

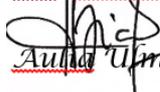
**TUGAS AKHIR  
MODUL & RENCANA PEMBELAJARAN SEMESTER (RPS)**

**MATA KULIAH :  
FISIOLOGI TUMBUHAN**

**DISUSUN OLEH :  
ROHMAT AFRIZAL  
NPM : 1311060253**

*ACC KE PBB 1 (29-9-2020)*

*a.n. Rohmat Afrizal*

* Aulia Ulmillah, M.Sc.*

**KOORDINATOR TIM PEMBINA MATA KULIAH :  
Dr. Eko Kuswanto, M. Si.**

**DOSEN PENGAMPU :  
Aulia Ulmillah, M. Sc.**



**UNIVERSITAS ISLAM NEGERI RADEN INTAN LAMPUNG  
FAKULTAS TARBIYAH DAN KEGURUAN  
PENDIDIKAN BIOLOGI  
2020**

## KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Dengan mengucap puji dan syukur kepada Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah-Nya yang telah diberikan kepada saya sehingga dapat menyelesaikan penelitian ini. Dan tidak lupa kita panjatkan shalawat serta salam kepada junjungan kita Nabi Muhammad SAW, yang menjadi suri tauladan yang baik bagi umatnya dan untuk berbuat kebaikan.

Tugas akhir yang berupa MODUL & RENCANA PEMBELAJARAN SEMESTER (RPS) ini disusun sebagai salah satu syarat kelulusan bagi setiap mahasiswa Universitas Islam Negeri Raden Intan Lampung. Selain itu juga merupakan bukti bahwa mahasiswa telah menyelesaikan kuliah jenjang program Strata-1 dan untuk memperoleh gelar Sarjana Pendidikan Biologi.

Penyusunan Tugas akhir ini dapat selesai dengan baik karena tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Untuk itu saya ucapkan terimakasih sebesar-besarnya kepada:

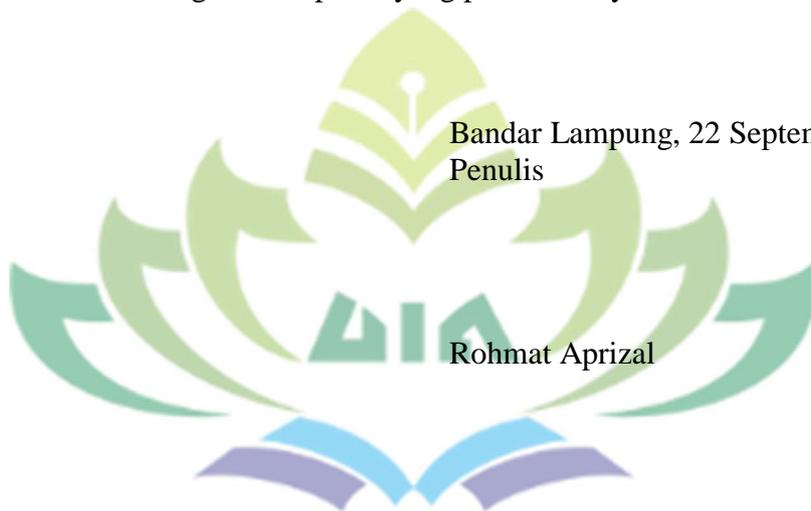
1. Allah SWT yang telah memberikan kesehatan dan kemudahan dalam menulis tugas akhir ini.
2. Muhammad SAW sebagai suri tauladan, dan panutan bagi umat manusia.
3. Bapak Prof. Dr. H. Mukri, M.Ag. selaku Rektor UIN Raden Intan Lampung.
4. Bapak Dr. Eko Kuswanto, M.Si. selaku Ketua Progam Studi Pendidikan Biologi UIN Raden Intan Lampung.
5. Ibu Aulia Ulmillah, M.Sc. selaku Pembimbing Karya Tulis saya selama mengerjakan tugas akhir ini.

6. Kedua orang tua saya yang telah memberi berbagai macam bantuan baik secara dorongan doa, motivasi, moral dan materi, dan
7. Semua pihak yan tidak dapat disebutkan satu-persatu yang telah membantu saya untuk menyelesaikan tugas akhir ini.

Penulis tentunya menyadari bahwa pembuatan tugas akhir ini masih banyak kekurangan dan kelemahan. Oleh karena itu peneliti berharap kepada semua pihak agar dapat menyampaikan kritik dan saran yang membangun untuk menambah kesempurnaan skripsi ini. Namun peneliti tetap berharap tugas akhir ini akan bermanfaat bagi semua pihak yang pembacannya.

Bandar Lampung, 22 September 2020  
Penulis

Rohmat Aprizal



## DAFTAR ISI

<b>COVER .....</b>	<b>i</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>ii</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>iv</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>viii</b>
<b>BAB 1.PENDAHULUAN</b>	
A. Pengertian dan Ruang Lingkup Fisiologi Tumbuhan .....	2
B. Pembagian Fisiologi Tumbuhan .....	2
C. Hubungan Fisiologi Tumbuhan dengan Cabang Botani Lainnya .....	3
<b>Soal evaluasi 1 .....</b>	<b>5</b>
<b>BAB 2. MEMBRAN DAN ORGANEL SEL</b>	
A. Struktur dan Senyawa Penyusun Membran .....	6
1. Makromolekul Utama .....	7
2. Karbohidrat .....	7
3. Lipida .....	8
4. Protein .....	8
5. Asam Nukleat .....	8
B. Fungsi Membran .....	9
C. Struktur dan Fungsi Kloroplas .....	10
D. Struktur dan Fungsi Mitokondria .....	11
E. Organel Sel Lainnya.....	11
<b>Soal evaluasi 2 .....</b>	<b>12</b>
<b>BAB 3. KARAKTERISTIK MOLEKUL AIR, SERAPAN DAN PENGANGKUTAN AIR</b>	
A. Struktur Molekul Air dan Ikatan Hidrogen .....	13
B. Karakteristik Molekul Air .....	13
C. Air Sebagai Pelarut .....	14
D. Ionisasi Air dan Skala Ph .....	14
E. Anatomi Akar.....	15
F. Konsep Apoplas dan Simplas.....	16

G. Pengangkutan Air di dalam Pembuluh Xilem.....	17
<b>Soal evaluasi .....</b>	<b>18</b>
<b>BAB 4. TRANSPIRASI</b>	
A. Pengertian Transpirasi.....	19
B. Fungsi Transpirasi Bagi Tumbuhan.....	19
C. Pengetian dan Anatomi Stomata .....	20
D. Mekanisme Kerja Stomata .....	21
E. Pengaruh Asam Absitat.....	21
<b>Soal evaluasi 4 .....</b>	<b>23</b>
<b>BAB 5. UNSUR HARA ESENSIAL TUMBUHAN</b>	
A. Pengertian Unsur Hara Esensial.....	24
B. Pengukuran Konsentrasi dalam Jaringan Tumbuhan.....	24
C. Fungsi Unsur Hara Esensial .....	25
D. Gejala Kekurangan Unsur Hara .....	27
<b>Soal evaluasi 5 .....</b>	<b>28</b>
<b>BAB 6. UTS (Ujian Tengah Semester)</b>	
<b>BAB 7. ENZIM</b>	
A. Metabolisme Aksi Enzim.....	30
B. Komposisi Kimia dan Struktur 3-Dimensi Enzim .....	30
C. Gugus Prostetik, Koenzim, dan Vitamin.....	31
D. Kompartementasi Enzim.....	32
E. Fungsi Spesifik dan Nomenklatur Enzim .....	33
F. Enzim Tidak Berperan Bolak-Bali.....	33
G. Isozim.....	34
H. Pengaruh Denaturasi Terhadap Aktivitas Enzim .....	34
I. Mekanisme Aksi Enzim .....	35
J. Enzim Alosterik dan Kendali Umpan-Balik .....	36
K. Pengaruh Konsentrasi Substrat dan Konsentrasi Enzim .....	37
L. Pengaruh pH.....	37

M. Pengaruh Produk Reaksi .....	38
N. Pengaruh Unsur atau Senyawa Penghambat Enzim.....	38
<b>Soal evaluasi 7.....</b>	<b>40</b>
<b>BAB 8. FOTOSINTESIS</b>	
A. Prinsip Penyerapan Cahaya Oleh Tumbuhan.....	41
B. Efek Penambahan Emerson.....	42
C. Komposisi, Fungsi, dan Posisi PS I dan Ps II.....	43
D. Pengangkutan Elektron dari Air ke NADP+ .....	43
E. Fotofosforilasi .....	44
F. Fiksasi Karbon Dioksida .....	45
G. Siklus Calvin .....	46
H. Lintasan Asam Dikarboksilat C-4.....	47
I. Metabolisme Asam Crassulacean .....	48
J. Sintesis Sukrosa, Pati, dan Fruktan .....	49
K. Faktor Genetik.....	49
L. Faktor Lingkungan .....	50
M. Laju Fotosintesis, Efisiensi, dan Produksi Tanaman .....	50
<b>Soal evaluasi 8 .....</b>	<b>52</b>
<b>BAB 9. RESPIRASI</b>	
A. Kuosien Respirasi.....	53
B. Pembentukan Gula Heksosa.....	54
C. Glikolisis .....	55
D. Fermentasi .....	56
E. Siklus Krebs .....	56
F. Sistem Pengangkutan Elektron dan Fosforilasi Oksidatif.....	57
G. Efisiensi Respirasi.....	58
H. Lintasan pentosa Fosfat.....	59
I. Senyawa Antara Reaksi Respirasi dan Sintesis Makromolekul.....	60
J. Faktor-faktor yang Mempengaruhi Respirasi .....	60
<b>Soal evaluasi 9.....</b>	<b>62</b>

**BAB 10. UAS (UJIAN AKHIR SEMESTER)**

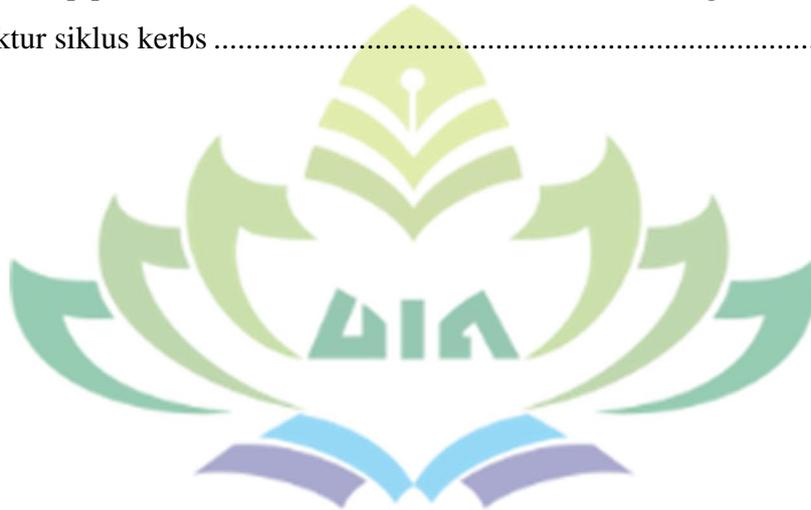
**DAFTAR PUSTAKA**

**BIODATA PENULIS**



## DAFTAR GAMBAR

2.1 Struktur Membran berdasarkan <i>fluid mozaic</i> model .....	6
2.2 Diagram skematik 4 model pergerakan air menembus internal pada kloroplas.....	10
2.3 Interpretasi 3 dimensi tata letak membran internal pada kloroplas.....	11
2.4 Rekaan struktur ideal mitokondria .....	12
3.1 Penampang melintang akar tanaman dikotil .....	16
3.2 Skema lintasan radial pergerakan air pada akar.....	17
7.1 Struktur 3-Dimensi Enzim. ....	31
7.2 Diagram energi reaksi metabolik dengan atau tanpa peranan enzim.....	35
8.1 Tiga tahap pada Siklus Calvin: karboksilasi, reduksi dan regenerasi .....	46
9.1 struktur siklus kerbs .....	57



## **BAB I**

### **PENDAHULUAN**

Deskripsi Modul pembelajaran Fisiologi Tumbuhan ini merupakan panduan belajar bagi mahasiswa Pendidikan Biologi yang berisikan materi mengenai Membran dan organel sel, Karakteristik molekular, Tranpirasi, Unsur hara esensial tumbuhan, Enzim, Fotosistesi dan Respirasi yang disusun sedemikian rupa dan diharapkan dapat memberikan penguatan bagi Mahasiswa dalam kegiatan perkuliahan yang terselenggara.

Modul ini dapat dipakai khususnya disemester awal-awal dimana mata kuliah biokimia diselenggarakan di Prodi Biologi. Petunjuk Penggunaan Modul Sebelum anda mempelajari modul ini, sebaiknya anda membaca terlebih dahulu petunjuk penggunaan berikut:

1. Pada modul ini, disediakan materi per bab dan setiap bab terdapat sub bab agar memudahkan mahasiswa dalam mencari dan memahami materi yang disediakan.
2. Mata kuliah ini memiliki alokasi waktu 150 menit disetiap pertemuan yang terbagi atas 16 kegiatan perkuliahan. Pembagian kegiatan perkuliahan tersebut telah disesuaikan dengan alur implementasinya sehingga pemahaman satu materi akan sangat penting sebagai modal anda dalam memahami kegiatan perkuliahan berikutnya.
3. Pada setiap akhir kegiatan perkuliahan, terdapat tes formatif yang disediakan guna menguji tingkat pemahaman anda setelah memperoleh pengajaran. Jawablah setiap pertanyaan dalam tes tersebut, dan nilai yang

anda peroleh agar dijadikan sebagai umpan balik untuk menilai lagi apakah materi dalam kegiatan belajar sudah anda kuasai dengan baik atau belum.

### **Tujuan Pembelajaran**

1. Mahasiswa mampu memahami konsep Fisiologi Tumbuhan yang meliputi Membran dan organel sel, Karakteristik molekular, Tranpirasi, Unsur hara esensial tumbuhan, Enzim, Fotosintesis dan Respirasi serta mengaplikasikannya dalam menyelesaikan masalah dan menerapkan dalam kehidupan sehari-hari.
2. Mahasiswa mampu memahami teori, konsep, substansi dan proses Fisiologi Tumbuhan dengan mengimplementasikan dalam praktikum uji zat makanan secara kualitatif dan mampu bekerjasama dalam tim.

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

Fisiologi tumbuhan ialah salah satu ilmu cabang biologi yang mempelajari tentang proses metabolisme yang terjadi di dalam tubuh tumbuhan yang menyebabkan tumbuhan tersebut bisa hidup.

Dengan mempelajari fisiologi tumbuhan, kita akan dapat memahami bagaimana sinar matahari dimanfaatkan oleh tumbuhan untuk menghasilkan karbohidrat dari bahan baku organik berupa karbondioksida dan air.

## **B. Pembagian Fisiologi Tumbuhan**

Pembagian fisiologi tumbuhan karena perkembangannya sangat pesat yang di topang juga oleh perkembangan ilmu kimia dan fisika, maka fisiologi tumbuhan sering di pilah-pilah menjadi beberapa cabang sesuai dengan ruang lingkup pokok bahasan , antara lain:

### **1. Fisiologi Tanaman**

Cabang fisiologi ini mengkaji proses-proses metabolisme pada tanaman budi daya, jadi tidak termasuk tumbuhan yang tergolong monera, protista, dan jenis-jenis fungi serta tumbuhan tingkat tinggi yang tidak di budidayakan.

### **2. Fisiologi Lepas Panen**

Cabang fisiologi tumbuhan ini menelaah tentang proses fisiologi yang terjadi pada organ hasil setelah organ tersebut di panen. Reaksi-reaksi yang terjadi umumnya bersifat katabolic yakni pengurangan senyawa-senyawa ber molekul besar atau lebih besar seperti pati, selulosa, protein, lemak dan asam nukleat menjadi senyawa-senyawa bermolekul kecil atau menjadi lebih sederhana.

### **3. Ekofisiologi**

Cabang ini membahas tentang pengaruh faktor-faktor lingkungan terhadap berbagai proses metabolisme tumbuhan, mencakup pengaruh positif(menguntungkan) dan negatif(merugikan) bagi tumbuhan dan kepentingan manusia.

#### **4. Fisiologi Benih**

Cabang ini merupakan cabang fisiologi tumbuhan yang ruang lingkupnya pembahasannya terbatas pada proses-proses yang berlangsung pada tahapan-tahapan perkecambahan benih seperti imbibisi, reaktivasi enzim, penguraian bahan simpanan dan pertumbuhan radikel.

#### **C. Hubungan Fisiologi Tumbuhan Dengan Cabang Botani Lainnya.**

Meluasnya pokok bahasan dalam berbagai bidang ilmu menyebabkan banyak terjadi daerah tumpang tindih antara ilmu yang satu dengan ilmu yang lain, demikian pula yang terjadi antara fisiologi tumbuhan dengan beberapa bidang ilmu lainnya terutama cabang botani. Besarnya porsi daerah tumpang tindih ini di sertai dengan pentingnya daerah tumpang tindih yang menyebabkan perkembangan cabang ilmu baru dan di sebut sebagai ekofisiologi atau fisiologi lingkungan (environmental physiology).

Dari 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 yakni ilmu kimia dan fisika.

**Soal Evaluai 1**

1. Uraikan contoh fisiologi tumbuhan yang di terapkan dalam pertanian?
2. Jelaskan pengertian fisiologi tumbuhan beserta fungsinya?
3. Uraikan hubungan fisiologi tumbuhan dengan cabang botani lainnya?



## BAB II

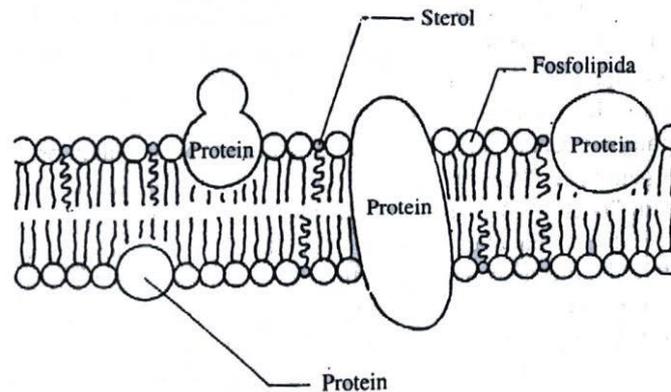
### MEMBRAN DAN ORGANEL SEL

#### A. Struktur Dan Senyawa Penyusun Membran

Pengamatan dengan mikroskop umumnya membran mempunyai ketebalan antara 7,5 nm sampai 10,0 nm. Senyawa utama penyusun membran adalah protein dan lipida. Protein mencapai setengah sampai 2/3 dari total berat kering membrane tersebut. Jenis dan proporsi molekul protein dan lipida yang terkandung pada membranakan beragam tergantung

jenis membran dan kondisi fisiologis dari sel yang bersangkutan. Perbedaannya dapat di lihat antaramembran plasma, kloroplas, reticulum endoplasma, diktiosom, kloroplas, inti sel, mitokondria, peroksisom, dan glioksisom. Komposisi protein dan lipida pada membran juga berbeda antara spesies satu dengan yg lain. Walaupun demikian jenis lipida yang umum di jumpai adalah fosfolipida, glikolipida, dan sterol.

Komponen membran esensial lainnya adalah  $Ca^{2+}$ , dimana tanpa ion in membran akan kehilangan kemampuannya untuk memngangkut bahan- bahan terlarut kedalam sitoplasma atau organel-organel sel.



**Gambar 2.1.**  
Struktur membran berdasarkan fluid mozaic model.

Pada gambar terlihat 2 lapisan lipida dengan bagian kepala yang bersifat hidrofilik berada pada permukaan dan bagian ekor yang bersifat hidrofobik berada pada bagian internal. Bulatan besar yang tampak menempel atau terbenam di beberapa posisi adalah molekul protein.

### 1. Makro molekul Utama

Senyawa organik dan anorganik yang terkandung dalam sel sangat beragam. Keberadaan senyawa-senyawa tersebut di dalam sel tidak selalu berarti bahwa senyawa tersebut adalah komponen penyusun sel. Sebagian dari senyawa-senyawa tersebut merupakan bahan baku untuk sintesis senyawa lainnya atau digunakan dalam metabolisme tumbuhan yang diterimanya dari sel-sel tetangganya atau diterima dari jaringan pembuluh. Senyawa-senyawa bahan baku ini umumnya adalah senyawa anorganik sederhana dengan berat molekul kecil.

### 2. Karbohidrat

Karbohidrat hanya tersusun dari 3 jenis unsur, yakni karbon, hidrogen, dan oksigen. Rumus umum karbohidrat adalah  $(CH_2O)_n$ . Dasar-dasar siklus

Tumbuhan Contoh senyawa karbohidrat adalah gula, pati, dan selulosa. Satuan unit terkecil penyusun setiap karbohidrat adalah monosakarida atau disebut sebagai gula sederhana yang hanya mengandung 3 sampai 7 atom karbon.

### **3. Lipida**

Seperti karbohidrat, lipida juga tersusun dari atom-atom karbon, hidrogen, dan oksigen, tetapi lemak selalu memiliki porsi atom hidrogen yang lebih banyak dibanding pada molekul karbohidrat. Selain itu, untuk satuan bobot yang sama, energi yang terkandung dalam molekul lipida lebih dari 2 kali lipat dari yang terkandung dalam karbohidrat. Lemak disintesis dari gliserol dan asam-asam lemak. Di dalam sel, gliserol disintesis dari glukosa.

Asam lemak yang paling sederhana adalah asam asetat. Gugus karboksil (-COOH) merupakan ciri dari molekul asam-asam organik. Secara umum, asam lemak diberi simbol R-COOH, di mana R merupakan bagian yang beragam dari asam lemak. Jenis asam lemak yang banyak terkandung pada tumbuhan.

### **4. Protein**

Molekul protein berukuran lebih besar dibanding karbohidrat dan lipida. Molekul protein terdiri dari ribuan atom. Satuan dasar penyusun protein adalah asam amino. Setiap molekul asam amino paling tidak mengandung karbon, hidrogen, oksigen, dan nitrogen, serta kadang juga mengandung belerang. Sintesis protein merupakan proses perangkaian asam-asam amino

sehingga membentuk suatu rantai yang panjang. Rantai asam amino ini disebut polipeptida.

## 5. Asam Nukleat

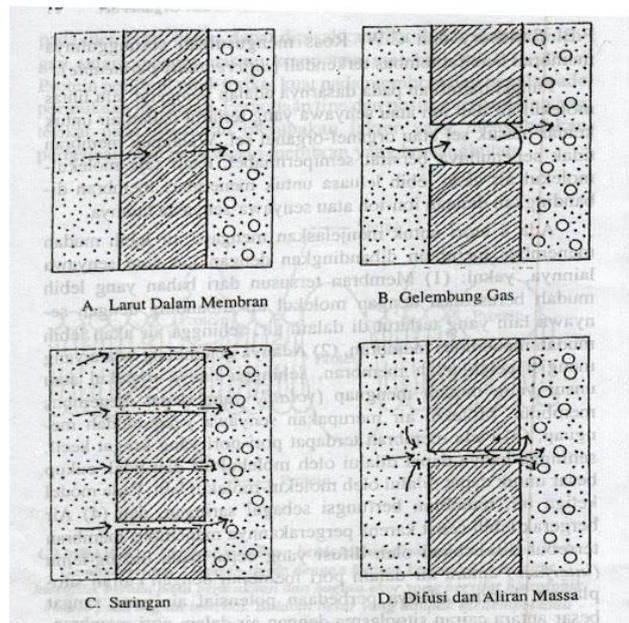
Asam nukleat terdiri dari 2 jenis, yakni asam (RNA) dan asam deoksiribonukleat (DNA). Masing-masing tersusun dari molekul yang disebut nukleotida. Nukleotida terbentuk dari asam fosfat, gula pentosa, dan senyawa basa purin (adenin dan guanin) atau basa pirimidin (timin dan sitosin).

Nukleotida RNA mengandung gula ribosa, sedangkan nukleotida DNA mengandung gula deoksiribosa yang memiliki kurang satu atom oksigen dibanding ribosa. RNA dijumpai pada seluruh bagian sel, di mana RNA berperan dalam sintesis protein, sedangkan DNA hanya dijumpai pada inti sel. DNA merupakan bagian utama khromosom.

## B. Fungsi Membran

Membran sering dikatakan bersifat semipermeabel, berarti molekul air dapat menembus membran tersebut, sedangkan bahan-bahan terlarut dalam air tidak bisa menembus membran tersebut. Ada kenyataannya bersama molekul-molekul air akan pula ikut ion atau senyawa tertentu yang larut di dalamnya dan bergerak menembus membran.

Fungsi membran pada dasarnya adalah mengatur lalu lintas molekul air dan ion atau senyawa yang terlarut dalam air untuk keluar masuk sel atau organel-organel sel.



**Gambar 2.2**

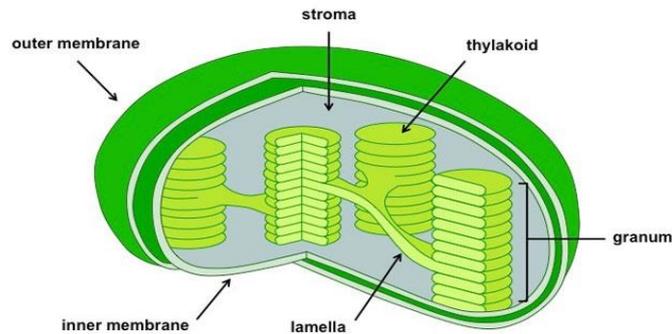
Diagram skematik 4 model pergerakan air menembus membran.

Titik-titik hitam merupakan simbol molekul air dan bulatan kosong merupakan simbol bahan-bahan yang terlarut dalam air.

### C. Struktur Dan Fungsi Kloroplas

Kloroplas merupakan plastid yang mengandung pigmen hijau yang disebut klorofil. Kloroplas terbungkus oleh membran ganda, dimana membran sebelah dalam (internal) tidak berlipat-lipat seperti halnya membran internal pada mitokondria.

Pada membran internal kloroplas terdapat pigmen fotosintesis. Pigmen ini banyak terdapat pada permukaan luar membran internal yang disebut tilakoid yang berbentuk bulat-pipih seperti kantong. Fungsi vital dari kloroplas adalah sebagai tempat berlangsungnya fotosintesis.



**Gambar 2.3**

Interprestasi 3-dimensi tata letak membran internal pada kloroplas.

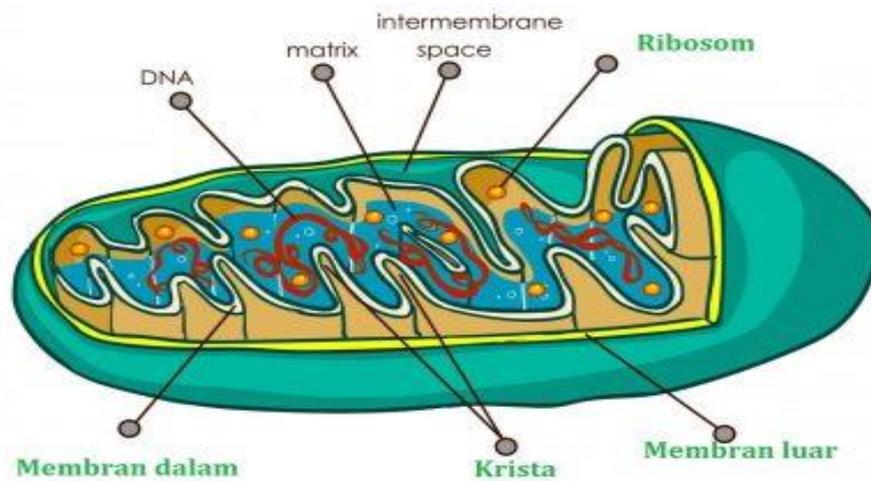
#### **D. Struktur Dan Fungsi Mitokondria**

Setiap sel tumbuhan yang hidup mengandung sekitar 20 mitokondria. Dalam sel tumbuhan mitokondria ditemukan dalam bentuk dan ukuran yang beragam, dapat berbentuk bulat atau memanjang dengan diameter 0,5-1,0 mikro meter dan panjangnya 1-4 mikro meter. Fungsi mitokondria menjaga konsentrasi ion kalsium yang terdapat berbagai kompartemen sel.

#### **E. Organel sel lainnya**

Ribosom banyak di jumpai dalam sel, ada yang melekat pada membran retikulum endoplasma, ada yang berada bebas dalam sitoplasma sel, dan ada yang melekat pada permukaan luar membran inti sel, diameter ribosom antara 15-25 nm.

Ribosom sering menempel satu sama lain membentuk rantai yang disebut poliribosom atau polisom. Fungsi ribosom adalah dalam sintesis protein. Ribosom kecil terdapat dalam mitokondria dan kloroplas, ribosom kecil berperan mensintesis protein dalam organel ini, tetapi tidak semua protein dalam organel tersebut hasil sintesis pada ribosom kecil.



**Gambar 2. 4**

Rekaan struktur ideal mitokondria. Pada gambar diperlihatkan lipatan-lipatan membran internal yang disebut cristae.



### Soal Evaluasi 2

1. Sebutkan dan jelaskan secara singkat senyawa penyusun membran?
2. Sebutkan fungsi membran mitokondria?
3. Sebutkan stuktur dan fungsi kloroplas?

### **BAB III**

## **KARAKTERISTIK MOLEKUL AIR DAN SERAPAN PEGANGKUT AIR**

#### **A. Struktur Molekul Air Dan Ikatan Hidrogen**

Proses fisiologi yang berlangsung pada tumbuhan banyak berkaitan dengan air atau bahan-bahan (senyawa atau ion) yang terlarut di dalam air. Oleh sebab itu, untuk mempelajari fisiologi perlu dipahami terlebih dahulu sifat fisika dan kimia molekul air.

Air merupakan suatu molekul yang sederhana, terdiri dari 1 atom oksigen (O) dan 2 atom hidrogen (H), sehingga berat molekulnya hanya 18 g/mol. Terlepas dari kesederhanaan komposisi atom penyusunnya dan ukuran molekulnya yang kecil, molekul air mempunyai beberapa karakteristik yang unik. Karakteristik tersebut disebabkan karena rangkaian kedua atom H pada atom O (yang berada di tengah) tidak membentuk garis lurus. Rangkaian ini membentuk sudut  $105^\circ$

#### **B. Karakteristik Molekul Air**

Berbentuk cair pada suhu ruang. Semakin besar ukuran molekul suatu senyawa, maka pada suhu ruang senyawa tersebut akan cenderung berbentuk cair atau padat, sebaliknya jika ukuran molekulnya kecil, maka akan cenderung berbentuk gas atau cair. Hidrokarbon bermolekul kecil (methana, ethana, propana, dan butana) semua berbentuk gas pada suhu kamar.

Berat molekul dari senyawa-senyawa hidrokarbon ini berturut-turut adalah 16, 30, 44, dan 58 g/mol. Karbondioksida dengan berat molekul 44 g/mol juga berbentuk gas pada suhu ruang. Tetapi, air dengan berat molekul hanya 18 g/mol, berbentuk cair pada suhu ruang.

### **C. Air Sebagai Pelarut**

Air dapat melarutkan lebih banyak jenis bahan kimia dibandingkan dengan zat cair lainnya. Sifat ini disebabkan karena air memiliki konstanta dielektrik yang paling tinggi. Konstanta dielektrik merupakan ukuran dari kemampuan untuk menetralkan daya tarik-menarik antara molekul atau atom yang bermuatan listrik berbeda. Oleh sebab itu, air merupakan pelarut yang sangat baik untuk ion-ion bermuatan positif maupun negatif.

Sisi positif molekul air dapat mengikat anion sedangkan sisi negatifnya akan mengikat kation, sehingga molekul-molekul air seolah membentuk pembungkus bagi ion-ion tersebut. Fenomena ini menyebabkan ion-ion tersebut tidak dapat menyatu untuk membentuk kristal atau endapan. Jika air mengandung elektrolit (ion) yang terlarut, maka larutan ini akan bermuatan listrik. Dengan demikian, akan menjadi konduktor yang baik bagi aliran arus listrik. Akan tetapi air murni merupakan konduktor yang buruk, karena ikatan hidrogen antara molekul air terlalu tahan terhadap aliran listrik.

### **D. Ionisasi Air Dan Skala Ph**

Beberapa molekul air dipecah menjadi ion hidrogen ( $H^+$ ) dan ion hidroksil ( $OH^-$ ). Kemungkinan untuk ion-ion ini bergabung tergantung pada

kesempatan bagi ion-ion tersebut untuk berada pada posisi berdekatan (collision), berarti tergantung pada jumlah ion-ion ini dalam larutan. Secara matematis, hasil perkalian antara konsentrasi  $H^+$  dan  $OH^-$  (dalam satuan molar) adalah konstan, yakni:  $[H^+].[OH^-] = k$ . Pada suhu kamar,  $k = 10^{-14}$ . Pada air murni,  $[H^+]$  dan  $[OH^-]$  masing-masing adalah  $10^{-7}$  molar (M).

Secara alamiah, air sangat jarang mengandung  $H^+$  dan  $OH^-$  dalam konsentrasi yang sama. Berdasarkan konsentrasi  $H^+$  dalam larutan, dikembangkan skala pH yang mencerminkan tingkat keasaman larutan yang bermanfaat dalam studi fisiologi tumbuhan maupun bidang ilmu lainnya. Keasaman larutan (pH) dihitung dengan rumus berikut:  $pH = -\log [H^+]$ .

#### **E. Anatomi Akar**

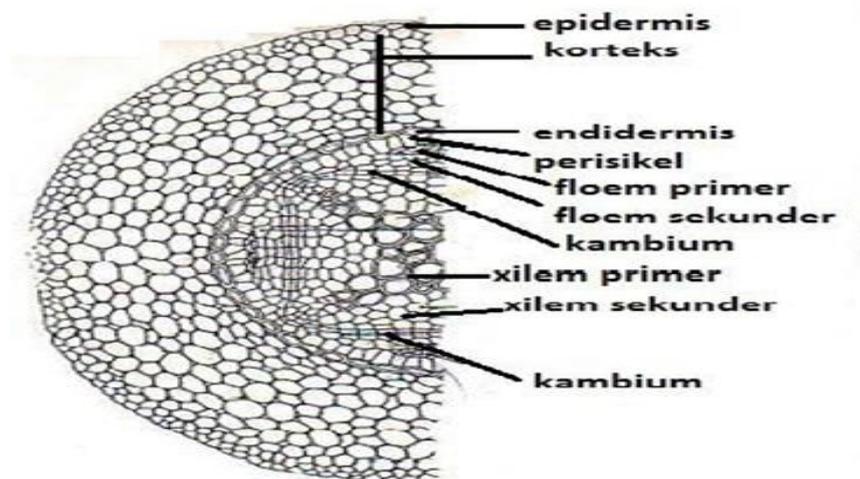
Air diserap tanaman melalui akar bersama-sama dengan unsur-unsur hara yang terlarut di dalamnya, kemudian diangkut ke bagian atas tanaman, terutama daun, melalui pembuluh xilem. Pembuluh xilem pada akar, batang, dan daun merupakan suatu sistem yang kontinu, berhubungan satu sama lain.

Untuk dapat diserap oleh tanaman, molekul-molekul air harus berada pada permukaan akar. Dari permukaan akar ini air (bersama bahan-bahan yang terlarut) diangkut menuju pembuluh xilem. Lintasan pergerakan air dari permukaan akar menuju pembuluh xilem ini disebut lintasan radial pergerakan air.

Untuk memahami lintasan radial pergerakan air, dirasakan perlu untuk mengulas kembali anatomi dan perkembangan akar. Posisi pembuluh xilem umumnya berdampingan dengan pembuluh floem. Pada waktu jaringan akar

berkembang, sel-sel antara xilem dan floem membentuk kambium vaskular yang menghasilkan jaringan xilem ke arah dalam dan membentuk jaringan floem ke arah luar.

Xilem dan floem dikelilingi oleh satu lapisan sel-sel yang hidup yang disebut perisikel. Jaringan vaskular dan perisikel membentuk suatu tabung yang disebut stele. Di sebelah luar stele terdapat sel-sel endodermis.



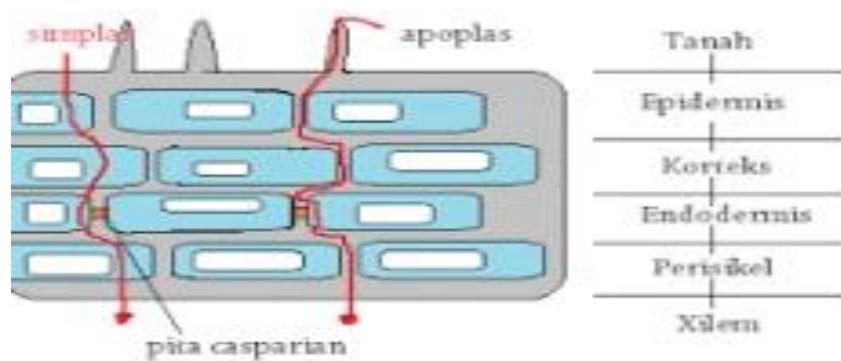
**Gambar 3.1**  
Penampang melintang akar tanaman dikotil.

#### **F. Konsep Apoplas Dan Simplas**

Konsep dan istilah apoplas (apoplast) dan simplas (symplast) pertama diperkenalkan oleh E. Munch dari Jerman pada tahun 1930. Beliau mengemukakan bahwa dinding sel dari keseluruhan bagian tanaman dan pembuluh xilem dapat dianggap sebagai suatu sistem tunggal yang disebut sebagai apoplas.

Pada dasarnya bagian apoplas ini merupakan bagian yang "mati" dari tanaman. Kecuali pada bagian Pita Casparian pada sel-sel endodermis, air (bersama bahan yang terlarut didalamnya) dapat bergerak sepenuhnya pada

bagian apoplas ini. Bagian tanaman lainnya (selain dinding sel dan pembuluh) merupakan bagian yang hidup dari tanaman. Munch menyebutnya sebagai bagian simplas.



**Gambar 3.2**

Skema lintasan radial pergerakan air pada akar.

### G. Pengangkutan Air Didalam Pembuluh Xilem

Kalau di bayangkan jarak vertikal yang harus di tempuh oleh air dari perakaran tanaman didalam tanah sampai kedaun tanaman pada posisi tertinggi, maka jarak tersebut dapat mencapai 100 meter atau lebih. Teori Tekanan Akar. Pada awalnya, diperkirakan air naik ke bagian atas tanaman karena adanya tekanan dari akar. Hal ini didasarkan atas fakta bahwa jika batang tanaman dipotong dan kemudian dihubungkan dengan selang manometer air raksa, maka air di dalam selang akan terdorong ke atas oleh tekanan yang berasal dari akar.

Tetapi dari hasil pengukuran yang intensif pada berbagai jenis tanaman, maka besarnya tekanan tersebut umumnya tidak lebih dari 0,1 MPa (mega pascal). Selain itu tekanan akar hanya teramati pada kondisi tanah yang berkecukupan air dan kelembaban udara relatif tinggi, atau dengan kata lain pada saat laju transpirasi sangat rendah.

**Soal Evaluasi 3**

1. Jelaskan mekanisme pengangkutan air dari tanah ke daun?
2. Jelaskan apa yang dimaksud dengan konsep apoplas dan simplas?
3. Jelaskan apa yang dimaksud dengan air sebagai pelarut?



## **BAB IV**

### **TRANSPIRASI**

#### **A. Pengertian Transpirasi**

Transpirasi dapat diartikan sebagai proses kehilangan air dalam bentuk uap dari jaringan tumbuhan melalui stomata. Kemungkinan kehilangan air dari jaringan tanaman melalui bagian tanaman yang lain dapat saja terjadi, tetapi porsi kehilangan tersebut sangat kecil dibandingkan dengan yang hilang melalui stomata. Oleh sebab itu, dalam perhitungan besarnya jumlah air yang hilang dari jaringan tanaman umumnya difokuskan pada air yang hilang melalui stomata.

Proses transpirasi berlangsung selama tumbuhan hidup. Peneliti di Utah State University berhasil menghitung berapa banyak jumlah air yang hilang melalui transpirasi pada tanaman jagung mulai dari berkecambah sampai panen. Jumlah air yang hilang melalui transpirasi pada tanaman jagung adalah setara dengan total 450 mm curah hujan, atau untuk menghasilkan 1 kg berat kering tanaman jagung dibutuhkan 225 kg air yang hilang melalui transpirasi.

#### **B. Fungsi Transpirasi Bagi Tumbuhan**

Kelihatannya transpirasi tidak mempunyai keuntungan atau finesi bagi tumbuhan. Ambil contoh tumbuhan yang hidup di dalam air, misalnya berbagai jenis ganggang. Kelompok tumbuhan ini tidak melakukan transpirasi tetapi dapat tumbuh dan berkembang secara normal. Di dalam terrarium, kelembaban nisbi adalah 100%. Dengan demikian, laju transpirasi akan sangat rendah sekali

(jika ada), tetapi berbagai jenis tumbuhan dapat tumbuh dan berkembang dengan baik di dalam terrarium.

Walaupun beberapa jenis tumbuhan dapat hidup tanpa melakukan transpirasi, tetapi jika transpirasi berlangsung pada tumbuhan agaknya dapat memberikan beberapa keuntungan bagi tumbuhan tersebut, misalnya dalam (i) mempercepat laju pengangkutan unsur hara melalui pembuluh xilem, (ii) menjaga turgiditas sel tumbuhan agar tetap pada kondisi optimal, dan (iii) sebagai salah satu cara untuk menjaga stabilitas suhu daun.

Walaupun dari beberapa hasil pengujian didapatkan bahwa pengangkutan unsur hara tetap dapat 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.

### **C. Pengertian Dan Anatomi Stomata**

Bentuk dan posisi stomata pada daun beragam tergantung spesies tumbuhannya. Sebagai contoh dapat dilihat pada Gambar 6.1. Secara teknis, yang dimaksud dengan stomata adalah celah yang ada di antara dua sel penjaga (guard cell), sedangkan aparatus stomata adalah kedua sel penjaga tersebut. Berdampingan dengan sel penjaga terdapat sel-sel epidermis yang juga telah termodifikasi, yang disebut sebagai sel pendukung (subsidiary cell).

Dalam proses transpirasi, air menguap dari dinding sel-sel parenkhima palisade dan parenkhima spongy ke ruang interseluler. Kedua jenis sel-sel parenkhima ini secara kolektif disebut sebagai sel-sel mesofil. Rongga udara

yang relatif luas yang berada di bawah posisi stomata di dalam daun disebut sebagai rongga substomatal.

#### **D. Mekanisme Kerja Stomata**

Stomata akan membuka jika tekanan turgor kedua sel penjaga meningkat. Peningkatan tekanan turgor sel penjaga disebabkan oleh masuknya air ke dalam sel penjaga tersebut. Pergerakan air dari satu sel ke sel lainnya sebagaimana dijelaskan sebelumnya akan selalu dari sel yang mempunyai potensi air lebih tinggi ke sel dengan potensi air lebih rendah.

Tinggi rendahnya potensi air sel akan tergantung pada jumlah bahan yang terlarut (solute) di dalam cairan sel tersebut. Semakin banyak bahan semakin rendah. Dengan demikian, jika tekanan turgor sel tersebut tetap, maka secara keseluruhan potensi air sel akan pula menurun. Untuk memacu agar air masuk ke sel penjaga, maka jumlah bahan yang terlarut di dalam sel tersebut harus ditingkatkan.

#### **E. Pengaruh Asam Absisat**

Jika asam absisat (ABA) diaplikasikan pada daun tumbuhan dengan konsentrasi yang sangat rendah (misalnya 10 M) maka akan menyebabkan stomata menutup. Pada kondisi kekeringan (dan kondisi lingkungan yang tidak menguntungkan lainnya, seperti tergenang atau suhu tinggi), kandungan ABA pada daun akan meningkat terlebih dahulu sebelum stomata mulai menutup.

Dari hasil pengamatan ini, tersirat bahwa pada kondisi alami, penutupan stomata terjadi setelah tumbuhan mengakumulasi ABA. Pada daun,

ABA dapat berada pada 3 bagian sel yang berbeda, yakni: (i) pada sitosol, di mana ABA disintesis, (ii) pada kloroplas, di mana ABA diakumulasikan, dan (iii) pada dinding sel. Para ahli fisiologi berpendapat bahwa ABA dapat merangsang penutupan stomata adalah ABA yang berada pada dinding sel.

ABA pada dinding sel ini berasal dari sel-sel mesofil daun tempat di mana ABA ini disintesis. Setelah melihat peranan ion kalium dalam pembukaan stomata dan ABA dalam penutupan stomata, dapat disimpulkan bahwa ada dua feedback loop yang mengendalikan membuka dan menutupnya stomata.



**Soal Evaluasi 4**

1. Jelaskan pengertian transpirasi?
2. Sebutkan fungsi transpirasi bagi tumbuhan?
3. Uraikan bagaimana mekanisme kerja stomata?



## BAB V

### UNSUR HARA ESENSIAL

### TUMBUHAN

#### A. Pengertian Unsur Hara Esensial

Beraneka ragam unsur dapat ditemukan di dalam tubuh tumbuhan, tetapi tidak berarti bahwa seluruh unsur-unsur tersebut dibutuhkan tumbuhan untuk kelangsungan hidupnya. Beberapa unsur yang ditemukan di dalam tubuh tumbuhan malah dapat mengganggu metabolisme atau meracuni tumbuhan, sebagai contoh adalah beberapa jenis logam berat seperti Al, Cd, Ag, dan Pb.

Sebelum diuraikan tentang berbagai macam jenis unsur hara esensial dan fungsinya bagi tumbuhan, maka terlebih dahulu harus dipahami tentang apa yang dimaksud dengan unsur hara esensial. Suatu unsur dikatakan esensial bagi tumbuhan adalah jika:

1. Tumbuhan tidak dapat melengkapi daur hidupnya (sampai menghasilkan biji yang dapat tumbuh) apabila unsur tersebut tidak tersedia.
2. Unsur tersebut merupakan penyusun suatu molekul atau bagian tumbuhan yang esensial bagi kelangsungan hidup tumbuhan tersebut. Misalnya N sebagai penyusun protein dan Mg sebagai penyusun klorofil.

#### B. Pengukuran Konsentrasi Dalam Jaringan Tumbuhan

Kandungan unsur hara dalam tumbuhan dihitung berdasarkan total beratnya per satuan berat bahan kering tumbuhan, disajikan dengan satuan ppm atau persen. Bahan kering tumbuhan adalah bahan tumbuhan setelah seluruh

air yang terkandung didalamnya dihilangkan. Secara praktis, jika jaringan tumbuhan segar dipanaskan dengan suhu 80 °C selama 2 hari sudah cukup untuk menghilangkan semua air yang terkandung dalam jaringan tersebut.

Pengukuran konsentrasi unsur hara dalam jaringan tumbuhan, tanah atau larutan hara dapat dilakukan dengan alat spektrometer serapan atomik (atomic absorption spectrometer) atau dengan alat yang 45 15 lebih canggih yang disebut spektrometer emisi optikal (optical emission spectrometer).

Prinsip kerja dari alat spektrometer emisi optikal adalah dengan menguapkan unsur-unsur yang akan diukur pada suhu di atas 5000 V maka elektron-elektron pada unsur tersebut akan mengalami eksitasi, pindah dari orbit asal ke orbit yang lebih tinggi. Saat elektron- elektron tersebut kembali ke orbit asal akan dilepaskan energi dalam bentuk gelombang elektromagnetik yang akan berbeda-beda panjang eelombangnya untuk unsur yang berbeda.

Energi untuk masing- masing panjang gelombang (yang berasal dari masing-masing unsur) diukur dengan spektrometer. Keunggulan alat ini adalah mampu mengukur konsentrasi 20 jenis unsur dalam suatu larutan dengan teliti hanya dalam waktu kurang dari 1 menit. Jumlah kebutuhan tumbuhan untuk masing-masing unsur hara 02

### **C. Fungsi Unsur Hara Esensial**

Unsur hara yang akan dijabarkan fungsinya pada kesempatan ini adalah unsur-unsur hara yang diperoleh tanaman dari dalam tanah atau larutan hara. Sedangkan C, H, dan O tidak akan dibahas pada bagian ini.

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 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.

Fosfor merupakan bagian yang esensial dari berbagai gula fosfat yang berperan dalam reaksi-reaksi pada fase gelap fotosintesis, respirasi, dan berbagai proses metabolisme lainnya. Fosfor juga merupakan bagian dari nukleotida (dalam RNA dan DNA) dan fosfolipida penyusun membran.

Kalium tidak disintesis menjadi senyawa organik oleh tumbuhan, sehingga unsur ini tetap sebagai ion di dalam tumbuhan. Kalium berperan sebagai aktivator dari berbagai enzim yang esensial dalam reaksi-reaksi fotosintesis dan respirasi, serta untuk enzim yang terlibat dalam sintesis protein dan pati. Kalium juga merupakan ion yang berperan dalam mengatur potensi osmotik sel, dengan demikian akan berperan dalam mengatur tekanan turgor sel. Dalam kaitan dengan pengaturan turgor sel ini, peran yang penting adalah dalam proses membuka dan menutupnya stomata.

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

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 plastocianin (protein pada kloroplas). Molibdenum. Fungsi molibdenum yang telah diketahui secara jelas adalah sebagai bagian dari enzim nitrat reduktase yang mereduksi ion nitrat menjadi ion nitrit.

#### **D. Gejala Kekurangan Unsur Hara**

Jika ketersediaan unsur hara esensial kurang dari jumlah yang dibutuhkan tanaman, maka tanaman akan terganggu metabolisminya yang secara visual dapat terlihat dari penyimpangan-penyimpangan pada pertumbuhannya. Gejala kekurangan unsur hara ini dapat berupa pertumbuhan akar, batang, atau daun yang terhambat (kerdil) dan klorosis atau nekrosis pada berbagai organ tanaman.

Gejala unsur hara bagi tumbuhan yaitu:

1. warna daun hijau agak kekuningan.
2. pertumbuhan tanaman lambat dan kerdil.
3. perkembangan buah tidak sempurna atau tidak baik seringkali masak sebelum waktunya.
4. dapat menimbulkan daun penuh dengan serat hal ini dikarenakan menebalnya membran sel daun.
5. Dalam keadaan yang sangat parah daun menjadi mengering dimulai dari bagian bawah sampai atas tumbuhan.

**Soal Evaluasi 5**

1. Jelaskan bagaimana suatu unsur dikatakan esensial bagi tumbuhan?
2. Jelaskan Prinsip kerja dari alat spektrometer emisi optikal?
3. Sebutkan fungsi unsur hara esensial?



## BAB VI

### UTS

#### SOAL UTS (UJIAN TENGAH SEMESTER)

1. Jelaskan pengertian, ruang lingkup fisiologi tumbuhan serta hubungannya dengan cabang botani lainnya!
2. Jelaskan struktur dan senyawa penyusun membran serta fungsi pada membran!
3. Jelaskan struktur dan fungsi dari kloroplas, mitokondria dan ribosom!
4. Secara garis besar senyawa organik penyusun sel dapat dikelompokkan menjadi 4 kelompok utama, sebutkan dan jelaskan!
5. Mengapa air dapat melarutkan lebih banyak jenis bahan kimia dibandingkan dengan zat cair lainnya? Jelaskan!
6. Apa yang kalian ketahui tentang xilem dan floem? Jelaskan dan sebutkan fungsinya !
7. Jelaskan pengertian dan fungsi dari transpirasi bagi tumbuhan!
8. Suatu unsur dikatakan esensial bagi tumbuhan jika? Jelaskan!
9. Sebutkan dan jelaskan fungsi unsur hara esensial yang kamu ketahui!
10. Mikoriza dikelompokkan menjadi 2 jenis, yakni ektomikoriza dan endomikoriza. Jelaskan kedua jenis mikoriza tersebut!

## **BAB VII**

### **ENZIM**

#### **A. Metabolisme Tumbuhan**

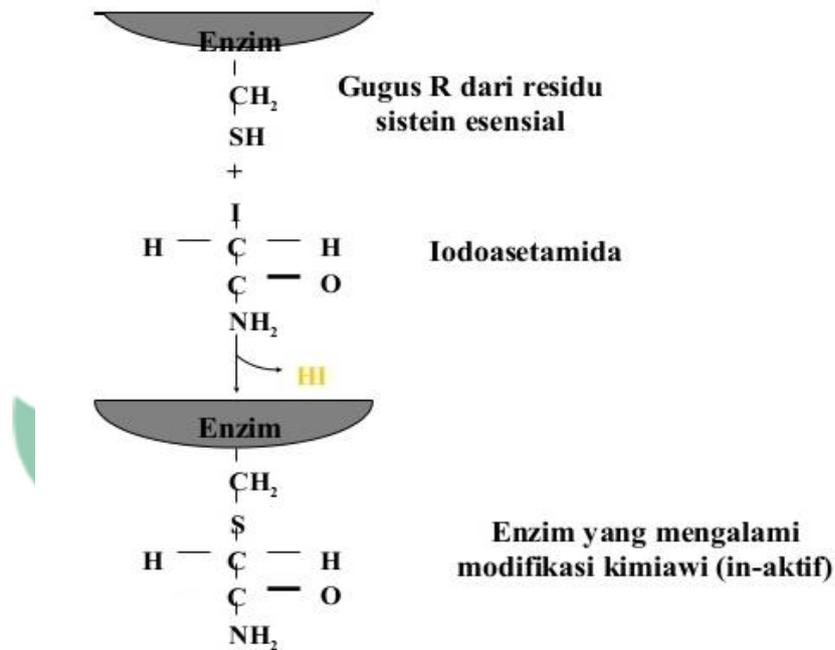
Sel-sel yang hidup perannya identik dengan pabrik-pabrik kimia yang tergantung pada ketersediaan energi dan harus mematuhi hukum-hukum kimia. Secara kolektif, reaksi-reaksi kimia yang memungkinkan adanya kehidupan disebut metabolisme. Beribu-ribu reaksi tersebut berlangsung secara terus-menerus di dalam sel. Dengan reaksi-reaksi tersebut banyak senyawa organik yang disintesis tumbuhan. Ratusan jenis senyawa dibentuk sebagai bahan penyusun struktur organel atau bagian-bagian dari sel lainnya.

Tumbuhan juga menghasilkan senyawa metabolit sekunder (secondary metabolite) yang berfungsi untuk melindungi tumbuhan dari serangan serangga, bakteri, jamur, dan jenis patogen lainnya. Lebih jauh, tumbuhan juga menghasilkan vitamin untuk kepentingan tumbuhan itu sendiri (dan untuk manusia) dan hormon-hormon yang merupakan sarana bagi tumbuhan untuk berkomunikasi antara organnya (atau jaringannya) dalam mengendalikan dan mengkoordinasikan pertumbuhan dan perkembangannya.

#### **B. Komposisi Kimia Dan Struktur 3-Dimensi Enzim**

Setiap enzim terbentuk dari molekul protein sebagai komponen utama penyusunnya dan beberapa enzim hanya terbentuk dari molekul protein dengan tanpa adanya penambahan komponen lain. Tetapi perlu diingat bahwa tidak semua protein mempunyai fungsi katalitik, sehingga tidak dapat digolongkan sebagai enzim.

Sebagai contoh, protein pada mikrotubula, mikrofilamen, dan beberapa molekul protein pada membran terlihat lebih berfungsi struktural daripada katalitik. Protein lainnya seperti sitokrom yang membawa alektron pada fotosintesis dan respirasi tidak pula dapat digolongkan sebagai enzim. Protein yang terkandung dalam biji juga lebih berperan sebagai bahan cadangan untuk digunakan dalam proses perkecambahan biji.



**Gambar 7.1**  
Stuktur 3\_Dimensi enzim

### C. Gugus Prostetik, Koenzim, Dan Vitamin

Di samping komponen proteinnya, beberapa enzim juga mengandung senyawa organik nonprotein dengan ukuran molekul yang lebih kecil. Senyawa nonprotein pada enzim ini disebut gugus prostetik (prothetic group). Gugus

prostetik terikat erat pada molekul protein enzim dengan ikatan kovalen dan esensial untuk aktivitas katalitik enzim yang bersangkutan, contohnya adalah enzim dehidrogenase yang berperan dalam respirasi dan perombakan asam lemak.

Enzim dehidrogenase ini mengandung pigmen kuning yang disebut flavin yang terikat pada protein, di mana flavin ini esensial bagi aktivitas enzim tersebut karena kemampuannya untuk menerima dan memindahkan atom H selama proses reaksi berlangsung. Beberapa enzim mengandung gugus prostetik yang mengikat ion-ion logam, seperti besi dan tembaga pada sitokrom oksidase. Jenis protein lain, yakni glikoprotein, mengandung gula yang berperan dalam aksi enzimatisnya atau melindungi enzim dari suhu ekstrim, bahan perusak internal (misalnya protease), dan mungkin terhadap patogen dan herbivora.

#### **D. Kompartementasi Enzim**

Enzim tertentu tidak dapat ditemui pada semua bagian sel Enzim-enzim yang berperan untuk fotosintesis terdapat pada kloroplas. Beberapa enzim yang penting perannya untuk respirasi aerobik hanya terdapat pada mitokondria, sementara enzim respirasi lainnya berada dalam sitosol.

Enzim yang dibutuhkan untuk sintesis DNA dan RNA serta untuk proses mitosis terdapat di dalam inti sel Enzim-enzim yang berperan dalam suatu lintasan metabolik tertentu kadang tersusun pada membran sehingga reaksi-reaksi pada lintasan tersebut dapat berlangsung secara berurutan. Hasil suatu tahap reaksi akan dibebaskan pada tempat di mana hasil ini dapat segera

dikonversi oleh enzim berikutnya. Proses ini berlangsung terus-menerus sampai dihasilkan produk akhirnya.

### **E. Fungsi Spesifik Dan Nomenklatur Enzim**

Salah satu sifat penting enzim adalah fungsinya yang spesifik. Ialah enzim hanya bereaksi dengan satu substrat (reactant) atau kelompok kecil substrat yang mirip satu sama lain dan mempunyai fungsi sama. Pada beberapa enzim, sifat yang spesifik ini adalah absolut. Lebih dari 4500 enzim telah diidentifikasi dari sel-sel makhluk hidup dan jumlah ini akan bertambah terus seiring dengan perkembangan ilmu pengetahuan.

Setiap enzim telah diberi nama berdasarkan suatu sistem baku dan juga nama umum sederhananya. Dalam sistem penamaan ini, nama enzim umumnya diberi akhiran "ase" dan dicirikan oleh substratnya dan jenis reaksi yang dipacu. Sebagai contoh, sitokrom oksidase (enzim respirasi) berperan mengoksidasi (melepas satu elektron dari) molekul sitokrom. Asam malat dehidrogenase melepas 2 atom hidrogen dari asam malat. Nama-nama umum di atas tidak memberi cukup informasi tentang reaksi yang dipacu, sebagai contoh, penerima elektron atau posisi asal atom H dari reaksi tersebut tidak disebutkan.

### **F. Enzim Tidak Berperan Bolak-Balik**

Jika potensi kimia reaktan (substrat) jauh lebih tinggi dibanding karena hukum kimia aksi massa (mass action). Kebanyakan reaksi dekarboksilasi (pembebasan CO<sub>2</sub> dari suatu molekul) merupakan contoh dari reaksi di atas,

karena CO<sub>2</sub>, yang dilepas segera dibebaskan, maka konsentrasi dan potensi kimianya akan tetap rendah.

Reaksi melibatkan ikatan dan penambahan 2 pemutusan hidrolitik molekul air pada bagian yang terputus tersebut merupakan suatu yang reaksi yang tak dapat balik (irreversible). Sebagai contoh, hidrolisis pati menjadi glukosa oleh enzim amilase, hidrolisis fosfat dari berbagai molekul oleh enzim fosfatase, dan hidrolisis protein menjadi asam- asam amino pada dasarnya merupakan reaksi-reaksi yang tak dapat balik.

### **G. Isozim**

Sekitar tahun 1940-an, teknik elektroforesis dikembangkan untuk memisahkan protein dan dengan teknik ini berhasil ditemukan aspek-aspek penting tentang enzim. Pada dasarnya, elektroforesis adalah teknik pemisahan protein terlarut atau molekul lain yang bermuatan pada bidang listrik (electrical field). Campuran enzim yang akan dipilah-pilah ditempatkan dalam larutan penyangga atau pada media nonaktif (inert) seperti lempengan gel pati atau suatu kolom

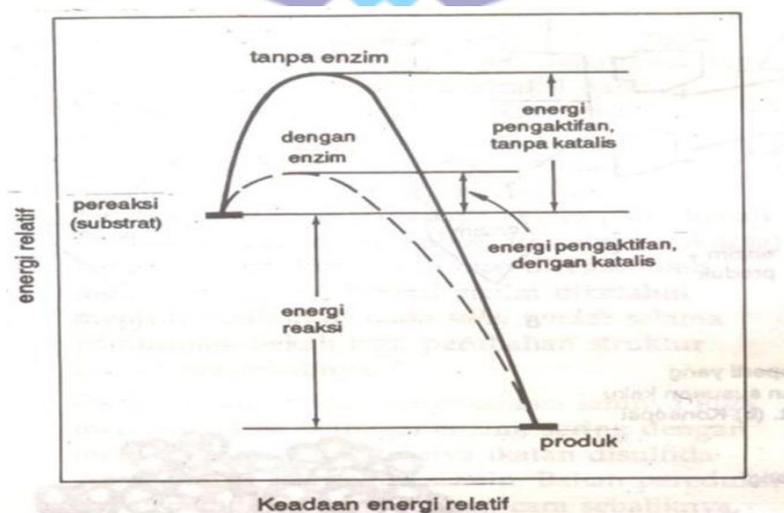
### **H. Pengaruh Denaturasi Terhadap Aktivitas Enzim**

Uraian sebelumnya tentang kompleks enzim-substrat dan struktur 3-dimensi protein mengisyaratkan bahwa jika struktur enzim berubah maka substrat tidak lagi dapat menyatu dengan enzim dan aktivitas katalitik enzim terhadap substrat tersebut akan hilang. Beberapa faktor dapat menyebabkan alterasi struktur molekul enzim.

## I. Mekanisme Aksi Enzim

Hanya molekul yang paling energetik yang umumnya dapat berubah selama reaksi kimia berlangsung. Suatu molekul secara temporer dapat menjadi lebih energetik jika molekul tersebut mengalami benturan-benturan (collision). Peningkatan suhu secara nyata menaikkan jumlah molekul yang memiliki energi relatif tinggi. Hal ini yang mendasari mengapa laju reaksi biokimia lebih cepat berlangsung pada suhu yang relatif lebih tinggi.

Peran enzim tentunya tidak sama dengan peranan suhu. Untuk menjelaskan hal ini perlu diperhatikan gambar 10.1. pada gambar ini dapat dilihat bahwa jika substrat bereaksi untuk menghasilkan produk, suatu hambatan energi (*energybarrier*) harus lebih dahulu dilintasi. Lintasan ini disebut sebagai “energi aktivasi”. Peningkatan suhu menyebabkan bertambahnya jumlah molekul dengan tingkat energi yang lebih tinggi dari energi aktivasi yang dibutuhkan sehingga lebih banyak molekul yang dapat bereaksi, sedangkan enzim berperan menurunkan tingkat energi aktivasi yang dibutuhkan dengan demikian akan menyebabkan lebih banyak molekul yang dapat bereaksi.



**Gambar 7.2**

Diagram energy untuk reaksi metabolik dengan atau tanpa peranan enzim.

Molekul substrat yang bereaksi harus melampaui tingkat energi aktivitas yang dibutuhkan, walaupun senyawa produk berada pada tingkat energi bebas yang lebih rendah.

#### **J. Enzim Alosterik Dan Kendali Umpan-Balik**

Telah dijelaskan bahwa beberapa ion atau molekul dapat menghambat aksi enzim. Kebanyakan dengan cara mengubah konformasi enzim sehingga tidak dapat secara efektif membentuk kompleks enzim-substrat. Beberapa enzim dapat dipengaruhi oleh bahan-bahan yang secara normal terkandung di dalam sel, sehingga fungsi enzim tersebut dapat terhambat atau sebaliknya terpas

Efek ini merupakan mekanisme yang penting untuk pengendalian homeostatik pada tingkat metabolik. Kasus yang umum adalah penghambatan suatu reaksi oleh metabolit yang secara kimia berhubungan dengan substrat tetapi dapat bereaksi dengan enzim. Untuk memahami hal ini, sebagai contoh senyawa A dikonversi oleh suatu rangkaian reaksi enzimatik untuk membentuk senyawa

Senyawa antara dalam rangkaian reaksi ini adalah senyawa B, C, D, dan E. Setelah serangkaian reaksi ini berlangsung, senyawa F tidak lagi memiliki struktur yang mirip dengan senyawa A. Walaupun demikian, senyawa F dapat bergabung dengan enzim pertama sehingga menghambat terbentuknya kompleks enzim-senyawa.

### **K. Pengaruh Konsentrasi Substrat Dan Konsentrasi Enzim**

Katalisis terjadi hanya jika enzim dan substrat membentuk suatu kompleks. Oleh sebab itu, laju reaksi tergantung pada jumlah enzim dan substrat yang berhasil membentuk kompleks. Jika konsentrasi keduanya tinggi, jumlah kompleks yang mungkin terbentuk juga tinggi. Jika substrat cukup tersedia, penggandaan konsentrasi enzim menyebabkan laju reaksi meningkat 2 kali lipat. Jika kemudian substrat menjadi faktor pembatas, maka penambahan enzim selanjutnya tidak lagi mempengaruhi laju reaksi.

### **L. Pengaruh pH**

pH medium dapat mempengaruhi aktivitas enzim. Umumnya terdapat pH optimum agar suatu enzim dapat berfungsi maksimum. Aktivitas enzim akan menurun pada pH yang lebih tinggi atau lebih rendah. Kadang gambaran hubungan antara aktivitas enzim dengan pH diwakili oleh kurva yang berbentuk lonceng tetapi untuk enzim lain mungkin kurvanya relatif datar, pH optimum sering dalam kisaran antara pH 6 sampai pH 8.

Selain dapat menyebabkan denaturasi enzim, pH juga mempengaruhi laju reaksi dengan paling tidak melalui 2 cara lain, yakni:

1. Aktivitas enzim sering tergantung pada ada atau tidaknya gugus amino atau karboksil yang bebas. Gugus ini bisa bermuatan positif atau negatif, bermuatan netral, tergantung enzimnya hanya salah satu bentuk tersebut yang akan efektif untuk tiap enzim. Jika gugus amino tak bermuatan yang esensial, maka pH optimum akan relatif tinggi, sedangkan gugus karboksil netral membutuhkan pH rendah.

2. pH mengendalikan ionisasi beberapa substrat, dimana beberapa substrat harus terionisasi dahulu sebelum mendapat reaksi.

### **M. Pengaruh Produk Reaksi**

Laju reaksi enzimatik dapat diketahui dengan cara mengukur laju pengurangan substrat atau laju terbentuknya produk. Dengan kedua pendekatan ini diketahui bahwa laju reaksi berlangsung semakin lama semakin lambat.

Penurunan laju reaksi ini kadang disebabkan oleh denaturasi protein selama pengukuran berlangsung, tetapi faktor lain juga berperan. Satu faktor yang paling penting adalah pengaruh dari penurunan konsentrasi substrat dan penimbunan produk reaksi.

### **N. Pengaruh Unsur Atau Senyawa Penghambat Enzim**

Beberapa bahan asing dapat menghalangi efek katalitik enzim. Beberapa diantaranya adalah unsur-unsur anorganik seperti beberapa kation logam dan beberapa senyawa organik tertentu. Kedua kelompok penghambat ini dibedakan berdasarkan pengaruhnya yang bersifat kompetitif atau nonkompetitif dengan substrat.

Penghambat kompetitif umumnya mempunyai struktur yang mirip dengan substrat sehingga dapat berkompetisi untuk sisi aktif penggabungan antara enzim dan penghambat terjadi, maka enzim yang efektif menjadi menurun, sebagai akibatnya tentu laju reaksi juga akan menurun. Senyawa penghambat ini kadang juga dirombak oleh enzim untuk menghasilkan senyawa lain yang tidak berfungsi menghambat.

Penambahan substrat dapat mengatasi masalah hambatan oleh senyawa penghambat kompetitif ini. Contoh klasik dari penghambat kompetitif adalah yang disebabkan oleh malonat ( $\text{OOC-CH}_2\text{-COO}^-$ ), yakni anion dengan muatan ganda dari asam malonat, terhadap aksi suksinat dehidrogenase.

Enzim ini berperan pada reaksi esensial pada siklus Krebs pada mitokondria. Enzim ini memisahkan 2 atom H dari ciksinat dan menambahkan 2 atom H tersebut pada gugus prostetik (Flavin Adenin Dinukleotida, disingkat FAD) yang terikat secara kovalen pada enzim ini, sehingga terbentuk fumarat dan FADH<sub>2</sub>, yang terikat pada enzim.



**Soal Evaluasi 7**

1. Jelaskan bagaimana cahaya menyebabkan terjadinya fotosintesis!
2. Pembentukan ATP dari ADP dan P, secara termodinamik tidak akan terjadi tanpa bantuan energi cahaya.
3. Jelaskan yang kalian ketahui bagaimana proses pembentukan ATP, ADP dan P! Jelaskan tiga tahap utama pada Siklus Calvin?



## BAB VIII

### FOTOSINTESIS

#### A. Prinsip Penyerapan Cahaya Oleh Tumbuhan

Untuk mengetahui bagaimana cahaya menyebabkan terjadinya fotosintesis, perlu diketahui terlebih dahulu sifat-sifat cahaya. Cahaya memiliki sifat gelombang (wave nature) dan sifat partikel (particle nature). Cahaya mencakup bagian dari energi matahari dengan panjang gelombang antara 390 nm sampai 760 nm dan tergolong cahaya tampak.

Kisaran ini merupakan porsi kecil dari kisaran spektrum elektromagnetik, Sifat cahaya sebagai partikel biasanya diekspresikan dengan pernyataan bahwa cahaya menyerpa sebagai foton (photon) atau kuantum, yang merupakan suatu paket diskrit dari energi, di mana masing-masing dikaitkan dengan panjang gelombang tertentu.

Energi dalam tiap foton berbanding terbalik dengan panjang gelombang. Cahaya biru dan ungu dengan gelombang yang lebih pendek memiliki lebih banyak foton energetik dibanding cahaya merah atau jingga dengan gelombang yang lebih panjang. Satu mole (6,02 x 10<sup>23</sup>) foton disebut sebagai satu einstein.

Walaupun begitu, satuan einstein tidak dianjurkan untuk dipakai, karena bukan merupakan satuan SI. Dianjurkan untuk memakai satuan mole, karena mole adalah satuan SI. Prinsip dasar penyerapan cahaya adalah bahwa setiap molekul hanya dapat menyerap satu foton pada waktu tertentu dan foton.

## B. Efek Penambahan Emerson

Pada tahun 1950-an, Robert Emerson dari Universitas Iinois tertarik pada masalah mengapa cahaya merah dengan panjang gelombang 690 nm sangat tidak efektif untuk fotosintesis, walaupun sebagian besar dapat diserap oleh klorofil A secara *in vitro*.

Emerson dan sejawatnya mendapatkan bahwa jika cahaya dengan panjang gelombang yang lebih pendek diberikan bersama-sama dengan cahaya merah, maka laju fotosintesis menjadi lebih tinggi dari jumlah hasil fotosintesis jika masing-masing gelombang cahaya diberikan secara sendiri-sendiri.

Gejala sinergis atau pemacuan ini di kemudian dikenal sebagai Efek Pemacuan Emerson (Emerson enhancement effect). Efek Emerson ini mungkin terjadi karena gelombang cahaya merah membantu gelombang cahaya yang lebih pendek atau sebaliknya. Sekarang telah diketahui, bahwa terdapat 2 kelompok pigmen yang bekerjasama dalam fotosintesis dan gelombang cahaya merah hanya diserap oleh salah satu fotosistem, yakni fotosistem I (PS I).

Fotosistem yang lainnya adalah fotosistem II (PS II) menyerap cahaya dengan panjang gelombang lebih pendek dari 690 nm. Arti penting dari penemuan Emerson adalah bahwa untuk fotosintesis terdapat 2 fotosistem yang berbeda. Sekarang kedua fotosistem ini telah berhasil diisolasi dan fungsinya sudah semakin jelas.

Bagaimana PS I dan PS II menggunakan energi cahaya untuk mengoksidasi H<sub>2</sub>O dan secara bersama-sama menyediakan 2 elektron untuk mereduksi NADP menjadi NADPH dapat dilihat pada reaksi berikut:

### **C. Komposisi, Fungsi, Dan Posisi Ps I Dan Ps II**

Kedua fotosistem dapat dipisahkan dari membran thilakoid di kloroplas yang telah diisolasi diberi perlakuan dengan menggunakan deterjen lunak (mild detergent) yang sesuai. Kemudian kedua fotosistem ini dapat dipisah dengan teknik elektroforesis dengan menggunakan gel poliakrilamida. Hasil analisis menunjukkan bahwa PS I mengandung klorofil a, sedikit klorofil b, dan beberapa beta-karoten yang menyatu dengan beberapa protein dengan ikatan nonkovalen.

Satu dari klorofil a pada fotosistem itu menjadi spesial karena lingkungan kimianya sehingga dapat menyerap cahaya dengan panjang gelombang  $\pm 700$  nm, selain gelombang yang lebih pendek. Oleh sebab itu, disebut P700. P700 inilah yang merupakan pusat reaksi dari PS I dan semua pigmen-pigmen lainnya akan mengirim energi eksitasinya ke P700 ini.

### **D. Pengangkutan Elektron Dari Air Ke NADP**

Pada model ini, PS II, sitokrom b, protein Fe-S, kompleks sitokrom f, dan PS I digambarkan sebagai lingkaran untuk mencerminkan struktur protein globular. Kompleks penyerapan cahaya mengelilingi dan mengirim energi eksitasi untuk kedua fotosistem Kompleks sitokrom dan protein Fe-S berada di antara PS I dan PS II dan dapat dipisahkan agak jauh (misalnya dari grana ke stroma), tetapi molekul PQ dan PC yang bersifat mobil akan membawa elektron dari PS II ke PS I.

Lintasan ini disebut Lintasan Pengangkutan Elektron nonsiklik, karena elektron yang berasal dari molekul H<sub>2</sub>O yang telah sampai ke NADP- tidak

dapat kembali lagi ke molekul H<sub>2</sub>O asalnya. Pembentukan ATP sebagai akibat pengangkutan elektron ini disebut fotofosforilasi nonsiklik. Secara keseluruhan, proses pengangkutan elektron ini membutuhkan cahaya, karena secara termodinamik air sulit untuk dioksidasi dan NADP juga sulit direduksi.

### **E. Fotofosforilasi**

Pembentukan ATP dari ADP dan P, secara termodinamik tidak akan terjadi tanpa bantuan energi cahaya. Oksidasi H<sub>2</sub>O dan PQH, menyebabkan konsentrasi H<sup>+</sup> di dalam saluran thilakoid (pH s dapat menjadi 1000 kali lebih tinggi dibandingkan pada stroma (pH 8) selama fotosintesis berlangsung.

Perbedaan konsentrasi yang sangat besar ini menjadi tenaga pendorong untuk difusi H<sup>+</sup>. Membran thilakoid sesungguhnya tidak permeabel terhadap H<sup>+</sup> dan ion-ion lain kecuali jika melalui CF<sub>1</sub>F<sub>0</sub>. Perbedaan pH antara kedua sisi membran ini menyediakan energi kimia yang potensial dalam memacu fotofosforilasi.

Ide bahwa perbedaan pH dapat menyediakan energi untuk sintesis ATP dalam kloroplas, mitokondria, dan bakteri diusulkan pertama kali oleh Peter Mitchell di Inggris tahun 1961 (ini yang menyebabkan Mitchell menerima hadiah nobel untuk bidang kimia tahun 1978). Teori Mitchell disebut teori khemiosmotik (tetapi tidak ada hubungannya dengan osmosis). Bukti langsung dari teori ini pertama didapatkan oleh peneliti fotosintesis G. Hind dan Andre Jagendorf pada Universitas Cornell pada tahun 1963.

## F. Fiksasi Karbon Dioksida

Melalui serangkaian penelitian pada kurun waktu antara 1946 sampai 1953, dengan menggunakan teknik khromatografi dan penggunaan karbon dioksida bermuatan radio aktif ( $^{14}\text{CO}_2$ ), Melvin Calvin bersama beberapa peneliti pada Universitas California di Berkeley berhasil mengidentifikasi produk awal dari fiksasi  $\text{CO}_2$  awal tersebut adalah asam 3-fosfoglisarat, atau sering disingkat 3-PGA. Calvin dalam penelitiannya menggunakan ganggang hijau sel tunggal *Chlorella* sp.

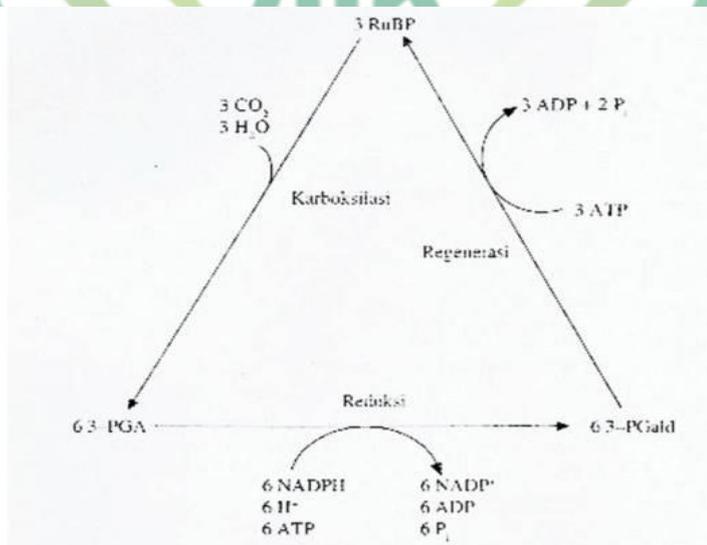
Produk awal tersebut diperoleh jika ganggang ini dibunuh (dengan menggunakan larutan etanol 80% yang mendidih) a 2 detik setelah  $^{14}\text{CO}_2$  diberikan. Produk awal ini sekarang telah diketahui juga diperoleh dari berbagai daun tumbuhan. Molekul 3-PGA dan kebanyakan asam pada tumbuhan terdapat dalam bentuk yang terionisasi, yakni tanpa  $\text{H}^+$  pada gugus karboksilnya.

Karena PGA tersusun dari 3 atom karbon, semula diduga pasti ada molekul dengan 2 atom karbon yang bergabung dengan  $\text{CO}_2$  untuk membentuk PGA. Untuk membuktikan teori ini, dilakukan penelitian dengan cara memberikan  $^{14}\text{CO}_2$  dalam waktu singkat dan kemudian pemberian  $\text{CO}_2$  dihentikan secara mendadak. Dengan teknik ini diharapkan senyawa yang secara alami akan bergabung dengan  $\text{CO}_2$  untuk membentuk PGA akan terakumulasi (karena ketidaktersediaan  $\text{CO}_2$ ).

## G. Siklus Calvin

Penelusuran lebih jauh (dengan teknik yang sama) berhasil mengidentifikasi berbagai senyawa gula fosfat yang terbentuk dari PGA. Senyawa-senyawa tersebut termasuk tetrosa fosfat (dengan 4 atom C), pentosa fosfat (5 atom C), heksosa fosfat (6 atom C), dan heptosa fosfat (7 atom C). Urutan terbentuknya senyawa-senyawa ini dapat diketahui tergantung pada waktu kapan  $^{14}\text{CO}_2$  mulai terikat pada molekul senyawa-senyawa yang bersangkutan.

Jika molekul PGA yang mengandung  $^{14}\text{C}$  terurai, maka  $^{14}\text{C}$  akan berada pada gugus karboksil, tetapi kemudian kedua atom C lainnya dari molekul PGA juga bermuatan radio aktif (terdiri dari  $^{14}\text{C}$ ).  $^{14}\text{C}$  untuk 2 molekul PGA ini tidak berasal langsung dari  $^{14}\text{CO}_2$  tetapi di transfer dari molekul lainnya yakni RuBP.



**Gambar 8.1**

Tiga tahap utama pada Siklus Calvin : karboksilasi, reduksi, dan regenerasi.

Tiga putaran dari siklus Calvin akan memfiksasi 3 CO<sub>2</sub>, dan menghasilkan 1 molekul 3-PGald. Sebagian dari 3-PGald yang dihasilkan digunakan dalam kloroplas untuk mensintesis pati, yang merupakan produk fotosintetik penting jika fotosintesis berlangsung cepat. Sebagian lagi diangkut keluar kloroplas dengan sistem pengangkutan antiport, dipertukarkan dengan P, atau 3-PGA lainnya dari sitoplasma. Sebagian lagi dari 3-PGald akan dikonversi menjadi dihidroksiaseton fosfat, suatu triosa fosfat yang juga dapat ditransfer keluar dari kloroplas.

#### **H. Lintasan Asam Dikarboksilat C-4**

Setelah ditemukannya Siklus Calvin, pada awalnya dianggap bahwa masalah teaksi-reaksi yang berlangsung selama fase gelap fotosintesis dianggap sudah tuntas diketahui. Akan tetapi, ternyata teaksi siklus Calvin tidak berlaku untuk semua tumbuhan. Pada tahun 1965, H.P. Kortschak, C.E. Hart, dan G.O. Burr mendapatkan bahwa daun tebu memfiksasi CO<sub>2</sub> pertamanya untuk membentuk senyawa dengan 4 atom C, yakni asam malat dan asam aspartat, bukan senyawa PGA. Pada daun tebu tersebut, fotosintesis berlangsung cepat dan efisien.

Setelah 1 detik diberikan 14CO<sub>2</sub> maka 80% dari 14CO<sub>2</sub> tersebut ditemui dalam bentuk asam malat atau asam aspartat dan hanya 10% dalam bentuk PGA. Hasil ini mengisyaratkan bahwa PGA bukan merupakan produk awal dari fotosintesis pada tanaman ini. Temuan Kortschak ini kemudian didukung oleh berbagai hasil penelitian lainnya oleh ahli-ahli lain.

Tumbuhan yang produk awal fiksasi CO<sub>2</sub> nya berupa senyawa 4 karbon ini kemudian disebut sebagai spesies C-4; sedangkan yang produk awalnya berupa PGA disebut spesies C-3. Tanaman C-4 yang penting lainnya selain tebu adalah jagung, sorghum, dan beberapa spesies rumputan asal daerah tropis lainnya, akan tetapi gandum, oat, padi, dan bambu adalah tanaman C-3.

### **I. Metabolisme Asam Crassulacean**

Beberapa spesies tumbuhan mempunyai sifat yang berbeda dengan kebanyakan tumbuhan lainnya, yakni membuka stomata pada malam hari dan menutup stomata pada siang hari. Kelompok tumbuhan ini umumnya adalah tumbuhan jenis sukulen yang tumbuh di daerah kering.

Dengan menutup stomatanya pada siang hari tumbuhan ini akan dapat mengurangi laju transpirasinya, sehingga lebih mampu untuk beradaptasi pada daerah kering tersebut. Perilaku stomata yang unik ini akan mempengaruhi metabolisme CO<sub>2</sub> yang berlangsung pada tumbuhan ini, karena CO<sub>2</sub> hanya akan diserap oleh tumbuhan ini pada malam hari.

Karena metabolisme unik ini pertama kali diteliti pada tumbuhan dari famili Crassulaceae, maka metabolisme CO<sub>2</sub> ini disebut sebagai Metabolisme Asam Crassulacean. Pada saat sekarang telah diketahui, bahwa metabolisme ini juga ditemui pada beberapa anggota dari 20 famili tumbuhan termasuk Cactaceae, Orchidaceae, Bromeliaceae, Liliaceae, dan Euphorbiaceae.

## **J. Sintesis Sukrosa, Pati, Dan Fruktan**

Pada tumbuhan C-3, C-4, dan CAM bentuk senyawa yang diakumulasi sebagai hasil fotosintesis adalah sukrosa atau pati. Gula heksosa bebas seperti glukosa dan fruktosa dijumpai dalam konsentrasi yang jauh lebih rendah pada sel-sel fotosintetik. Sebaliknya, pada sel-sel nonfotosintetik akumulasi glukosa dan fruktosa banyak dijumpai.

Pada beberapa spesies rumput-rumputan (terutama yang berasal dari daerah beriklim sedang seperti *Hordeae*, *Avenede*, dan *Festuceae*) dan sedikit jenis tumbuhan dikotil pati bukan merupakan produk fotosintesis utama, pada tumbuhan ini polimer sukrosa dan fruktosa (disebut fruktan atau fruktosan) merupakan produk fotosintesis yang banyak dijumpai pada daun dan batangnya, tetapi pada akar dan bijinya yang terakumulasi adalah pati

## **K. Faktor Genetik**

Tumbuhan dikelompokkan menjadi tumbuhan C-3, C-4, dan CAM. Perbedaan tersebut juga akan mempengaruhi kemampuan atau efisiensi tumbuhan dalam mensintesis karbohidrat. Perbedaan Antara Spesies. Tumbuhan C-4 secara umum mempunyai laju fotosintesis yang tertinggi, sementara tumbuhan CAM memiliki laju fotosintesis yang terendah.

Tumbuhan C-3 berada di antara kedua ekstrim tersebut. Tabel 13.1 meringkas perkiraan kisaran nilai fotosintesis maksimum untuk tumbuhan C-3, C-4, dan CAM. Laju fotosintesis maksimum untuk pohon dan semak evergreen yang tumbuh di daerah tropis, subtropis, atau mediteranean, dan untuk pohon dan semak deciduous yang tumbuh di daerah beriklim sedang.

Pohon dan semak tersebut memperlihatkan laju fotosintesis maksimum yang lebih rendah dibanding pada tumbuhan C-3 dan herba umumnya. Hal ini mungkin disebabkan karena sistem kanopi pohon dan semak, di mana banyak daun yang saling menutupi sehingga intensitas cahaya yang diterima oleh daun-daun yang ternaungi akan lebih rendah.

#### **L. Faktor Lingkungan**

Ketersediaan Air untuk tumbuhan tingkat tinggi, agaknya laju fotosintesis paling dibatasi oleh ketersediaan air. Secara sederhana hal ini dapat dilihat bahwa gurun merupakan ekosistem yang tidak produktif, sebaliknya hutan hujan tropis merupakan ekosistem yang sangat produktif.

Kekurangan air dapat menghambat laju fotosintesis, terutama karena pengaruhnya terhadap turgiditas sel penjaga stomata, Jika kekurangan air, maka turgiditas sel penjaga akan menurun. Hal ini menyebabkan stomata menutup.

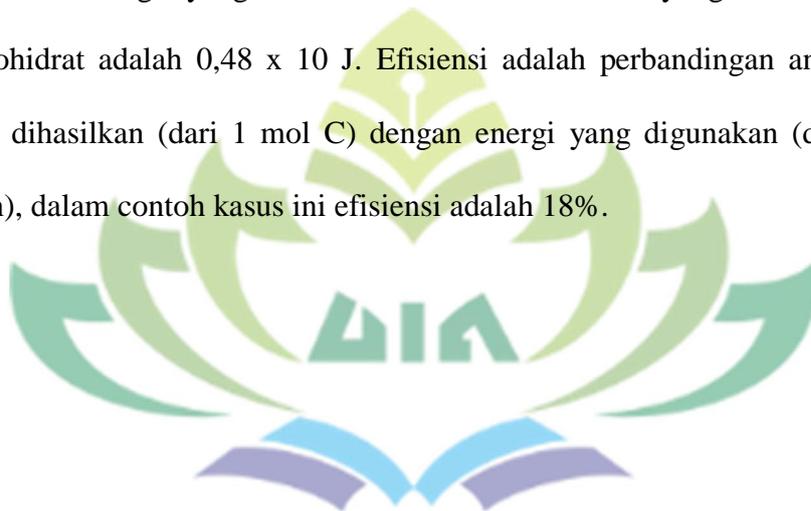
#### **M. Laju fotosintesis, Efisiensi, Dan Produksi Tanaman**

Banyak ahli fisiologi, ekologi, dan pemuliaan tanaman yang tertarik pada bagaimana faktor-faktor lingkungan dan genotipe dapat diubah untuk tujuan meningkatkan hasil tanaman. Tetapi perlu diingat bahwa efisiensi fotosintesis dan hasil tanaman adalah dua hal berbeda.

Efisiensi fotosintesis maksimum tercapai pada intensitas cahaya yang rendah, tidak pada intensitas cahaya matahari penuh dan hari panjang, di mana hasil tanaman tertinggi dicapai. Jika diperhitungkan total PAR yang diterima

pada permukaan lahan, maka efisiensi produksi biomas secara keseluruhan selama kurang dari 18%. Nilai teoritis 18% tersebut dihitung dengan asumsi 12 mol foton mewakili jumlah foton minimum yang dibutuhkan untuk fiksasi 1 mol CO<sub>2</sub>, dan jumlah rata-rata foton dalam kisaran PAR (dihitung pada panjang gelombang 550 nm).

Berdasarkan persamaan Planck, dapat dihitung bahwa 1 mol foton tersebut akan menghasilkan energi 217 KJ (51.900 kalori), berarti 12 mol foton menghasilkan energi  $2,6 \times 10^6$  J. Jumlah ini merupakan jumlah energi yang diterima. Energi yang dihasilkan 1 mol karbon yang difiksasi dalam karbohidrat adalah  $0,48 \times 10^6$  J. Efisiensi adalah perbandingan antara energi yang dihasilkan (dari 1 mol C) dengan energi yang digunakan (dari 12 mol foton), dalam contoh kasus ini efisiensi adalah 18%.



**Soal Evaluasi 8**

1. Jelaskan bagaimana cahaya menyebabkan terjadinya fotosintesis!
2. Pembentukan ATP dari ADP dan P, secara termodinamik tidak akan terjadi tanpa bantuan energi cahaya. Jelaskan yang kalian ketahui bagaimana proses pembentukan ATP, ADP dan P!
3. Jelaskan tiga tahap utama pada Siklus Calvin!



## BAB IX

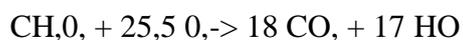
### RESPIRASI

#### A. Kuosien Respirasi

Jika karbohidrat seperti sukrosa, fruktan, atau pati yang digunakan sebagai substrat pada proses respirasi dan jika senyawa tersebut teroksidasi secara sempurna, maka jumlah O<sub>2</sub> yang digunakan akan persis sama dengan jumlah CO<sub>2</sub> yang dihasilkan. Nisbah CO<sub>2</sub> O<sub>2</sub> ini disebut Kuosien Respirasi, sering disingkat RQ (respiratory quotient).

Nilai RQ ini pada kebanyakan kasus akan mendekati nilai 1. Sebagai contoh, nilai RQ rata-rata dari daun berbagai spesies adalah sekitar 1,05. Biji dari tanaman serealia dan legum di mana pati merupakan cadangan karbohidrat utama juga menunjukkan nilai RQ mendekati 1,0. Tetapi jika bahan cadangan yang dominan bukan pati, misalnya lemak atau minyak, maka nilai RQ dapat menjadi lebih rendah.

Nilai RQ serendah 0,7 dapat terjadi. Sebagai contoh adalah oksidasi asam lemak yang umum dijumpai, yakni asam oleat.



Nilai RQ dari reaksi di atas adalah  $18/25,5 = 0,71$ . Dengan mengetahui nilai RQ dari suatu organ atau jaringan, akan dapat diperkirakan jenis senyawa yang dioksidasi (substrat dari proses respirasi) pada organ atau jaringan tersebut.

## B. Pembentukan Gula Heksosa

Penyimpanan dan Degradasi Pati. Pati disimpan dalam bentuk butiran yang tak larut dalam air, yang terdiri dari molekul amilopektin yang bercabang dan molekul amilosa yang tak bercabang. Pati yang terakumulasi pada kloroplas selama fotosintesis berlangsung merupakan cadangan karbohidrat yang penting pada daun hampir semua spesies.

Pati yang terbentuk di dalam amiloplas suatu jaringan atau organ (dengan menggunakan sukrosa yang diangkut dari organ fotosintetik melalui pembuluh floem) juga merupakan karbohidrat cadangan yang penting dari jaringan atau organ tersebut. Pati yang diakumulasi ini dapat digunakan sebagai substrat respirasi yang penting pada stadia pertumbuhan atau perkembangan tertentu dari organ ini.

Sebagai contoh, pati yang terakumulasi pada umbi kentang atau biji tanaman yang digunakan sebagai benih akan dioksidasi pada saat umbi atau biji tersebut mulai tumbuh. Degradasi pati akan dipacu oleh 3 enzim utama (beberapa enzim lain juga ikut berperan dalam degradasi pati), yakni alfa amilase, beta amilase, dan fosforilase.

Di antara ketiga enzim ini, hanya alfa amilase yang secara langsung dapat berperan mengurai molekul pati yang masih utuh. Jika beta amilase dan fosforilase ikut berperan, kedua enzim ini mengurai lebih lanjut hasil awal penguraian pati oleh enzim alfa amilase.

### C. Glikolisis

Rangkaian reaksi untuk mengkonversi glukosa, glukosa-1-P, dan fruktosa menjadi asam piruvat pada sitosol disebut reaksi glikolisis. Glikolisis secara harfiah berarti penguraian gula (pada awalnya istilah ini digunakan untuk menjelaskan proses penguraian gula untuk menghasilkan etil alkohol atau etanol, tetapi penguraian gula pada kondisi kecukupan oksigen akan menghasilkan asam yang diurai adalah heksosa.

Beberapa tahap dari reaksi glikolisis mungkin berlangsung pada kloroplas atau plastida lainnya, tetapi reaksi pada plastida-plastida ini tidak lengkap. Glikolisis merupakan tahap pertama dari 3 tahap proses respirasi. Glikolisis kemudian diikuti oleh reaksi-reaksi pada Siklus Krebs dan selanjutnya transfer elektron yang berlangsung pada mitokondria.

Secara ringkas reaksi glikolisis dapat ditulis sebagai berikut:



Glikolisis memberikan beberapa manfaat, yakni:

1. Mereduksi 2 molekul  $\text{NAD}^+$  menjadi  $\text{NADH}$  untuk setiap molekul heksosa yang dirombak.
2. Setiap molekul heksosa yang dirombak akan dihasilkan 2 molekul ATP, jika substratnya berupa glukosa -1-P, glukosa-6-P, atau fruktosa-6-P maka akan dihasilkan 3 molekul ATP.

3. Melalui glikolisis akan dihasilkan senyawa-senyawa antara yang dapat menjadi bahan baku untuk sintesis berbagai senyawa yang terdapat dalam tumbuhan.

#### **D. Fermentasi**

Walaupun glikolisis dapat berlangsung dengan tanpa kehadiran O<sub>2</sub>, tetapi tahap berikutnya, yakni oksidasi piruvat dan NAD membutuhkan O<sub>2</sub>. Jika oksigen tidak tersedia, maka piruvat dan NADH akan terakumulasi dan tumbuhan akan melangsungkan proses fermentasi (respirasi anaerobik) yang akan menghasilkan etanol atau asam malat.

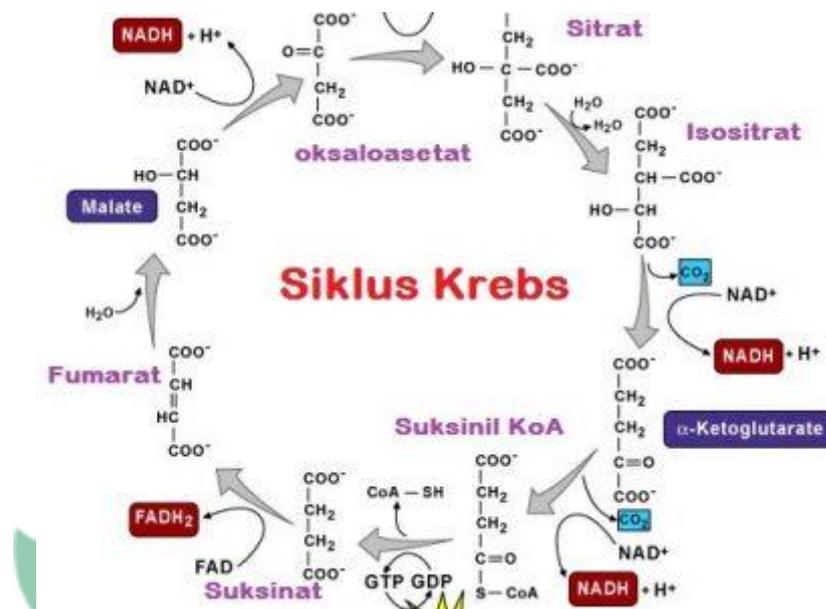
Proses fermentasi ini umum dijumpai pada sistem perakaran tumbuhan jika mengalami penggenangan. Pada reaksi fermentasi akan dihasilkan asetaldehida melalui proses dekarboksilasi. kemudian asetaldehida direduksi oleh NADH untuk menghasilkan etanol.

Reaksi terakhir ini tergantung pada aktivitas enzim alkohol dehidrogenase. Aktivitas enzim ini yang akan menentukan apakah etanol atau asam malat yang akan dihasilkan sebagai produk reaksi fermentasi.

#### **E. Siklus Krebs**

Siklus Krebs disebut juga Siklus Asam Sitrat, karena asam sitrat merupakan senyawa antara yang penting; dan juga disebut Siklus Asam Trikarboksilat, karena asam sitrat atau asam isositrat sebagai senyawa antara tersebut memiliki 3 gugus karboksil. Reaksi-reaksi Siklus Krebs ini berlangsung pada mitokondria.

Mitokondria baru dapat diisolasi dari sel secara utuh dan fungsional pada awal tahun 1950-an. Tahap awal dari Siklus Krebs adalah oksidasi (dan lepasnya satu CO<sub>2</sub>) dari piruvat (yang dihasilkan dari reaksi glikolisis). Kemudian unit asetat dengan 2-C yang tersisa bergabung dengan suatu senyawa.



**Gambar 9.1**

Struktur siklus kerbs

## F. Sistem Pengangkutan Elektron Dan Fosforilasi Oksidatif

Jika NADH dan FADH<sub>2</sub> yang dihasilkan dari Glikolisis maupun Siklus Krebs dioksidasi, maka akan dihasilkan ATP. Walaupun dalam reaksi oksidasi ini akan diserap O<sub>2</sub> dan dihasilkan H<sub>2</sub>O, namun NADH dan FADH<sub>2</sub> tidak dapat bereaksi langsung dengan oksigen dan molekul air tersebut. Elektron yang terlibat ditransfer melalui beberapa senyawa perantara sebelum H<sub>2</sub>O dibentuk.

Senyawa-senyawa yang berperan ini membentuk sistem pengangkutan elektron pada mitokondria. Pengangkutan elektron berlangsung mulai dari senyawa perantara yang secara termodinamis sulit direduksi (senyawa dengan potensial reduksi negatif) menuju senyawa yang mempunyai kecenderungan yang lebih besar untuk menerima elektron (senyawa dengan potensial reduksi yang lebih tinggi atau bahkan positif).

Oksigen mempunyai kecenderungan tertinggi untuk menerima elektron. Setiap senyawa pembawa elektron dalam sistem ini hanya menerima elektron dari senyawa pembawa lainnya yang letaknya berdekatan dengannya. Senyawa-senyawa pembawa elektron ini tersusun secara terbaris pada bagian dalam membran mitokondria. Pada setiap mitokondria terdapat ribuan sistem pengangkutan elektron.

### **G. Efisiensi Respirasi**

Jika heksosa dioksidasi secara sempurna menjadi  $\text{CO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{O}$  melalui glikolisis, Siklus Krebs, dan sistem pengangkutan elektron, maka akan dihasilkan energi yang sebagian dalam bentuk ATP dan sebagian hilang dalam bentuk panas. Perbandingan antara energi yang terperangkap dalam ATP dengan total energi yang dihasilkan dari oksidasi molekul heksosa menjadi ukuran efisiensi proses respirasi.

Pada tahap glikolisis akan dihasilkan 2 ATP dan 2 NADH per molekul heksosa. Oksidasi masing-masing NADH melalui sistem pengangkutan elektron akan menghasilkan 2 ATP, berarti secara total pada tahap glikolisis akan dihasilkan 6 ATP per molekul heksosa. Siklus Krebs akan menghasilkan

2 ATP per heksosa (atau per 2 molekul piruvat) saat suksinil CoA dipecah menjadi suksinat dan COASH.

Kemudian, pada Siklus Krebs juga akan dihasilkan 8 NADH per molekul heksosa pada matriks mitokhondria, di mana melalui fosforilasi oksidatif setiap molekul NADH akan dihasilkan 3 ATP, berarti 24 ATP per heksosa. Masing-masing FADH<sub>2</sub> dari Siklus Krebs akan menghasilkan 2 ATP melalui fosforilasi oksidatif, berarti 4 ATP per molekul heksosa. Kontribusi total Siklus Krebs per molekul heksosa adalah 30 ATP. Jika ditambah dengan ATP dari tahap glikolisis, maka oksidasi 1 molekul heksosa akan menghasilkan 36 ATP melalui respirasi.

#### **H. Lintasan Pentosa Fosfat**

Setelah tahun 1950, mulai disadari bahwa glikolisis dan Siklus Krebs bukan merupakan rangkaian reaksi satu-satunya bagi tumbuhan untuk mendapatkan energi dari oksidasi gula menjadi karbon dioksida dan air. Lintasan reaksi yang berbeda dengan glikolisis dan Siklus Krebs ini disebut Lintasan Pentosa Fosfat (LPF), karena terbentuk senyawa antara yang terdiri dari 5 atom karbon.

Lintasan ini juga disebut sebagai Lintasan Fosfoglukonat. Beberapa senyawa antara yang terbentuk pada LPF sama dengan yang terbentuk pada Siklus Calvin pada kloroplas. Perbedaannya adalah pada Siklus Calvin senyawa-senyawa gula fosfat tersebut merupakan hasil sintesis; sedangkan

pada LPF senyawa gula fosfat merupakan hasil degradasi senyawa yang lebih besar.

Antara glikolisis dan LPF juga terdapat beberapa reaktan yang sama dan keduanya berlangsung pada sitosol sel. Perbedaan utamanya adalah pada LPF sebagai penerima elektronnya selalu NADP<sup>+</sup>, sedangkan pada glikolisis yang menjadi penerima elektron umumnya adalah NAD.

### **I. Senyawa Antara Reaksi Respirasi Dan Sintesis Makromolekul**

Beberapa senyawa-antara dalam reaksi-reaksi respirasi (baik glikolisis maupun Siklus Krebs) merupakan senyawa awal untuk sintesis berbagai senyawa yang dibutuhkan untuk pertumbuhan tanaman.

Beberapa senyawa yang disintesis tersebut adalah senyawa molekul besar (makromolekul) seperti lipida, protein, khlorofil, dan asam-asam nukleat, Untuk sintesis makromolekul ini dibutuhkan ATP dan elektron yang disumbangkan oleh NADPH atau NADH. Suatu proses lainnya yang membutuhkan NADH adalah reduksi nitrat menjadi nitrit

### **J. Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Respirasi**

Laju respirasi tentu tergantung pada ketersediaan substrat, yakni senyawa yang akan diurai melalui rangkaian reaksi mengandung cadangan pati, fruktan, dan gula yang rendah akan menunjukkan laju respirasi yang rendah pula. Jika starvasi (defisiensi bahan cadangan makanan) pada tumbuhan terjadi sangat parah, maka protein juga dapat dioksidasi.

Protein tersebut dihidrolisis menjadi asam-asam amino penyusunnya, yang kemudian diurai melalui reaksi-reaksi glikolitik dan Siklus Krebs. Asam glutamat dan aspartat akan dikonversi menjadi asam alfa-ketoglutarat dan asam oksaloasetat. Demikian pula halnya dengan alanin yang dioksidasi untuk membentuk asam piruvat. Pada saat daun mulai menguning, yang telah dijelaskan terdahulu.



**Soal Evaluasi 9**

1. Sebutkan dan jelaskan faktor-faktor yang mempeharuhi respirasi !
2. Jelaskan dengan lengkap tahap awal sampai akhir siklus krebs, dan sebutkan fungsi utama siklus krebs!
3. Tuliskan secara ringkas reaksi glikolisis dan sebutkan manfaat dari glikolisis.



**BAB X****UAS****SOAL UAS (UJIAN AKHIR SEMESTER)**

Jelaskan yang kalian ketahui tentang metabolisme dan peran enzim pada tumbuhan!

1. Bagaimana dengan peranan enzim? Apakah peranan enzim sama dengan peranan suhu dalam memacu laju reaksi? jelaskan!
2. Jelaskan proses terjadinya fotosintesis!
3. Gambarkan dan jelaskan tiga tahap utama pada siklus calvin!
4. Apa yang kalian ketahui tentang sintesis sukrosa, pati dan fruktan? Jelaskan!
5. Sebutkan dan jelaskan faktor-faktor yang mempengaruhi laju fotosintesis !
6. Jelaskan mekanisme pengangkutan melalui floem pada tumbuhan!
7. Jelaskan proses fermentasi pada tumbuhan!
8. Jelaskan dengan lengkap tahap awal sampai akhir siklus krebs, dan sebutkan fungsi utama siklus krebs!
9. Sebutkan dan jelaskan faktor-faktor yang mempengaruhi respirasi !
10. Tuliskan secara ringkas reaksi glikolisis dan sebutkan manfaat dari glikolisis.

**DAFTAR PUSTAKA**

- Baker, D.A. 1978. Transport Phenomena in Plants. Halsted Press, New York.
- Benyamin Lakitan, 2018 Dasar-dasar fisiologi tumbuhan. Rajawali pers, Depok.
- Kochian, L.V. and W.L. Lucas, 1982, Potassium Transport in Corn Roots, Plant Physiology 70:1723-1731.
- Marcelle, R., H. Clijsters, and M. van Poucke (editors). 1986. Biological Control of Photosynthesis. Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht.
- Milthorpe, F.L. and J. Moorby. 1988. An Introduction to Crop Physiology. Second Edition. Cambridge University Press, Cambridge.
- Petrucci, R.H. 1982. General Chemistry: Principles and Modern Applications. Macmillan Publishing Co., Inc., New York.
- Salisbury, F.B. and C.W. Ross. 1985. Plant Physiology. Third Edition. Wadsworth Publishing Co., Belmont, California
- Zeiger, E., G.D. Farquhar, and I.R. Cowan (editors). 1987. Stomatal Function. Stanford University Press, Stanford, California.

