yang dibutuhkan untuk mengaktifkan rangsangan pada tumbuhan. Hal ini disebut dengan hukum timbal balik. Baik LFR maupun VLFR menggunakan hukum timbal balik tersebut.

### **3. *Respons Highirradiance (HIRs)***

*Respons Highirradiance (HIRs)* membutuhkan pemaparan yang berkepanjangan atau berkelanjutan untuk cahaya radiasi relatif tinggi, dan responsnya adalah sebanding dengan penyinaran dalam kisaran tertentu. Secara umum, HIR memiliki karakteristik khusus di antaranya: a) Ekspresi penuh dan respon memerlukan penyinaran dengan waktu yang lama dan konsentrasi sinar merah yang cukup tinggi. b) Besarnya respon sebanding dengan tingkat durasi penyinaran, c) HIR lebih berwarna daripada VLFR. HIR telah terlibat dalam berbagai respon yang juga memenuhi syarat sebagai LFR, termasuk pertumbuhan batang, ekspansi daun, dan perkecambahan biji. Namun, HIR dapat menunjukkan spektrum aksi yang sangat berbeda tergantung pada spesies atau kondisi pertumbuhan.

Studi genetik yang melibatkan mutan fitokrom di *Arabidopsis* telah mengidentifikasi bahwa *phyA* bertanggung jawab atas tanggapan HIR dan VLFR.

Sedangkan FR-sensitif dan phyB bertanggung jawab untuk LFR dan HIR merah.



**Gambar 10.7.** Diagram tanggapan kekuatan cahaya

Fotomorfogenesis merupakan kemampuan tanaman untuk menafsirkan informasi melalui cahaya yang ditangkap oleh fotoreseptor. Fotoreseptor akan membaca informasi yang terkandung oleh sinar tertentu, yang dapat menginduksi perubahan pigmen, reaksi reduksi oksidasi fotokimia dan perubahan perubahan fotokimia yang lain. Kromoprotein pada tanaman dibagi menjadi 4 kelas, yaitu:

**1. Fitokrom Khusus menyerap sinar merah (red/ 660 nm) dan sinar merah jauh (far red/ 735 nm)**

Fitokrom memiliki peran hampir dalam setiap tahapan perkembangan biji mulai dari tahap perkecambahan sampai tahap berbunga. Fitokrom terlokalisasi di sitoplasma, tetapi pada beberapa kasus fitokrom dapat berpindah tempat ke dalam nukleus melalui bantuan cahaya.

**2. Kriptokrom Menyerap sinar biru (400-450 nm) dan sinar UVA (320-400 nm)**

Kriptokrom berperan selama proses awal pembibitan biji dan proses pembungaan.

### **3. Penerima cahaya UV-B**

Satu atau beberapa senyawa tak dikenal secara teknis bukan pigmen yang menyerap radiasi ultra violet antara 280-320 nm.

### **4. Fototropin**

Fototropin bekerja sama dengan kriptokrom untuk memediasi respon fototropisme. Fototropin bekerja penting dalam proses membuka dan menutupnya stomata dan pergerakan tanaman.

Fitokrom, kriptokrom, fototropin dan penerima cahaya UVB tersebut dinamakan kromoprotein, kromoprotein sendiri terdiri dari beberapa kromofor. Fitokrom berperan sebagai fotodektator terhadap tanaman apakah terdapat cahaya atau tidak. Fitokrom juga akan memberikan informasi kepada tumbuhan tentang kualitas cahaya yang ditangkap, apakah cahaya tersebut cukup untuk melakukan pekecambahan, pemanjangan batang, pertumbuhan daun dan kegiatan pertumbuhan lainnya. Fitokrom dan kriptokrom bekerja sama untuk mengatur respon dari tumbuhan, respon tersebut di antaranya:

#### **1. Germinasi benih (Perkecambahan)**

Germinasi atau perkecambahan sedikit banyak dipengaruhi oleh cahaya. Beberapa biji memerlukan cahaya untuk berkecambah atau dikenal dengan fotoblastik positif seperti *Latuca sativa*, sedangkan beberapa tumbuhan memerlukan sedikit cahaya atau bahkan tidak memerlukan sama sekali disebut

fotoblastik negatif seperti *Bromus* sp. Tetapi pemberian cahaya ini hanya akan bereaksi pada biji dalam keadaan basah. Pemberian cahaya kepada biji kering tidak akan memberikan dampak apapun. Perbedaan kebutuhan cahaya tersebut juga menyebabkan berbedanya perlakuan ketika menanam biji. Untuk tanaman fotoblastik positif yang memerlukan banyak cahaya, menanam terlalu jauh ke dalam tanah dapat menghambat cahaya yang akan masuk ke dalam biji. Fitokrom akan mendeteksi adanya kekurangan cahaya dan mengirimkan sinyal kepada biji, dan fitokrom tidak akan aktif karena terlalu sedikitnya cahaya merah yang diterima dan biji akan gagal berkecambah. Fitokrom yang diaktifkan menjadi sinar merah jauh akan mengaktifkan enzim-enzim yang dapat memecahkan kulit biji yang keras sehingga proses perkecambahan atau germinasi dapat dilakukan.

## **2. De etiolasi**

Etiolasi merupakan kondisi dimana tumbuhan akan mengalami pertumbuhan lebih cepat ketika berada di tempat yang gelap. Seperti saat melakukan praktikum penyemaian biji kacang hijau, biji yang diletakkan di tempat yang tidak terkena cahaya matahari akan cenderung memiliki batang yang lebih panjang tetapi tidak kokoh akibat banyaknya kandungan air yang terserap ke dalam batang, daun tumbuh kecil-kecil dan tampak menguning dan kurang sehat. Hal tersebut terjadi akibat kerja hormon auksin yang bekerja secara maksimal. Sedangkan istilah de etiolasi merupakan kebalikan dari etiolasi, yaitu keadaan dimana terjadi perubahan fisiologis pada tumbuhan sebagai respon dari adanya rangsangan

cahaya. Biasanya persiapan tersebut digunakan untuk melakukan fotosintesis yang pertama kali. De etiolasi dipengaruhi oleh kinerja fitokrom A dan B dan juga kriptokrom.

### **3. Sindrom menghindari naungan**

Tumbuhan memerlukan cahaya untuk melakukan fotosintesis, sedangkan tidak semua tanaman dapat hidup dan tumbuh di tempat strategis yang memiliki jumlah sinar matahari yang cukup. Beberapa tanaman juga bisa saja tumbuh di daerah yang kurang cahaya. Tanaman yang kekurangan jumlah sinar matahari cenderung untuk melakukan 2 perilaku berikut untuk mendapatkan cahaya matahari yang cukup,

- a. Menyesuaikan tempat pemanen cahaya dengan cara meningkatkan luas klorofil a dan b
- b. Menyesuaikan morfologi mereka, tumbuhan cenderung akan melakukan pemanjangan organ seperti batang, orintasi daun lebih ke atas (hiponasti), mengurangi percabangan, dan mengurangi anakan.

Tumbuhan yang hidup di bawah naungan kanopi cenderung untuk kekurangan cahaya merah dan cahaya biru, karena cahaya yang datang akan lebih banyak diserap oleh tumbuhan di atasnya, sedangkan klorofil kurang kuat untuk menangkap sinar merah jauh. Maka dalam hal ini tumbuhan akan menggunakan fitokrom B, D, dan E dan kriptokrom untuk mendeteksi perbedaan karakteristik sinar.

### **4. Mendeteksi kurangnya sinar akibat pergantian waktu**

Sinar yang dipancarkan oleh matahari tidak selamanya berada dalam keadaan konstan, tetapi terdapat suatu periode yang membuat menurunnya signifikasi distribusi energi cahaya, seperti pada saat subuh dan sore hari. Dalam sebuah studi dijelaskan bahwa fluence saat sore hari berkurang sekitar 14 – 44 persen dibandingkan siang hari. Pada saat penurunan sinar tersebut, fitokrom akan mengirimkan sinyal kepada tumbuhan untuk segera beradaptasi dengan keadaan tersebut. Sinyal merah yang sebelumnya sudah ditangkap akan segera disimpan dalam bentuk sinar merah jauh.

## **5. Pengendalian biosintesis antosianin**

Antosianin merupakan pigmen merah dan pigmen biru yang larut dalam air yang secara alami terdapat pada tumbuhan, berfungsi sebagai alat pertahanan diri pada tumbuhan dari serangan cahaya ultraviolet. Antosianin disintesis dengan jalur biosintesis dengan bantuan beberapa enzim tertentu. Respon pertumbuhan tanaman terhadap cahaya antara lain:

- a. Cahaya dapat meningkatkan helai daun dan pemanjangan tangkai daun.
- b. Tumbuhan yang tumbuh di bawah cahaya merah mempunyai daun yang lebat dan jumlah sel yang lebih banyak dari pada tumbuhan yang hidup di tempat yang gelap.
- c. Cahaya meningkatkan pembentukan klorofil dan perkembangan kloroplas.
- d. Dengan adanya cahaya maka batang akan menjadi lebih pendek dan kekar.

**G. Soal Latihan**

1. Jelaskan pengertian fotomorfogenesis secara singkat, padat, dan jelas!
2. Sebutkan peran fitokrom bagi tumbuhan!
3. Sebutkan spesifikasi peran fitokrom A, B, C, D, dan E!
4. Jelaskan peran fitokrom dalam proses perkecambahan!

**Tugas!**

Buatlah tabel yang memuat sifat fisika dan kimia fitokrom!



# BAB XI

## KONTROL PEMBUNGAAN

---

---

### A. Tahapan Perkembangan Tanaman

#### 1. Perkembangan Meristem dan Organ Bunga

Tanaman berbunga banyak dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti fotoperiode dan suhu serta melibatkan sintesis dari stimulus seluler di daun. Selain tanaman berbunga, tidak memerlukan input eksternal dan sinyal dihasilkan di daun ketika tanaman hanya mencapai tahap perkembangan minimum. Bagaimanapun, perkembangan bunga dimulai ketika sinyal itu tiba di pucuk meristem apikal. Selama keadaan vegetatif, meristem tunas apikal diprogram untuk menghasilkan daun primordia. Ketika sinyal bunga tiba dari daun, meristem memperoleh identitas bunga dan perbungaan meristem sekunder, atau primordia bunga, muncul pada aksila primordia daun paling atas.<sup>61</sup>

Meristem bunga biasanya dapat dibedakan dari meristem vegetatif, bahkan pada tahap awal

---

<sup>61</sup> William G. Hopkins, Norman P. A. Hüner, *Introduction to Plant Physiology* 4th ed, (America: University Western Ontario, 2008), hlm 433-434.

perkembangan reproduksi dengan ukuran yang lebih besar. Transisi dari vegetatif untuk perkembangan reproduksi ditandai dengan peningkatan frekuensi pembelahan sel di dalam zona pusat meristem apikal pucuk. Pada meristem vegetatif, sel-sel zona pusat melengkapi siklus divisi secara perlahan. Saat perkembangan reproduksi dimulai, peningkatan ukuran meristem sebagian besar adalah sebuah hasil dari peningkatan tingkat pembelahan sel-sel pusat ini. Studi genetik dan molekuler telah mengidentifikasi sebuah jaringan gen yang mengendalikan morfogenesis bunga *Arabidopsis*, snapdragon (*Antirrhinum*), dan spesies lainnya.<sup>62</sup>

Pada bagian ini akan fokus pada perkembangan pada bunga *Arabidopsis* yang telah dipelajari secara luas. Pertama akan menguraikan perubahan morfologis dasar yang terjadi selama transisi dari vegetatif ke fase reproduksi. Selanjutnya akan mempertimbangkan pengaturan organ bunga dalam empat lingkaran pada meristem, dan jenis gen yang mengatur pola normal perkembangan bunga. Menurut model ABC, secara luas, lokasi spesifik organ bunga diatur oleh ekspresi tiga jenis gen identitas organ bunga yang tumpang tindih.

## **2. Karakteristik dari Meristem Tunas pada *Arabidopsis***

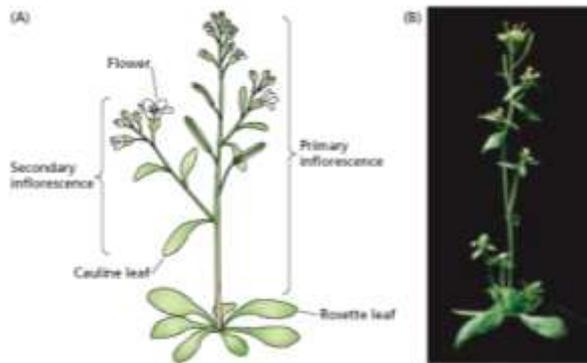
Selama fase pertumbuhan vegetatif, meristem apikal vegetatif *Arabidopsis* menghasilkan phytomere dengan ruas sangat pendek, menghasilkan sebuah roset dasar pada daun (bahwa phytomere terdiri dari daun, simpul

---

<sup>62</sup> Lincoln Taiz, Eduardo Zeiger, *Plant Physiology* 3rd ed, (English: Sinauer Associates, 2002), hlm 560.

yang ditempelkan daun, tunas aksilar, dan ruas di bawah nodus.<sup>63</sup>

Seperti dimulainya perkembangan reproduksi tanaman, meristem vegetatif ditransformasikan menjadi primer yang tidak ditentukan meristem perbungaan yang menghasilkan meristem bunga pada sisi-sisinya. Tunas lateral daun kaulin (daun perbungaan) berkembang menjadi meristem sekunder perbungaan, dan aktivitasnya berulang pola perkembangan perbungaan meristem primer.



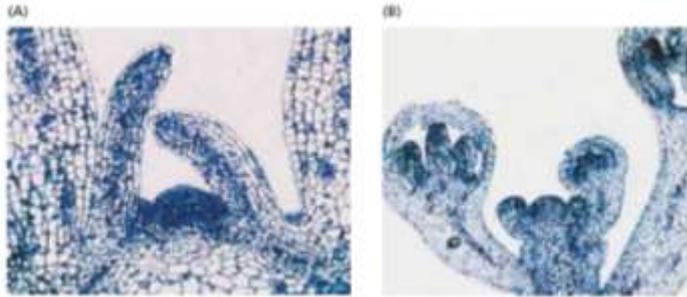
**Gambar 11.1.** Tanaman *Arabidopsis* (Lincoln Taiz and Eduardo Zeiger, 2002).

Pucuk apikal meristem *Arabidopsis thaliana* menghasilkan organ yang berbeda pada tahapan perkembangan. Di awal perkembangan, meristem tunas apikal membentuk roset dasar daun. Saat transisi ke berbunga, meristem apikal pucuk ditransformasikan untuk pembungaan meristem primer, akhirnya menghasilkan batang memanjang untuk bunga-bunga. Primordia daun dimulai sebelum transisi bunga menjadi

---

<sup>63</sup> *Ibid*, 560

daun kaulin, dan perbungaan sekunder berkembang di axis dari daun kaulin.



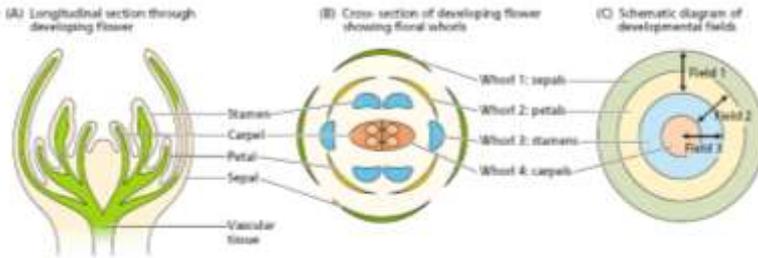
**Gambar 11.2.** Tunas apikal *Arabidopsis* (Lincoln Taiz and Eduardo Zeiger, 2002).

### **3. Empat Tipe Perbedaan Organ Bunga Dimulai Seperti Lingkaran-lingkaran Terpisah**

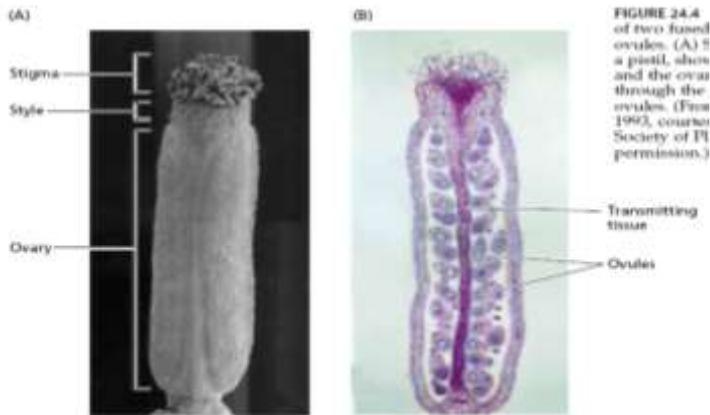
Meristem bunga meliputi empat jenis organ bunga yang berbeda, yaitu sepal, kelopak, benang sari, dan karpel. Seperangkat organ ini dimulai pada cincin konsentris, yang disebut lingkaran di sekitar sisi meristem. Inisiasi organ terdalam, karpel mengkonsumsi semua sel meristematik di apikal kubah, dan hanya primordia organ bunga yang ada saat kuncup bunga berkembang. Pada bunga *Arabidopsis* tipe liar, lingkaran diatur sebagai berikut:

- a. Lingkaran pertama (paling luar) terdiri dari empat sepal, yang hijau pada saat jatuh tempo.
- b. Lingkaran kedua terdiri dari empat kelopak, yaitu putih pada saat jatuh tempo.
- c. Lingkaran ketiga berisi enam benang sari, dua di antaranya lebih pendek dari empat lainnya.
- d. Lingkaran keempat adalah organ tunggal yang kompleks *gynoecium* atau putik, yang terdiri dari ovarium dengan dua karpus menyatu, masing-masing

berisi banyak ovula dan bentuk pendek yang ditutup dengan stigma.<sup>64</sup>



**Gambar 11.3.** Organ bunga dimulai secara berurutan oleh meristem bunga *Arabidopsis*. (A dan B) Organ bunga diproduksi sebagai lingkaran yang berurutan (lingkaran konsentris), dimulai dengan sepal dan maju ke dalam. (C) Menurut model kombinatorial, fungsi masing-masing lingkaran ditentukan oleh tumpang tindih perkembangan bidang. Bidang ini sesuai dengan pola ekspresi gen identitas organ bunga spesifik. (Lincoln Taiz and Eduardo Zeiger, 2002).



**Gambar 11.4.** Putik *Arabidopsis* dari dua karpus yang menyatu. (A) Putik yang di dalamnya terdapat stigma, bentuk pendek, dan ovarium. (B) Bagian longitudinal melalui putik, menunjukkan banyak ovula (Lincoln Taiz and Eduardo Zeiger, 2002).

<sup>64</sup> Lincoln Taiz, Eduardo Zeiger, *Plant Physiology* 3rd ed, (English: Sinauer Associates, 2002), hlm 561

#### **4. Model ABC dalam Penentuan Identitas Organ Bunga**

Pada tahun 1991, model ABC diusulkan untuk menjelaskan caranya gen homeotik mengontrol identitas organ. Model ABC dapat digunakan untuk memprediksi atau menafsirkan apa yang akan terjadi pada perkembangan organ pada hilangnya fungsi mutan untuk masing-masing gen. Model ABC mendalilkan bahwa identitas organ dalam setiap lingkaran ditentukan oleh kombinasi unik dari tiga gen identitas organ.

- a. Aktivitas A menentukan pemisahan.
- b. Aktivitas A dan B diperlukan untuk pembentukan kelopak.
- c. Aktivitas B dan C membentuk benang sari.
- d. Aktivitas C menentukan karper.

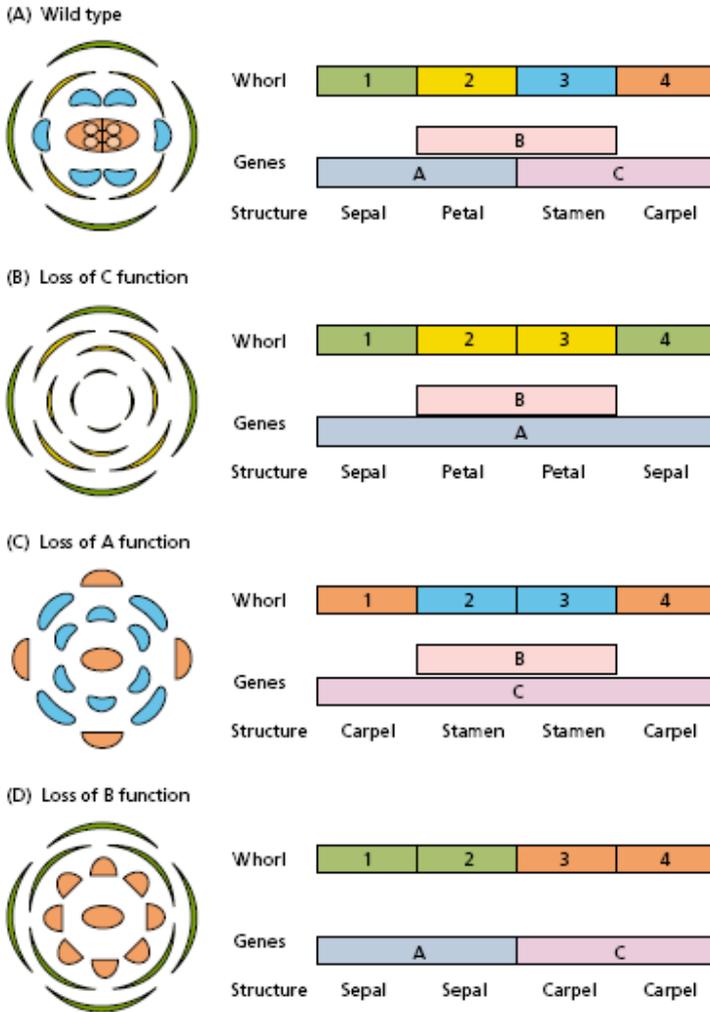
Model selanjutnya mengusulkan agar kegiatan A dan C saling saling menekan, yaitu, A dan gen tipe C memiliki fungsi kadaster di samping gen dan berfungsi dalam menentukan identitas organ.<sup>65</sup>

Pola pembentukan organ dalam tipe liar dan sebagian besar fenotipe mutan diprediksi dan dijelaskan oleh model ini. Tantangannya sekarang adalah untuk memahami bagaimana pola ekspresi organ ini gen identitas dikendalikan oleh gen kadaster, bagaimana organ gen identitas, yang menyandikan faktor transkripsi, mengubah pola gen lain yang diekspresikan dalam organ berkembang dan akhirnya mengubah pola ekspresi gen hasil dalam pengembangan organ bunga tertentu.<sup>66</sup>

---

<sup>65</sup> Lincoln Taiz, Eduardo Zeiger, *Plant Physiology* 3rd ed, (English: Sinauer Associates, 2002), hlm 564

<sup>66</sup> *Ibid*, 564



**Gambar 11.5.** (A) Interpretasi fenotip mutan homeotik bunga berdasarkan pada model ABC (tipe liar). (B) Hilangnya fungsi C menghasilkan perluasan fungsi A di seluruh meristem bunga. (C) Kehilangan fungsi menghasilkan penyebaran fungsi C di seluruh meristem. (D) Kehilangan fungsi B menghasilkan ekspresi hanya fungsi A dan C. (Lincoln Taiz and Eduardo Zeiger, 2002).

## **B. Faktor yang Memengaruhi Tumbuhan Menjadi Berbunga**

### **1. Faktor Internal**

#### **a. Gen**

Gen merupakan substansi pembawa sifat yang diturunkan dari induk ke generasi selanjutnya. Gen mempengaruhi ciri dan sifat makhluk hidup dimana pada tanaman akan memengaruhi bentuk tubuh, warna bunga, dan rasa buah. Gen juga menentukan kemampuan metabolisme sehingga sangat memengaruhi pertumbuhan dan perkembangan tanaman tersebut. Tanaman dengan gen tumbuh yang baik akan tumbuh dan berkembang cepat sesuai dengan periodenya.

Meskipun faktor dari gen sangat penting, namun faktor ini bukan satu-satunya penentu pola pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Di samping itu, ada faktor lingkungan yang ikut berpengaruh. Misalnya pada tanaman yang memiliki sifat unggul, hanya dapat tumbuh dengan cepat, berbuah lebat, dan rasanya manis di lahan yang subur dan kondisinya sesuai. Apabila ditanam di lahan tandus dan kondisinya tidak sesuai, pertumbuhan dan perkembangan tanaman ini tidak akan optimal.

Tiga kelas gen yang mengatur perkembangan bunga, antara lain:

- **Gen identitas organ** bunga secara langsung mengendalikan identitas bunga. Protein yang dikodekan oleh gen ini adalah faktor transkripsi yang

kemungkinan mengontrol ekspresi dari gen lain yang produknya terlibat dalam pembentukan dan atau fungsi organ bunga.

- **Gen kadaster** bertindak sebagai pengatur spasial bunga gen identitas organ dengan menetapkan batasan untuk ekspresi.
- **Gen identitas meristem** diperlukan untuk inisiasi induksi gen identitas organ. Gen-gen ini adalah regulator positif identitas organ bunga.<sup>67</sup> Gen identitas meristem harus aktif untuk pembentukan primordia di sisi-sisi meristem apikal agar menjadi meristem bunga (bahwa meristem apikal yang terbentuk meristem bunga pada sisi-sisinya dikenal sebagai perbungaan meristem).<sup>68</sup>

Pada *Arabidopsis*, *AGAMOUS-LIKE 201 (AGL20)*, *APETALA1 (AP1)*, dan *LEAFY (LFY)* adalah semua gen kritis dalam jalur genetika yang harus diaktifkan untuk membangun identitas meristem bunga. *LFY* adalah versi *Arabidopsis* dari snapdragon gen *FLO*. *AGL20* memainkan peran sentral dalam bunga yaitu mengintegrasikan sinyal dari beberapa jalur berbeda yang melibatkan isyarat lingkungan dan internal. *AGL20* dengan demikian tampaknya berfungsi sebagai saklar utama yang memulai perkembangan bunga. Setelah diaktifkan, *AGL20* memicu ekspresi *LFY*, dan *LFY* menyalakan ekspresi *AP1*. Pada *Arabidopsis*, *LFY* dan *AP1* terlibat dalam umpan balik positif lingkaran yaitu ekspresi *AP1* juga merangsang ekspresi *LFY*.

---

<sup>67</sup> Lincoln Taiz, Eduardo Zeiger, *Plant Physiology* 3rd ed, (English: Sinauer Associates, 2002), hlm 562

<sup>68</sup> *Ibid*, 562

Gen yang menentukan identitas organ bunga ditemukan sebagai mutan homeotik bunga. Seperti mutasi pada lalat buah, *Drosophila*, mengarah pada identifikasi satu set gen homeotik yang mengkode faktor transkripsi yang menentukan lokasi spesifik dimana struktur berkembang. Gen seperti itu bertindak sebagai saklar perkembangan utama yang mengaktifkan keseluruhan program genetik untuk struktur tertentu. Ekspresi gen homeotik dengan demikian memberikan identitas organ mereka. Seperti yang telah dilihat dalam bab ini, bunga dikotil terdiri dari lingkaran-lingkaran organ yang terbentuk sebagai hasil dari aktivitas meristem bunga, yaitu sepal, kelopak, benang sari, dan karpel. Organ-organ tersebut secara teratur, berpola dan interaksi sekelompok kecil gen homeotik yang menentukan identitas organ bunga.<sup>69</sup>

Gen identitas organ bunga diidentifikasi melalui mutasi homeotik yang mengubah identitas organ bunga sehingga beberapa organ bunga muncul di tempat yang salah. Misalnya, tanaman *Arabidopsis* dengan mutasi pada *APETALA2 (AP2)* gen menghasilkan bunga dengan karpel di mana sepal seharusnya, dan benang sari di mana kelopak biasanya muncul. Gen homeotik yang telah dikloning sejauh ini disandikan faktor transkripsi protein yang mengontrol ekspresi dari gen lain. Sebagian besar gen homeotik tanaman termasuk urutan kelas terkait yang dikenal sebagai gen kotak MADS, sedangkan gen homeotik hewan mengandung urutan yang disebut homeobox.

---

<sup>69</sup> Lincoln Taiz, Eduardo Zeiger, *Plant Physiology* 3rd ed, (English: Sinauer Associates, 2002), hlm 562

Banyak gen yang menentukan identitas organ bunga adalah gen kotak MADS, termasuk gen *DEFICIENS* dari snapdragon dan *AGAMOUS*, *PISTILLATA1*, dan Gen *APETALA3* gen dari *Arabidopsis*. Gen kotak MADS memiliki karakteristik, urutan nukleotida yang dikenal sebagai kotak MADS, yang mengkodekan struktur protein dikenal sebagai domain MADS. Domain MADS diaktifkan oleh faktor-faktor transkripsi untuk mengikat DNA yang memiliki urutan nukleotida spesifik. Tidak semua gen yang berisi domain kotak MADS adalah gen homeotik. Misalnya, *AGL20* adalah gen kotak MADS, tetapi berfungsi sebagai gen identitas meristem.<sup>70</sup>

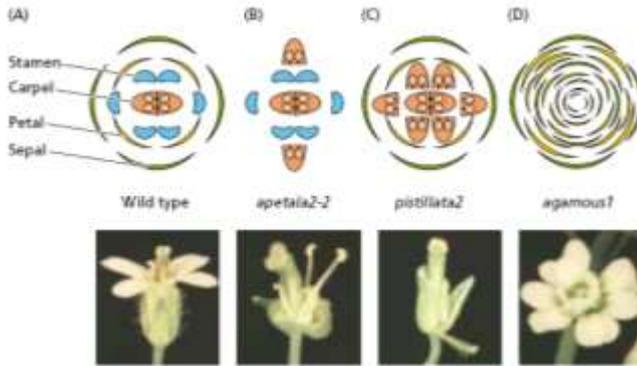
Lima gen berbeda diketahui menentukan identitas organ bunga *Arabidopsis*, yaitu *APETALA1 (AP1)*, *APETALA2 (AP2)*, *APETALA3 (AP3)*, *PISTILLATA (PI)*, dan *AGAMOUS (AG)*. Gen identitas organ awalnya diidentifikasi melalui mutasi yang secara dramatis mengubah struktur dan dengan demikian identitas organ bunga yang dihasilkan dalam dua lingkaran yang berdekatan. Sebagai contoh, tanaman dengan mutasi *ap2* kekurangan sepal dan kelopak. Tanaman yang menghasilkan mutasi *ap3* atau *pi* sepal bukan kelopak di lingkaran kedua, dan karpel bukannya benang sari di lingkaran ketiga, dan tanaman homozigot untuk mutasi *ag* kekurangan kedua benang sari dan karpel.<sup>71</sup> Gen-gen homeotik terbagi menjadi tiga kelas, tipe A, B, dan C.

---

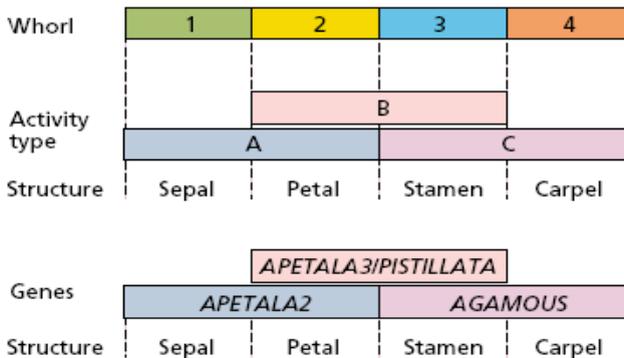
<sup>70</sup> *Ibid*, 563

<sup>71</sup> Lincoln Taiz, Eduardo Zeiger, *Plant Physiology* 3rd ed, (English: Sinauer Associates, 2002), hlm 563

*Pengantar Fisiologi Tumbuhan*



**Gambar 11.6.** Mutasi pada gen identitas organ bunga mengubah struktur bunga. (A) Jenis liar; (B) *apetala2-2* mutan tidak memiliki sepal dan kelopak; (C) mutan *pistillata2* kekurangan kelopak dan benang sari; (D) *agami1* mutan tidak memiliki keduanya benang sari dan karpel. (Lincoln Taiz and Eduardo Zeiger, 2002).



**Gambar 11.7.** Model ABC untuk akuisisi identitas organ bunga didasarkan pada interaksi tiga berbeda jenis kegiatan gen homeotik bunga: A, B, dan C. Pada lingkaran pertama, ekspresi tipe A (*AP2*) saja menghasilkan pembentukan sepal. Di lingkaran kedua, ekspresi kedua tipe A (*AP2*) dan tipe B (*AP3 / PI*) menghasilkan formasi kelopak. Di lingkaran ketiga, ekspresi B (*AP3 / PI*) dan C (*AG*) menyebabkan pembentukan benang sari. Di lingkaran keempat, aktivitas C (*AG*) sendiri menentukan karpel. Selain itu, aktivitas A (*AP2*) menekan aktivitas C (*AG*) di lingkaran 1 dan 2,

sementara C menekan A dalam lingkaran 3 dan 4. (Lincoln Taiz and Eduardo Zeiger, 2002).

1. Aktivitas tipe A, dikodekan oleh *AP1* dan *AP2*, kontrol identitas organ dalam lingkaran pertama dan kedua. Hilangnya aktivitas tipe A menghasilkan pembentukan karpel bukannya sepal di lingkaran pertama, dan benang sari bukannya kelopak di lingkaran kedua.
2. Aktivitas tipe B, dikodekan oleh *AP3* dan *PI*, kontrol penentuan organ dalam lingkaran kedua dan ketiga. Hilangnya aktivitas tipe B menghasilkan pembentukan sepal bukan kelopak di lingkaran kedua, dan dari karpel bukan benang sari di lingkaran ketiga.
3. Aktivitas tipe C, yang disandikan oleh *AG*, mengontrol di lingkaran ketiga dan keempat. Hilangnya aktivitas tipe C menghasilkan pembentukan kelopak bukannya benang sari di lingkaran ketiga, dan penggantian lingkaran yang keempat oleh bunga baru sehingga lingkaran keempat bunga mutan *ag* ditempati oleh sepal.



**Gambar 11.8.** Mutan empat kali lipat (*api1*, *ap2*, *ap3* / *pi*, *ag*) menghasilkan produksi struktur seperti daun di tempat organ bunga. (Lincoln Taiz and Eduardo Zeiger, 2002).

Peran gen identitas organ dalam perkembangan bunga diilustrasikan oleh eksperimen di mana dua atau tiga kegiatan dihilangkan oleh mutasi. Tanaman mutan empat kali lipat (*ap1*, *ap2*, *ap3* / *pi*, dan *ag*) menghasilkan meristem bunga yang berkembang sebagai *pseudoflower*, semua organ bunga diganti dengan struktur hijau seperti daun, meskipun organ ini diproduksi dengan *whorled phyllotaxy*. Ahli biologi evolusi, dimulai dengan yang kedelapan belas penyair, filsuf, dan ilmuwan alam abad Jerman Johann Wolfgang von Goethe (1749–1832), telah berspekulasi bahwa organ bunga adalah daun dengan modifikasi yang tinggi.

## **b. 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 adalah sebagai berikut:

- Auksin, berperan untuk memacu proses pemanjangan, pembelahan, dan diferensiasi sel.
- Giberelin, berperan untuk pembentukan biji serta perkembangan dan perkecambahan embrio.
- Etilen, berperan untuk pematangan buah dan perontokan daun.
- Sitokinin, berperan untuk pembelahan sel atau sitokenesis, seperti merangsang pembentukan akar dan cabang tanaman.
- Asam absisat, berperan untuk proses penuaan dan gugurnya daun.

- Kaolin, berperan untuk proses organogenesis tanaman.
- Asam traumalin, berperan untuk regenerasi sel apabila mengalami kerusakan jaringan.

## **2. Faktor Eksternal**

### **a. Nutrisi**

Nutrisi merupakan bahan baku dan sumber energi dalam proses metabolisme tubuh. Kualitas dan kuantitas nutrisi akan memengaruhi pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Tanaman membutuhkan nutrisi 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 matahari**

Cahaya berpengaruh terhadap pertumbuhan dan perkembangan makhluk hidup. Tanaman sangat membutuhkan cahaya matahari untuk fotosintesis. Namun, keberadaan cahaya ternyata dapat menghambat pertumbuhan tumbuhan karena cahaya dapat merusak hormon auksin yang terdapat pada ujung batang.

### **c. Air dan Kelembaban**

Air dan kelembaban merupakan faktor penting untuk pertumbuhan dan perkembangan. Air sangat dibutuhkan oleh makhluk hidup. Tanpa air, makhluk hidup tidak dapat bertahan hidup. Air merupakan tempat berlangsungnya reaksi-reaksi kimia di dalam

tubuh. Kelembaban memengaruhi keberadaan air yang dapat diserap oleh tanaman dan mengurangi penguapan. Kondisi ini sangat berpengaruh sekali terhadap pemanjangan sel. Kelembaban juga penting untuk mempertahankan stabilitas bentuk sel.

#### **d. Suhu**

Suhu memiliki pengaruh nyata terhadap pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Contohnya pada padi yang ditanam di 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 semua proses dalam pertumbuhan dan perkembangan seperti penyerapan air, fotosintesis, penguapan, dan pernapasan pada tanaman dipengaruhi oleh suhu.

#### **e. Tanah**

Tanah berpengaruh terhadap pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Tanaman akan tumbuh dan berkembang dengan optimal apabila 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.<sup>72</sup>

### **C. Fotoperiodisme**

Fotoperiodisme adalah respon suatu organisme terhadap lamanya penyinaran sinar matahari. Contoh dari fotoperiodisme adalah perbungaan, jatuhnya daun, dan dormansi. Di daerah sepanjang khatulistiwa lamanya siang

---

<sup>72</sup> Lubis Y.A, *Tanaman Hias Rumah – Tuntunan Praktis Berkebun*, (Jakarta: Gaya Favorit Press, 199), hal. 53-54.

hari atau fotoperiodisme akan konstan sepanjang tahun, sekitar 12 jam. Di daerah bermusim, panjang hari lebih dari 12 jam pada musim panas, tetapi akan kurang dari 12 jam pada musim dingin.

Fotoperiode merupakan rasio relatif antara panjang waktu penyinaran matahari pada siang dan malam hari. Fotoperiodisme ialah tanggapan perkembangan tumbuhan terhadap fotoperiode. Pengaruh respon tersebut berupa pertumbuhan vegetatif dan reproduktif. Pertumbuhan vegetatif yang dipengaruhi oleh fotoperiode adalah pembentukan bulb dan umbi, pembentukan cabang, bentuk daun, pembentukan pigmen, pembentukan rambut, perkembangan akar, dormansi biji, dan kematian. Pertumbuhan reproduktif tanaman yang dipengaruhi oleh fotoperiode adalah pembentukan bunga, buah, dan biji<sup>73</sup>.

Fotoperiodisitas atau panjang hari didefinisikan sebagai panjang atau lamanya siang yang dihitung mulai dari matahari terbit sampai terbenam. Panjang hari tidak terpengaruh oleh keadaan awan karena lama penyinaran bisa berkurang apabila matahari tertutup awan, tetapi panjang harinya tetap.

Panjang hari berubah secara beraturan sepanjang tahun sesuai dengan deklinasi matahari dan berbeda pada setiap tempat menurut garis lintang. Pada daerah khatulistiwa, panjang hari sekitar 12 jam, semakin jauh dari ekuator panjang hari dapat lebih atau kurang sesuai dengan pergerakan matahari. Secara umum dapat dikatakan bahwa semakin lama tanaman mendapatkan pencahayaan matahari, semakin intensif proses fotosintesis, sehingga hasil semakin

---

<sup>73</sup> Sutoyo, *Fotoperiode dan Pembungaan Tanaman*, (Buana Sains Vol 11 No.2, 2011) hal 137-138

## *Pengantar Fisiologi Tumbuhan*

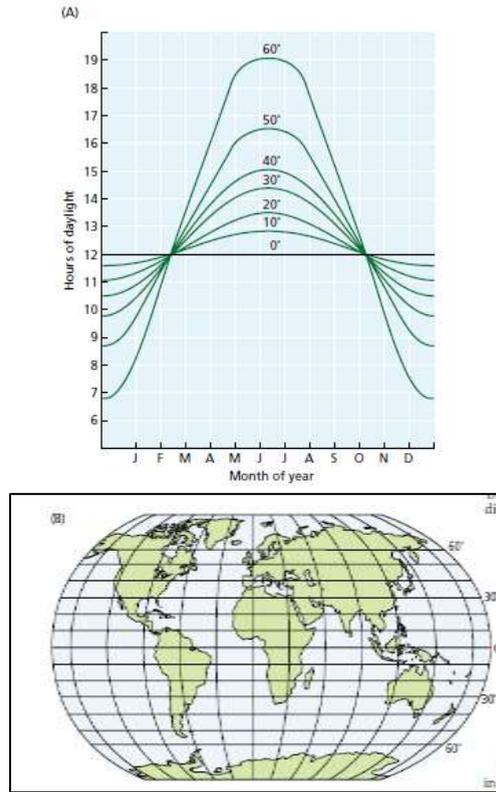
tinggi. Akan tetapi fenomena ini tidak sepenuhnya benar karena beberapa tanaman memerlukan lama penyinaran yang berbeda untuk mendorong fase pembungaan. Fotoperiodisitas tidak hanya berpengaruh terhadap jumlah cadangan makanan yang dihasilkan oleh suatu tanaman, tetapi juga menentukan waktu pembungaan pada banyak tanaman.

Jam sirkadian memungkinkan organisme untuk menentukan waktu hari di mana molekul atau biokimia tertentu terjadi. Fotoperiodisme atau kemampuan suatu organisme untuk mendeteksi panjang hari, memungkinkan terjadi pada waktu tertentu pada setiap tahun, sehingga memungkinkan untuk respon musiman. Ritme sirkadian dan fotoperiodisme memiliki sifat umum menanggapi siklus terang dan gelap<sup>74</sup>.

Tepatnya di khatulistiwa, hari panjang dan panjang malam adalah sama dan konstan sepanjang tahun. Sebagai salah satu gerakan menjauh dari khatulistiwa ke arah kutub, hari-hari menjadi lebih panjang di musim panas dan lebih pendek di musim dingin. Tidak mengherankan, spesies tanaman telah berevolusi untuk mendeteksi perubahan musiman panjang hari, dan tanggapan fotoperiode khusus mereka sangat dipengaruhi oleh garis lintang dari mana mereka berasal.

---

<sup>74</sup> Taiz dan Zeiger, *Plant Physiology Third Edition*, (Sunderland: Sinauer, 2002), Hlm 572



**Gambar 11.9.** Panjang hari sebagai fungsi waktu sepanjang tahun

Fenomena fotoperiodisme ditemukan pada hewan dan tumbuhan. Pada hewan, panjang hari mengontrol kegiatan musiman seperti hibernasi, perkembangan musim panas atau musim dingin, dan aktivitas reproduksi. Respon tanaman yang dikendalikan oleh panjang hari di antaranya adalah inisiasi pembungaan, reproduksi aseksual, pembentukan organ penyimpanan, dan timbulnya dormansi.

Mungkin semua tanggapan fotoperiodisme tanaman memanfaatkan fotoreseptor yang sama, dengan jalur transduksi sinyal tertentu berikutnya mengatur respon yang berbeda. Karena jelas bahwa pemantauan berlalunya waktu

adalah penting untuk semua tanggapan photoperiodisme, mekanisme ketepatan waktu harus mendasari baik waktu per tahun dan waktu per hari. Osilator sirkadian diduga memberikan suatu mekanisme pengukur waktu endogen yang berfungsi sebagai titik referensi untuk respon terhadap cahaya yang masuk dari lingkungan.

Berdasarkan respon tanaman terhadap fotoperiode, tanaman terbagi atas tiga golongan yaitu tanaman hari pendek, tanaman hari panjang dan tanaman berhari netral.

### **1. Tanaman Hari Pendek**

Tanaman berhari pendek ialah tanaman yang hanya dapat berbunga apabila panjang hari kurang dari nilai kritis (panjang hari maksimal). Panjang hari maksimum berkisar antara 12 jam sampai 14 jam. Tanaman yang berhari pendek akan mengalami pertumbuhan vegetatif terus menerus apabila panjang hari melewati nilai kritis, dan akan berbunga di hari pendek di akhir musim panas dan musim gugur. Tetapi tanaman berhari pendek tidak berbunga di hari pendek di awal semi, dan akan berbunga di hari pendek pada akhir musim panas. Hal ini disebabkan suhu tidak cukup hangat untuk melanjutkan pertumbuhan ke fase reproduktif. Di samping itu, pertumbuhan vegetatif yang tersedia pada saat itu belum mencukupi untuk mengantarkan tanaman ke pembungaan, di samping banyak sistem (hormon, enzim dan lain-lain) juga belum siap. Tanaman yang tidak peka terhadap fotoperiode yang tergolong berhari pendek, biasanya mempunyai sifat fisiologis yang menonjol daripada sifat yang ditimbulkan oleh pengaruh lingkungan. Misalnya, pembungaan dan pembuahan akan lebih dipengaruhi oleh ketersediaan asimilat dan sistem hormon dalam tubuhnya. Tanaman yang peka terhadap fotoperiode, pembungaan dan

pembentukan buahnya sangat ditentukan oleh panjangnya hari sebesar 12 menit saja sudah berarti bagi terbentuknya bunga.

## 2. Tanaman Hari Panjang

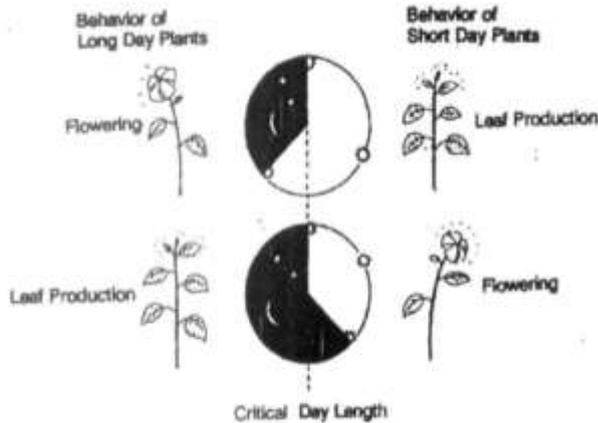
Tanaman berhari panjang adalah tanaman yang menunjukkan respon berbunga lebih cepat apabila panjang hari lebih panjang daripada panjang hari minimum (kritis) tertentu atau disebut pula tanaman bermalam pendek yakni tumbuhan yang memerlukan lamanya siang hari lebih dari 12 jam untuk terjadinya proses perbungaan, seperti gandum, bayam, dan lain-lain. Tanaman berhari panjang yang berasal dari zona sedang (*temperate*) akan berbunga dalam bulan Mei dan Juli apabila panjang siang selama 15 jam. Sebagai contoh tanaman berhari panjang adalah spinasi (*Spinaci oler acea* L.) Barley (*Hordeum* spp.), Rey (*Secale cereale*), Bit gula (*Beta vulgaris*), Alfalfa dan lain-lain. *Triticum aestivum* yang tergolong tanaman berhari panjang menghendaki lama penyinaran lebih dari 14 jam sehari dan untuk berkecambah memerlukan suhu rendah. Sedangkan pertumbuhan selanjutnya sampai berbunga dan berbuah menghendaki suhu yang lebih tinggi dan hari-hari panjang. Bila syarat-syarat yang dikehendakinya tidak terpenuhi, maka *Triticum aestivum* tidak dapat menghasilkan bunga dan buah. Kombinasi suhu dan panjang hari yang mengontrol pertumbuhan vegetatif dan generatif pada beberapa jenis tanaman hari panjang sebenarnya dapat diciptakan dengan perlakuan-perlakuan terhadap tanaman. Misalnya penyinaran singkat di malam hari untuk memperpendek periode gelap. Percobaan-percobaan seperti ini dapat memengaruhi perbungaan, khususnya pada tanaman yang menghendaki panjang

siang lebih dari 15 jam. Perlakuan vernalisasi pada biji *Triticum aestivum* yang berkecambah akan menyebabkan proses yang menginduksi kecambah ke arah pertumbuhan menuju pembentukan primordia bunga. Karena biji *Triticum aestivum* pada saat berkecambah juga memerlukan fase gelap yang lebih panjang (hari pendek), maka selain vernalisasi, untuk mengantarkan tanaman ini ke tahap pembungaan juga diperlukan perlakuan gelap buatan. Sedangkan hari panjang dan suhu tinggi yang diharapkan untuk pertumbuhan vegetatif dapat dibuat dengan penyinaran singkat pada malam hari dengan lampu listrik yang berkapasitas 50 watt setiap meter bujur sangkar selama lebih kurang 5 jam.

### **3. Tanaman Hari Netral**

Tanaman berhari netral (*intermediate*) adalah tanaman yang berbunganya tidak dipengaruhi oleh panjang hari. Tanaman *intermediate* dalam zona sedang bisa berbunga dalam beberapa bulan. Tetapi tanaman yang tumbuh di daerah tropis yang mengalami 12 jam siang dan 12 jam malam dapat berbunga terus menerus sepanjang tahun. Oleh karena itu, tanaman yang tumbuh di daerah tropis pada umumnya adalah tanaman *intermediate*. Yang tergolong tanaman *intermediate* adalah kapas (*Gossypium hirsutum*), tembakau (*Nicotiana tobaccum*), bunga matahari (*Helianthus annus*) tomat, dan lain sebagainya. Tanaman *intermediate* memerlukan pertumbuhan vegetatif tertentu sebagai tahap untuk menuju tahap pembungaan tanpa dipengaruhi oleh fotoperiode. Apabila beberapa tumbuhan terpaksa harus di kondisi fotoperiodisme yang tidak optimal maka pertumbuhannya akan bergeser ke pertumbuhan vegetatif. Di daerah khatulistiwa, tingkah laku tumbuhan yang berhubungan dengan fotoperiodisme

ini tidaklah menunjukkan adanya pengaruh yang mencolok. Tumbuhan akan tetap aktif dan berbunga sepanjang tahun asalkan faktor-faktor lainnya dalam hal ini suhu, air, dan nutrisi tidak merupakan faktor pembatas.



**Gambar 11.10.** Tanaman hari panjang dan hari pendek

#### **D. Soal Latihan**

1. Sebutkan faktor internal dan eksternal yang memengaruhi tumbuhan menjadi berbunga!
2. Sebutkan macam-macam gen yang mengatur perkembangan bunga dan jelaskan perbedaan di antara gen-gen tersebut!
3. Sebutkan macam-macam hormon yang berperan dalam kontrol pembungaan!
4. Jelaskan pengertian fotoperiodisme secara singkat, padat, dan jelas!
5. Sebutkan dan jelaskan pembagian tanaman berdasarkan responnya terhadap fotoperiode!

*Pengantar Fisiologi Tumbuhan*

**Tugas!**

Buatlah skema tahapan pembungaan pada tumbuhan yang dilengkapi dengan faktor pendukung yang diperlukan pada setiap tahapan!

## BAB XII

# STRESS FISILOGI

---

---

### A. Pengertian Stress Fisiologi

Stess fisiologi dapat terjadi akibat faktor eksternal yang kurang menguntungkan bagi tanaman. Faktor eksternal tersebut dapat berupa faktor biotik maupun abiotik. Stress fisiologi dapat menyebabkan perubahan kondisi lingkungan sehingga berpengaruh terhadap pertumbuhan dan perkembangan tanaman.

Stess fisiologi (cekaman) biasanya didefinisikan sebagai faktor luar yang tidak menguntungkan yang berpengaruh buruk terhadap tanaman atau kondisi lingkungan yang dapat memberi pengaruh buruk pada pertumbuhan, reproduksi, dan kelangsungan hidup tumbuhan dan faktor lingkungan biotik dan abiotik yang dapat mengurangi laju proses fisiologi.

Pertumbuhan tanaman sangat dipengaruhi oleh lingkungannya. Faktor - faktor lingkungan akan memengaruhi fungsi fisiologis tanaman. Respon tanaman sebagai akibat faktor lingkungan akan terlihat pada penampilan tanaman. Setiap makhluk hidup memiliki *range*

*of optimum* atau kisaran optimum terhadap faktor lingkungan untuk pertumbuhannya. Pada kondisi di atas ataupun di bawah batas kisaran toleransi itu, makhluk hidup akan mengalami stress fisiologis.

## **B. Macam-Macam Stress Fisiologi**

Secara umum, cekaman lingkungan pada tumbuhan dikelompokkan menjadi dua, yaitu cekaman abiotik dan cekaman biotik. Cekaman abiotik terdiri dari cekaman air (kelebihan dan kekurangan), suhu (tinggi dan rendah), garam (salinitas), dan oksigen. Sedangkan cekama biotik meliputi kompetisi intra dan antar spesies serta infeksi oleh hama dan penyakit.

### **1. Cekaman abiotik**

#### **a. Stress akibat kelebihan dan kekurangan air (cekaman air)**

Faktor air dalam fisiologi tanaman merupakan faktor utama yang sangat penting. Tanaman tidak akan dapat hidup tanpa air, karena air adalah matriks dari kehidupan, bahkan makhluk lain akan punah tanpa air. Cekaman air pada tanaman ini ada dua yakni cekaman akibat kelebihan air dan cekaman akibat kekurangan air.

Cekaman air yang terjadi pada tanaman dapat berupa terlalu banyaknya air dan juga kekurangan air pada tanaman yang terjadi di lingkungan tumbuhnya. Air sebagai kebutuhan utama yang diinginkan oleh tanaman dimana air tersebut dapat membantu dalam pertumbuhan tanaman tetapi dengan terlalu banyaknya air juga tidak baik bagi tanaman. Terlalu banyaknya suplai air akan memberikan dampak yang buruk pada tanaman, terlebih lagi jika tanaman tersebut tidak

memerlukan air yang banyak. Kebanyakan air akan membuat genangan pada area tanaman yang akan mengakibatkan terjadinya kekurangan persediaan oksigen bagi akar karena oksigen akan susah masuk karena air yang terlalu banyak. Genangan juga akan berpengaruh pada proses fisiologis dan biokimia. Selain itu genangan akan membuat akar di dalam mati sehingga terjadi pembentukan akar adventif yang berada di dekat permukaan tanah. Terjadinya kekurangan air pada tanaman akan menyebabkan terjadinya kekeringan yang akan menghambat pertumbuhan tanaman.

**b. Stress panas dan kejut panas (cekaman suhu)**

Suhu merupakan suatu faktor lingkungan yang akan membantu dalam produksi tanaman. Suhu akan membantu dalam proses fotosintesis, membukanya stomata dan respirasi. Tetapi suhu juga dapat menghambat dalam proses fisiologi apabila suhu tersebut di luar suhu optimal terendah dan tertinggi. Tingginya suhu akan membunuh suatu tanaman dengan cara mendenaturasi enzim-enzim dan juga merusak metabolisme. Suhu yang rendah akan membuat membran sel tidak stabil.

**c. Stress salinitas (cekaman garam)**

Cekaman salinitas terjadi karena banyaknya akumulasi garam yang ada pada lingkungan tanaman dimana konsentrasi tersebut sangat tinggi sehingga tanaman akan mengalami suatu keadaan yang sangat mencekam dan menghambat tumbuhnya tanaman apabila tanaman tidak bisa bertahan pada kondisi tersebut. Terjadinya cekaman salinitas akan

menyebabkan terjadinya tekanan osmotik yang dapat menghambat masuknya hara dan air pada akar tanaman. Tingkat salin pada tanaman yaitu 0- 2 belum salin, 2-4 masih rendah dimana tanaman yang peka akan tertanggu, 4-8 salinnya masih masuk sedang dimana tanaman akan mulai banyak yang terganggu, 8-16 masuk pada salin yang tinggi yang mana tanaman akan banyak yang mati kecuali tanaman yang toleran yang masih bertahan, lebih dari 16 sangat tinggi dimana hanya tanaman yang benar-benar toleran yang akan tumbuh. Cekaman salinitas tidak baik bagi tanaman karena akan menurunkan potensial air larutan tanah dan natrium dalam garam dan juga ion-ion lainnya serta apabila terlalu banyak akan menjadi racun bagi tanaman.

Stress garam terjadi dengan terdapatnya salinitas atau konsentrasi garam-garam terlarut yang berlebihan dalam tanaman. Stres garam ini umumnya terjadi dalam tanaman pada tanah salin. Stress garam meningkat dengan meningkatnya konsentrasi garam hingga tingkat konsentrasi tertentu yang dapat mengakibatkan kematian tanaman. Garam-garam yang menimbulkan stress tanaman antara lain ialah NaCl, NaSO<sub>4</sub>, CaCl<sub>2</sub>, MgSO<sub>4</sub>, MgCl<sub>2</sub> yang terlarut dalam air (Sipayung, 2006). Stress akibat kelebihan Na<sup>+</sup> dapat memengaruhi beberapa proses fisiologi dari mulai perkecambahan sampai pertumbuhan tanaman (Fallah, 2006).

Menurut Petani Wahid (2006), kemasaman tanah merupakan kendala paling *inherence* dalam pengembangan pertanian di lahan sulfat masam. Tanaman tumbuh normal (sehat) umumnya pada pH 5,5 untuk tanah gambut dan pH 6,5 untuk tanah

mineral. Pada kebanyakan spesies, pengaruh jenis-jenis garam umumnya tidak khas terhadap tumbuhan tanaman tetapi lebih tergantung pada konsentrasi total garam.

Salinitas tidak ditentukan oleh garam NaCl saja tetapi oleh berbagai jenis garam yang berpengaruh dan menimbulkan stress pada tanaman. Dalam konteks ini tanaman mengalami stres garam apabila konsentrasi garam yang berlebih cukup tinggi sehingga menurunkan potensial air sebesar 0,05 – 0,1 Mpa. Stress garam ini berbeda dengan stress ion yang tidak begitu menekan potensial air (Lewit, dalam Sipayung, 2006).

## **2. Cekaman biotik**

Cekaman biotik yang biasanya terjadi adalah cekaman dari sesama tanaman dalam mendapatkan nutrisi, cahaya matahari, dan sebagainya. Selain itu cekaman yang akan menderanya adalah terjadinya serangan hama dan penyakit yang akan menghambat tanaman dalam tumbuhnya dan juga dapat menimbulkan terjadinya keatian pada tanaman.

## **C. Mekanisme Respon Tumbuhan Terhadap Stress Fisiologi**

### **1. *Escape* (lari)**

*Escape* (lari) merupakan kemampuan tumbuhan untuk menyelesaikan siklus hidupnya sebelum terjadi stress. Salah satu cara yang ditempuh tumbuhan dalam menyelesaikan siklus hidupnya dengan cepat adalah berbunga lebih awal dari waktu yang semestinya. Dengan pembungaan yang lebih awal ini, maka siklus hidup tumbuhan pun akan berakhir lebih dini. Dengan demikian saat lingkungan mengalami stress, tumbuhan tersebut

sudah menyelesaikan siklus hidupnya sehingga bisa terhindar dari stress.

## **2. *Avoidance* (menghindar)**

*Avoidance* (menghindar) merupakan kemampuan tumbuhan untuk mereduksi atau meminimalisir faktor penyebab stress. Beberapa cara yang ditempuh tumbuhan dalam mereduksi atau meminimalisir faktor penyebab stress adalah terjadinya pemanjangan akar dan pengguguran daun.

## **3. *Tolerance* (toleransi)**

*Tolerance* (toleransi) merupakan kemampuan tumbuhan dalam mengatasi lingkungan yang tidak menguntungkan. Toleransi pada tumbuhan dapat dilakukan melalui aklimasi dan adaptasi. Aklimasi adalah perubahan fisiologi yang berfungsi untuk mempertahankan fungsi suatu organisme dalam lingkungan yang mengalami perubahan. Sedangkan adaptasi adalah kemampuan suatu organisme untuk menyesuaikan diri dengan perubahan lingkungan dalam rangka mempertahankan diri. Aklimasi dan adaptasi pada tumbuhan dapat terjadi pada beberapa tingkatan, mulai dari tingkat biokimia, molekuler, sel, anatomi, dan morfologi.

### **a. Aklimasi dan adaptasi pada tingkat biokimia**

Aklimasi dan adaptasi pada tingkat biokimia dilakukan dengan cara memproduksi beberapa komponen osmoregulasi, seperti prolin, glisin, dan gula alkohol. Komponen osmoregulasi tersebut tidak memengaruhi proses metabolisme di dalam tubuh

tumbuhan, namun dapat melindungi tumbuhan dari stress.

**b. Aklimasi dan adaptasi pada tingkat molekuler**

Pada aklimasi dan adaptasi di tingkat molekuler terjadi persepsi sinyal stress dengan respon genomik yang mengarah pada toleran. Selain itu, toleransi pada tingkat molekuler dapat terjadi dengan adanya perubahan ekspresi gen.

**c. Aklimasi dan adaptasi pada tingkat sel**

Aklimasi dan adaptasi pada tingkat sel dapat terjadi melalui beberapa cara, seperti merubah siklus sel dan pembelahan sel, merubah sistem endomembran dan vakuola, serta merubah dinding sel.

**D. Macam-macam Respon Tumbuhan terhadap Berbagai Jenis Cekaman**

**1. Respon Terhadap Cekaman Kelebihan Air**

Dampak genangan air adalah menurunkan pertukaran gas antara tanah dan udara yang mengakibatkan menurunnya ketersediaan  $O_2$  bagi akar, menghambat pasokan  $O_2$  bagi akar dan mikroorganisme (mendorong udara keluar dari pori tanah maupun menghambat laju difusi). Genangan berpengaruh terhadap proses fisiologis dan biokimiawi antara lain respirasi, permeabilitas akar, penyerapan air dan hara, penyematan N. Genangan menyebabkan kematian akar di kedalaman tertentu dan hal ini akan memacu pembentukan akar adventif pada bagian di dekat permukaan tanah pada tanaman yang tahan genangan.

## **2. Respon Terhadap Cekaman Kekeringan**

Respon tanaman terhadap stres air sangat ditentukan oleh tingkat stress yang dialami dan fase pertumbuhan tanaman saat mengalami cekaman. Respon tanaman yang mengalami cekaman kekeringan mencakup perubahan ditingkat seluler dan molekuler seperti perubahan pada pertumbuhan tanaman, volume sel menjadi lebih kecil, penurunan luas daun, daun menjadi tebal, adanya rambut pada daun, peningkatan ratio akar-tajuk, sensitivitas stomata, penurunan laju fotosintesis, perubahan metabolisme karbon dan nitrogen, perubahan produksi aktivitas enzim dan hormon, serta perubahan ekspresi.

## **3. Respon Tumbuhan Terhadap Kekurangan Oksigen**

Tumbuhan yang disiram terlalu banyak air bisa mengalami kekurangan oksigen karena tanah kehabisan ruangan udara yang menyediakan oksigen untuk respirasi seluler akar. Keadaan lingkungan kekurangan  $O_2$  disebut hipoksia, dan keadaan lingkungan tanpa  $O_2$  disebut Anoksia (mengalami cekaman aerasi). Kekurangan oksigen akan mengakibatkan metabolisme dan pertumbuhan pada tanaman akan terhambat sehingga lam- kelamaan tumbuhan akan mati.

## **4. Respon Tumbuhan Terhadap Salinitas**

Stress garam terjadi dengan terdapatnya salinitas atau konsentrasi garam-garam terlarut yang berlebihan dalam tanaman. Garam-garam yang menimbulkan stres tanaman antara lain ialah  $NaCl$ ,  $NaSO_4$ ,  $CaCl_2$ ,  $MgSO_4$ ,  $MgCl_2$  yang terlarut dalam air. Kehilangan air, bukan menyerapnya. Kedua, pada tanah bergaram, natrium dan ion-ion tertentu lainnya dapat menjadi racun bagi

tumbuhan jika konsentrasinya relatif tinggi. Membran sel akar yang selektif permeabel akan menghambat pengambilan sebagian besar ion yang berbahaya, akan tetapi hal ini akan memperburuk permasalahan pengambilan air dari tanah yang kaya akan zat terlarut.

Kelebihan NaCl atau garam lain dapat mengancam tumbuhan karena dua alasan. Pertama, dengan cara menurunkan potensial air larutan tanah, garam dapat menyebabkan kekurangan air pada tumbuhan meskipun tanah tersebut mengandung banyak sekali air. Hal ini karena potensial air lingkungan yang lebih negatif dibandingkan dengan potensial air jaringan akar, sehingga air akan kehilangan air, bukan menyerapnya. Kedua, pada tanah bergaram, natrium dan ion-ion tertentu lainnya dapat menjadi racun bagi tumbuhan jika konsentrasinya relatif tinggi. Membran sel akar yang selektif permeabel akan menghambat pengambilan sebagian besar ion yang berbahaya, akan tetapi hal ini akan memperburuk permasalahan pengambilan air dari tanah yang kaya akan zat terlarut (Campbell, 2003).

Salinitas menekan proses pertumbuhan tanaman dengan efek yang menghambat pembesaran dan pembelahan sel, produksi protein serta penambahan biomassa tanaman. Tanaman yang mengalami stress garam umumnya tidak menunjukkan respon dalam bentuk kerusakan langsung tetapi pertumbuhan yang tertekan dan perubahan secara perlahan. Gejala pertumbuhan tanaman pada tanah dengan tingkat salinitas yang cukup tinggi adalah pertumbuhan yang tidak normal seperti daun mengering di bagian ujung dan gejala khlorosis. Gejala ini timbul karena konsentrasi garam terlarut yang tinggi menyebabkan menurunnya potensial larutan tanah

sehingga tanaman kekurangan air. Sifat fisik tanah juga terpengaruh antara lain bentuk struktur, daya pegang air dan permeabilitas tanah.

Pertumbuhan sel tanaman pada tanah salin memperlihatkan struktur yang tidak normal. Penyimpangan yang terjadi meliputi kehilangan integritas membran, kerusakan lamella, kekacauan organel sel, dan akumulasi Kalsium Oksalat dalam sitoplasma, vakuola, dinding sel dan ruang antar sel. Kerusakan struktur ini akan mengganggu transportasi air dan mineral hara dalam jaringan tanaman (Maas dan Nieman, dalam Sipayung, 2006). Banyak tumbuhan dapat berespon terhadap salinitas tanah yang memadai dengan cara menghasilkan zat terlarut kompatibel, yaitu senyawa organik yang menjaga potensial air larutan tanah, tanpa menerima garam dalam jumlah yang dapat menjadi racun. Namun demikian, sebagian besar tanaman tidak dapat bertahan hidup menghadapi cekaman garam dalam jangka waktu yang lama kecuali pada tanaman halofit, yaitu tumbuhan yang toleran terhadap garam dengan adaptasi khusus seperti kelenjar garam, yang memompa garam keluar dari tubuh melewati epidermis daun (Campbell, 2003).

Ketika terjadi cekaman lingkungan seperti kekeringan, logam berat atau salinitas, tanaman bereaksi dalam beragam cara untuk menghadapi perubahan yang berpotensi merusak. Salah satu hasil dari tekanan tersebut adalah adanya akumulasi *reactive oxygen species* (ROS) dalam tanaman, dimana hal tersebut dapat menghancurkan tanaman dan berakibat pada berkurangnya produktivitas tanaman. ROS berdampak pada fungsi seluler, seperti kerusakan pada asam nukleat atau oksidasi protein tanaman yang penting.

## **5. Respon Tumbuhan Terhadap Suhu**

Panas berlebihan dapat mengganggu dan akhirnya membunuh suatu tumbuhan dengan cara mendenaturasi enzim-enzimnya dan merusak metabolismenya dalam berbagai cara. Satu permasalahan yang dihadapi tumbuhan ketika temperature lingkungan turun adalah perubahan ketidakstabilan membrane selnya. Ketika sel itu didinginkan di bawah suatu titik kritis, membran akan kehilangan kecairannya karena lipid menjadi terkunci dalam struktur kristal. Keadaan ini mengubah transport zat terlarut melewati membrane dan juga memengaruhi fungsi protein membran.

Suhu sebagai faktor lingkungan dapat memengaruhi produksi tanaman secara fisik maupun fisiologis. Secara fisik, suhu merupakan bagian yang dipengaruhi oleh radiasi sinar matahari dan dapat diestimasi berdasarkan keseimbangan panas. Secara fisiologis, suhu dapat mempengaruhi pertumbuhan tanaman, fotosintesis, pembukaan stomata, dan respirasi. Selain itu, suhu merupakan salah satu penghambat dalam proses fisiologi untuk sistem produksi tanaman ketika suhu tanaman berada diluar suhu optimal terendah maupun tertinggi.

Salah satu fungsi transpirasi adalah pendinginan melalui penguapan. Pada hari yang panas, misalnya temperatur daun berkisar 3°C sampai 10°C di bawah suhu sekitar. Tentunya, cuaca panas dan kering juga cenderung menyebabkan kekurangan air pada banyak tumbuhan; penutupan stomata sebagai respon terhadap cekaman ini akan menghemat air, namun mengorbankan pendinginan melalui penguapan tersebut. Sebagian besar tumbuhan

## *Pengantar Fisiologi Tumbuhan*

memiliki respon cadangan yang memungkinkan mereka untuk bertahan hidup dalam cekaman panas. Di atas temperatur tertentu, misalnya sekitar 40°C pada sebagian besar tumbuhan yang menempati daerah empat musim, sel-sel tumbuhan mulai mensintesis suatu protein khusus dalam jumlah yang cukup banyak yang disebut protein kejut panas (*heat-shock protein*). Protein kejut panas ini kemungkinan mengapit enzim serta protein lain dan membantu mencegah denaturasi (Campbell, 2003).

Tumbuhan merespon cekaman dingin dengan cara mengubah komposisi lipid membrannya. Contohnya adalah meningkatnya proporsi asam lemak tak jenuh, yang memiliki struktur yang mampu menjaga membran tetap cair pada suhu lebih rendah dengan cara menghambat pembentukan kristal. Modifikasi molekuler seperti itu pada membran membutuhkan waktu beberapa jam hingga beberapa hari. Pada suhu di bawah pembekuan, kristal es mulai terbentuk pada sebagian besar tumbuhan. Jika es terbatas hanya pada dinding sel dan ruang antar sel, tumbuhan kemungkinan akan bertahan hidup. Namun demikian, jika es mulai terbentuk di dalam protoplas, Kristal es yang tajam itu akan merobek membran dan organel yang dapat membunuh sel tersebut. Beberapa tumbuhan asli di daerah yang memiliki musim dingin sangat dingin (seperti maple, mawar, rhodendron) memiliki adaptasi khusus yang memungkinkan mereka mampu menghadapi cekaman pembekuan tersebut. Sebagai contoh, perubahan dalam komposisi zat terlarut sel-sel hidup memungkinkan sitosol mendingin di bawah 0°C tanpa pembentukan es, meskipun Kristal es terbentuk dalam dinding sel.

## **6. Respon Tumbuhan terhadap Cekaman Cahaya**

Cahaya merupakan salah satu kunci penentu dalam proses metabolisme dan fotosintesis tanaman. Cahaya dibutuhkan oleh tanaman mulai dari proses perkecambahan biji sampai tanaman dewasa. Respon tanaman terhadap cahaya berbeda-beda antara jenis satu dengan jenis lainnya. Ada tanaman yang tahan (mampu tumbuh) dalam kondisi cahaya yang terbatas atau sering disebut tanaman toleran dan ada tanaman yang tidak mampu tumbuh dalam kondisi cahaya terbatas atau tanaman intoleran.

Kedua kondisi cahaya tersebut memberikan respon yang berbeda-beda terhadap tanaman, baik secara anatomis maupun secara morfologis. Tanaman yang tahan dalam kondisi cahaya terbatas secara umum mempunyai ciri morfologis yaitu daun lebar dan tipis, sedangkan pada tanaman yang intoleran akan mempunyai ciri morfologis daun kecil dan tebal. Kedua kondisi tersebut akan dapat menjadi faktor penghambat pertumbuhan tanaman apabila pemilihan jenis tidak sesuai dengan kondisi lahan, artinya tanaman yang toleran ketika ditanam di area yang cukup cahaya justru akan mengalami pertumbuhan yang kurang baik, begitu juga dengan tanaman intoleran apabila di tanam pada area yang kondisi cahaya terbatas pertumbuhan akan mengalami ketidaknormalan. Dengan demikian pemilihan jenis berdasarkan pada sifat dasar tanaman akan menjadi kunci penentu dalam keberhasilan pembuatan tanaman.

## **7. Respon Tumbuhan terhadap Herbivora**

Herbivora adalah suatu cekaman yang dihadapi tumbuhan dalam setiap ekosistem. Tumbuhan

## *Pengantar Fisiologi Tumbuhan*

menghadapi herbivora yang begitu banyak baik dengan pertahanan fisik, seperti duri, maupun pertahanan kimia, seperti produksi senyawa yang tidak enak atau bersifat toksik. Sebagai contoh beberapa tumbuhan menghasilkan suatu asam amino yang tidak umum yang disebut kanavanin yang dinamai berdasarkan salah satu sumbernya, jackbean (*Cannavalia ensiformis*). Kanavanin mirip arginin. Jika suatu serangga memakan tumbuhan yang mengandung kanavanin, molekul itu bergabung dengan protein serangga di tempat yang biasanya ditempati oleh arginin, yang dapat menyebabkan matinya serangga tersebut.

### **E. Soal Latihan**

1. Jelaskan pengertian stress fisiologi!
2. Sebutkan macam-macam bentuk cekaman abiotik!
3. Sebutkan dan jelaskan macam-macam mekanisme respon tumbuhan terhadap cekaman!
4. Sebutkan dan jelaskan tingkatan aklimatisasi dan adaptasi tumbuhan dalam menghadapi cekaman!
5. Sebutkan macam-macam bentuk respon tumbuhan terhadap cekaman kekeringan!

### **Tugas!**

Lengkapilah tabel di bawah ini!

<b>Jenis Cekaman/ Stress Fisiologi</b>	<b>Bentuk Respon Tumbuhan</b>

## DAFTAR PUSTAKA

---

---

- Advinda, L. 2018. *Dasar-Dasar Fisiologi Tumbuhan*. Yogyakarta: Deepublish.
- Campbell, Neil A. Jane B. Reece., dkk. 2008. *Biologi Campbell*. Jakarta: Erlangga.
- Glencoe. 2006. *Biology a Molecular Approach*. New York: BSCS.
- Harahap, F. 2012. *Fisiologi Tumbuhan: Suatu Pengantar*. Medan: UNIMED.
- Hopkins. G. William & Norman P.A.Honer. 2008. *Introduction to plant physiology 4th edition*, London: The University of Western Ontario.
- Jeff, H. G. B., dkk. 2012. *Beckers World of the Cell*. New York: Pearson Education.
- Kimball, John W. 1992. *Biologi Jilid 1*. Jakarta: Erlangga.
- Lakitan, B. 2018. *Dasar- dasar Fisiologi Tumbuhan*. Depok: Rajawali Pers.
- Lubis Y. A. 1999. *Tanaman Hias Rumah – Tuntunan Praktis Berkebun*. Jakarta: Gaya Favorit Press.

- Pujiwati, I. 2018. *Pengantar Fisiologi Tumbuhan*. Malang: Intimedia.
- Salisbury, F. B. & Ross, C. W. 1995. *Fisiologi Tumbuhan Jilid 3*. Bandung: ITB.
- Sasmitamihardja, D. & Arbayah H. S. 2009. *Dasar-Dasar Fisiologi Tumbuhan*. Jakarta: Erlangga.
- Sumenda, L., dkk. 2011. Analisis Kandungan Klorofil Daun Mangga (*Mangifera Indica* L.) pada tingkat Perkembangan yang Berbeda. *Jurnal Biologos*, 1 (1).
- Sutoyo. 2011. Fotoperiode dan Pembungaan Tanaman. *Buana Sains*, 11 (2): 137-138.
- Taiz, L. & Eduardo Z. 2002. *Plant Physiology 3rd ed*. English: Sinauer Associates
- Yahya. 2015. "Perbedaan Tingkat Laju Osmosis Antara Umbi *Solonum tuberosum* dan *Doucus carota*". *Biology Education*, 4 (1).

## BIOGRAFI PENULIS



Arbaul Fauziah, M. Si. Lahir di Nganjuk pada 10 Mei 1991, putri ke-empat dari Bapak Drs. H. A. Malik Bahri, M. Ag (Alm.) dan Ibu Umi Kulsum. Penulis menempuh pendidikan sekolah dasar di SDN Gondang I (1998-2004), SMPN 1 Pace (2004-2007), dan SMAN 2 Nganjuk (2007-2010). Selain itu, juga menempuh pendidikan non formal di Madrasah Salafiyah Bahrul Ulum, Ngaglik, Pace, Nganjuk (1998-2008). Pada tahun 2010 melanjutkan studi S1 dan lulus pada tahun 2014 dengan penelitian berjudul "Induksi Bawang Putih (*Allium sativum* L.) Tetraploid secara *In Vitro* dengan Kolkisin." Kemudian, pada tahun 2015 menempuh pendidikan pascasarjana (S2) dan lulus pada tahun 2017 dengan penelitian berjudul "Peningkatan Kandungan *Vetiver Oil* pada Kultur Kalus Akar Wangi (*Vetiveria zizanioides* (L.) Nash.) melalui Elisitasi dengan Ion Logam (Cd, Al, Pb) dan Karbohidrat (Pektin, Kitosan, Arabic Gum)." Baik studi S1 maupun S2 penulis tempuh di Jurusan Biologi Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Brawijaya Malang. Sembari menjalankan pendidikan di kampus, juga mendalami ilmu agama di Lembaga Tinggi Pesantren Luhur Malang (2010-2018). Penulis juga merupakan asisten dalam *Research Group* Biologi UB (2014-2018) dengan topik penelitian antara lain, "Pembuatan Preparat Kromosom Akar dan Kalus Bawang Putih (*Allium sativum* L.) (2014), Analisis Kromatografi Lapis Tipis pada Kalus *Vetiveria zizanioides* (L.) Nash. Hasil Elisitasi dengan Ion Logam (2017), dan Perbanyakkan Klonal Tanaman Akar Wangi (*Vetiveria zizanioides*) melalui Kultur Jaringan (2017-2018)."

Sejak tahun 2018 sebagai dosen Tadris Biologi UIN Sayyid Ali Rahmnatullah Tulungagung hingga sekarang. Beberapa mata kuliah yang diampu yaitu Biologi Umum, Fisiologi Tumbuhan, Botani Cryptogamae, Botani Phanerogamae, dan Sains dalam Al-Qur'an. Beberapa penelitian di bidang Biologi yang telah dilakukan antara lain, "Analisis Tipe Stomata pada Daun Dikotil dan Monokotil (2018), Analisis Tipe Stomata pada Daun Tumbuhan Paku (Pteridophyta) (2019), Analisis Gerak Fotonasti dan Niktinasti Bunga Pukul Sembilan (*Portulaca grandiflora*), Tumbuhan Ketepeng Cina (*Cassia alata*), dan Turi Putih (*Sesbania grandiflora*) (2020), dan Keanekaragaman Tumbuhan Obat Gangguan Saluran Pernapasan di Bukit Kapur Kabupaten Gresik Jawa Timur (2021)." Alhamdulillah berkat dukungan suami (Ahmad Fahrudin, M.Pd.I), penulis aktif dalam kegiatan akademik maupun non akademik. Penulis dapat dihubungi melalui email [arbaulfauziah@gmail.com](mailto:arbaulfauziah@gmail.com).