

BAHAN AJAR (AH 22315)



# **LINTASAN C-3 FOTOSINTESIS PADA TANAMAN**

Oleh :  
**I Nengah Artha**

**PROGRAM STUDI AGROEKOTEKNOLOGI  
FAKULTAS PERTANIAN UNIVERSITAS UDAYANA  
2016**

## KATA PENGANTAR

Bahan ajar tentang “Lintasan C-3 fotosintesis” sebagai bagian dari materi pokok fotosintesis sebagaimana yang termuat dalam silabus mata kuliah Fisiologi Tumbuhan (sandi mata kuliah AG 3138) disusun untuk membantu para mahasiswa agar lebih mudah dapat memahami segala hal yang berkaitan dengan fotosintesis khususnya pada lintasan C-3 yang terjadi pada tanaman-tanaman yang dikelompokkan sebagai tanaman C-3.

Bahan ajar ini sebagai review dari berbagai sumber / referensi yang tentunya akan terus direvisi untuk penyempurnaannya. Untuk maksud tersebut tentunya diperlukan masukan-masukan dari semua pihak.

Mudah-mudahan bahan ajar yang sangat sederhana ini dapat bermanfaat banyak bagi para mahasiswa khususnya, dan terima kasih atas segala dorongan dan bantuan dari kawan-kawan sehingga bahan ajar ini bisa diselesaikan penyusunannya.

Denpasar, Agustus 2016

Penyusun

I Nengah Artha

NIP. 195401131980031004

## DAFTAR ISI

Halaman

KATA PENGANTAR

DAFTAR ISI

I.	PENDAHULUAN .....	1
II.	FOTOSINTESIS PADA TANAMAN C-3 .....	2
	2.1. Perangkat Fotosintesis .....	3
	2.2. Mekanisme Fotosintesis .....	

DAFTAR PUSTAKA

## I. PENDAHULUAN

**Fotosintesis** adalah suatu proses biokimia pembentukan zat makanan seperti karbohidrat ( mono,di, polysacharida, amilum, glukosa bebas pada buah-buahan) yang dilakukan oleh tumbuhan, terutama tumbuhan yang mengandung zat hijau daun atau klorofil. Karbohidrat yang dihasilkan ini adalah sebagai bahan dasar bagi pembentukan senyawa-senyawa lain dalam tubuh tumbuh-tumbuhan untuk kemudian akan secara perlahan-lahan menjadi organ tanaman dan akhirnya terbentuklah tanaman secara utuh.

Peranan fotosintesis sangat penting bagi semua kehidupan di Bumi karena selain untuk menjaga tingkat normal oksigen di atmosfer, fotosintesis juga merupakan sumber energi bagi hampir semua kehidupan di Bumi, baik secara langsung (melalui produksi primer) maupun tidak langsung (sebagai sumber utama energi dalam makanan mereka). Dapat dikatakan bahwa semua kehidupan di permukaan bumi ini adalah tergantung pada fotosintesis, kecuali pada organisme kemoautotrof yang hidup di bebatuan atau di lubang angin hidrotermal di laut yang dalam

## II. FOTOSINTESIS

Sifat khusus yang dimiliki tumbuhan adalah kemampuannya untuk menggunakan unsur karbon atmosfer untuk diubah menjadi senyawa-senyawa organik. Selain tumbuhan, makhluk hidup non-klorofil lain yang berfotosintesis adalah alga dan beberapa jenis bakteri. Organisme ini berfotosintesis dengan menggunakan zat hara, karbon dioksida, dan air serta bantuan energi cahaya matahari.

Organisme fotosintesis disebut *fotoautotrof* karena mereka dapat membuat makanannya sendiri. Pada tanaman, alga, dan cyanobacteria, fotosintesis dilakukan dengan memanfaatkan karbondioksida dan air serta menghasilkan produk buangan oksigen. Fotosintesis sangat penting bagi semua kehidupan aerobik di Bumi karena selain untuk menjaga tingkat normal oksigen di atmosfer, fotosintesis juga merupakan sumber energi bagi hampir semua kehidupan di Bumi, baik secara langsung (melalui produksi primer) maupun tidak langsung (sebagai sumber utama energi dalam makanan mereka), kecuali pada organisme kemoautotrof yang hidup di bebatuan atau di lubang angin hidrotermal di laut yang dalam. Tingkat penyerapan energi oleh fotosintesis sangat tinggi, yaitu sekitar 100 terawatt, atau kira-kira enam kali lebih besar daripada konsumsi energi peradaban manusia. Selain energi, fotosintesis juga menjadi sumber karbon bagi semua senyawa organik dalam tubuh organisme. Fotosintesis mengubah sekitar 100–115 petagram karbon menjadi biomassa setiap tahunnya.

Meskipun fotosintesis dapat berlangsung dalam berbagai cara pada berbagai spesies, beberapa cirinya selalu sama. Misalnya, prosesnya selalu dimulai dengan energi cahaya diserap oleh protein berklorofil yang disebut pusat reaksi fotosintesis. Pada tumbuhan, protein ini tersimpan di dalam organel yang disebut kloroplas, sedangkan pada bakteri, protein ini tersimpan pada membran plasma. Sebagian dari energi cahaya yang dikumpulkan oleh klorofil disimpan dalam bentuk adenosin trifosfat (ATP). Sisa energinya digunakan untuk memisahkan elektron dari zat seperti air. Elektron ini digunakan dalam reaksi yang mengubah karbondioksida menjadi senyawa organik. Pada tumbuhan, alga, dan cyanobacteria, ini dilakukan dalam suatu rangkaian reaksi yang disebut siklus Calvin, namun rangkaian reaksi yang berbeda ditemukan pada beberapa

bakteri, misalnya siklus Krebs terbalik pada *Chlorobium*. Banyak organisme fotosintesis memiliki adaptasi yang mengonsentrasikan atau menyimpan karbondioksida. Ini membantu mengurangi proses boros yang disebut fotorespirasi yang dapat menghabiskan sebagian dari gula yang dihasilkan selama fotosintesis.

Organisme fotosintesis pertama kemungkinan berevolusi sekitar 3.500 juta tahun silam, pada masa awal sejarah evolusi kehidupan ketika semua bentuk kehidupan di Bumi merupakan mikroorganisme dan atmosfer memiliki sejumlah besar karbondioksida. Makhluk hidup ketika itu sangat mungkin memanfaatkan hidrogen atau hidrogen sulfida—bukan air—sebagai sumber elektron. Cyanobacteria muncul kemudian, sekitar 3.000 juta tahun silam, dan secara drastis mengubah Bumi ketika mereka mulai mengoksigenkan atmosfer pada sekitar 2.400 juta tahun silam. Atmosfer baru ini memungkinkan evolusi kehidupan kompleks seperti protista. Pada akhirnya, tidak kurang dari satu miliar tahun silam, salah satu protista membentuk hubungan simbiosis dengan satu cyanobacteria dan menghasilkan nenek moyang dari seluruh tumbuhan dan alga. Kloroplas pada tumbuhan modern merupakan keturunan dari cyanobacteria yang bersimbiosis ini.

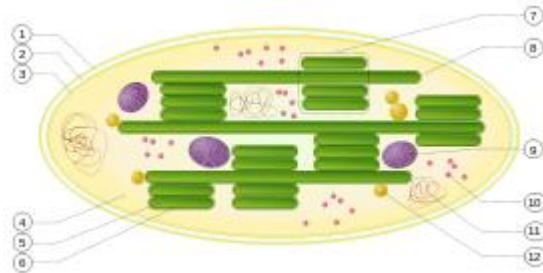
## **2.1.Perangkat Fotosintesis**

### **2.1.1. Kloroplas**

Proses fotosintesis tidak terjadi pada semua bagian daun, melainkan terbatas hanya pada kloroplas. Kloroplas adalah suatu organela yang sangat kompleks,

bersifat mobil dan umumnya berwarna hijau karena adanya khlorofil, tempat dimana proses fotosintesis itu dimulai.

Khloroplas berbentuk lensa dengan struktur lengkap seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.1, sebagai berikut :



Gambar 2.1. Struktur kloroplas:

1. membran luar
2. ruang antar membran
3. membran dalam (1+2+3: bagian amplop)
4. stroma
5. lumen tilakoid (inside of thylakoid)
6. membran tilakoid
7. granum (kumpulan tilakoid)
8. tilakoid (*lamella*)
9. pati
10. ribosom
11. DNA plastida
12. Plastoglobula

Kloroplas terdapat pada semua bagian tumbuhan yang berwarna hijau, termasuk batang dan buah yang belum matang. Di dalam kloroplas terdapat pigmen klorofil yang berperan dalam proses fotosintesis. Kloroplas mempunyai bentuk seperti cakram dengan ruang yang disebut stroma. Stroma ini dibungkus oleh dua lapisan membran. Membran stroma ini disebut tilakoid, yang di dalamnya terdapat ruang-ruang antar membran yang disebut lokuli.

Di dalam stroma juga terdapat lamela-lamela yang bertumpuk-tumpuk membentuk grana (kumpulan granum). Granum sendiri terdiri atas membran tilakoid yang merupakan tempat terjadinya reaksi terang dan ruang tilakoid yang merupakan ruang di antara membran tilakoid. Bila sebuah granum disayat maka akan dijumpai beberapa komponen seperti protein, klorofil a, klorofil b, karetonoid, dan lipid.

Secara keseluruhan, stroma berisi protein, enzim, DNA, RNA, gula fosfat, ribosom, vitamin-vitamin, dan juga ion-ion logam seperti mangan (Mn), besi (Fe), maupun tembaga (Cu). Pigmen fotosintetik terdapat pada membran tilakoid. Sedangkan, pengubahan energi cahaya menjadi energi kimia berlangsung dalam tilakoid dengan produk akhir berupa glukosa yang dibentuk di dalam stroma. Klorofil sendiri sebenarnya hanya merupakan sebagian dari perangkat dalam fotosintesis yang dikenal sebagai fotosistem.

### **2.1.2 Pigmen Fotosintesis**

Proses fotosintesis tidak dapat berlangsung pada setiap sel, tetapi hanya pada sel yang mengandung pigmen fotosintetik. Sel yang tidak mempunyai pigmen fotosintetik ini tidak mampu melakukan proses fotosintesis. Pada percobaan Jan Ingenhousz, dapat diketahui bahwa intensitas cahaya memengaruhi laju fotosintesis pada tumbuhan. Hal ini dapat terjadi karena perbedaan energi yang dihasilkan oleh setiap spektrum cahaya. Di samping adanya perbedaan energi tersebut, faktor lain yang menjadi pembeda adalah kemampuan daun dalam menyerap berbagai spektrum cahaya yang berbeda tersebut. Perbedaan kemampuan daun dalam menyerap



berbagai spektrum cahaya tersebut disebabkan adanya perbedaan jenis pigmen yang terkandung pada jaringan daun.

Di dalam daun terdapat mesofil yang terdiri atas jaringan bunga karang dan jaringan pagar. Pada kedua jaringan ini, terdapat kloroplas yang mengandung pigmen hijau klorofil. Pigmen ini merupakan salah satu dari pigmen fotosintesis yang berperan penting dalam menyerap energi matahari.

Dari semua radiasi Matahari yang dipancarkan, hanya panjang gelombang tertentu yang dimanfaatkan tumbuhan untuk proses fotosintesis, yaitu panjang gelombang yang berada pada kisaran cahaya tampak (380-700 nm). Cahaya tampak terbagi atas cahaya merah (610 - 700 nm), hijau kuning (510 - 600 nm), biru (410 - 500 nm), dan violet (< 400 nm).

Masing-masing jenis cahaya berbeda pengaruhnya terhadap fotosintesis. Hal ini terkait pada sifat pigmen penangkap cahaya yang bekerja dalam fotosintesis. Pigmen yang terdapat pada membran grana menyerap cahaya yang memiliki panjang gelombang tertentu. Pigmen yang berbeda menyerap cahaya pada panjang gelombang yang berbeda. Kloroplas mengandung beberapa pigmen. Sebagai contoh, klorofil a terutama menyerap cahaya biru-violet dan merah, sementara klorofil b menyerap cahaya biru dan oranye dan memantulkan cahaya kuning-hijau. Klorofil a berperan langsung dalam reaksi terang, sedangkan klorofil b tidak secara langsung berperan dalam reaksi terang. Proses absorpsi energi cahaya menyebabkan lepasnya elektron berenergi tinggi dari klorofil a yang selanjutnya akan disalurkan dan ditangkap oleh akseptor elektron. Proses ini merupakan awal dari rangkaian panjang reaksi fotosintesis.

### **2.1.3 Fotosistem**

Fotosistem adalah suatu unit yang mampu menangkap energi cahaya Matahari yang terdiri dari klorofil a, kompleks antena, dan akseptor elektron. Di dalam kloroplas terdapat beberapa macam klorofil dan pigmen lain, seperti klorofil a yang berwarna hijau muda, klorofil b berwarna hijau tua, dan karoten yang berwarna kuning sampai jingga. Pigmen-pigmen tersebut mengelompok dalam membran tilakoid dan membentuk perangkat pigmen yang berperan penting dalam fotosintesis.

Klorofil a berada dalam bagian pusat reaksi. Klorofil ini berperan dalam menyalurkan elektron yang berenergi tinggi ke akseptor utama elektron. Elektron ini selanjutnya masuk ke sistem siklus elektron. Elektron yang dilepaskan klorofil a mempunyai energi tinggi sebab memperoleh energi dari cahaya yang berasal dari molekul perangkat pigmen yang dikenal dengan kompleks antena.

Fotosistem sendiri dapat dibedakan menjadi dua, yaitu fotosistem I dan fotosistem II. Pada fotosistem I ini penyerapan energi cahaya dilakukan oleh klorofil a yang sensitif terhadap cahaya dengan panjang gelombang 700 nm sehingga klorofil a disebut juga P700. Energi yang diperoleh P700 ditransfer dari kompleks antena. Pada fotosistem II penyerapan energi cahaya dilakukan oleh klorofil a yang sensitif terhadap panjang gelombang 680 nm sehingga disebut P680. P680 yang teroksidasi merupakan agen pengoksidasi yang lebih kuat daripada P700. Dengan potensial redoks yang lebih besar, akan cukup elektron negatif untuk memperoleh elektron dari molekul-molekul air.

#### **2.1.4. Membran dan organel fotosintesis**

Protein yang mengumpulkan cahaya untuk fotosintesis dilengkapi dengan membran sel. Cara yang paling sederhana terdapat pada bakteri, yang mana protein-protein ini tersimpan di dalam membran plasma. Akan tetapi, membran ini dapat terlipat dengan rapat menjadi lembaran silinder yang disebut tilakoid, atau terkumpul menjadi vesikel yang disebut *membran intrakitoplasma*. Struktur ini dapat mengisi sebagian besar bagian dalam sel, menjadikan membran itu memiliki area permukaan yang luas dan dengan demikian meningkatkan jumlah cahaya yang dapat diserap oleh bakteri.

Pada tumbuhan dan alga, fotosintesis terjadi di organel yang disebut kloroplas. Satu sel tumbuhan biasanya memiliki sekitar 10 sampai 100 kloroplas. Kloroplas ditutupi oleh suatu membran. Membran ini tersusun oleh membran dalam fosfolipid, membran luar fosfolipid, dan membran antara kedua membran itu. Di dalam membran terdapat cairan yang disebut stroma. Stroma mengandung tumpukan (grana) tilakoid, yang merupakan tempat berlangsungnya fotosintesis. Tilakoid berbentuk cakram datar, dilapisi oleh membran dengan lumen atau ruang tilakoid di dalamnya. Tempat terjadinya fotosintesis adalah membran tilakoid, yang mengandung kompleks membran integral dan kompleks membran perifer, termasuk membran yang menyerap energi cahaya, yang membentuk fotosistem.

Tumbuhan menyerap cahaya menggunakan pigmen klorofil, yang merupakan alasan kenapa sebagian besar tumbuhan memiliki warna hijau. Selain klorofil, tumbuhan juga menggunakan pigmen seperti karoten dan xantofil.<sup>[30]</sup> Alga juga menggunakan klorofil, namun memiliki beragam pigmen lainnya, misalnya fikosianin, karoten, dan xantofil

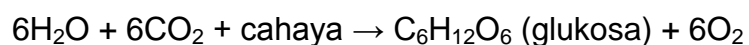
pada alga hijau, fikoeritrin pada alga merah (rhodophyta) dan fukoksantin pada alga cokelat dan diatom yang menghasilkan warna yang beragam pula.

Pigmen-pigmen ini terdapat pada tumbuhan dan alga pada protein antenna khusus. Pada protein tersebut semua pigmen bekerja bersama-sama secara teratur. Protein semacam itu disebut kompleks panen cahaya.

Walaupun semua sel pada bagian hijau pada tumbuhan memiliki kloroplas, sebagian besar energinya diserap di dalam daun. Sel pada jaringan dalam daun, disebut mesofil, dapat mengandung antara 450.000 sampai 800.000 kloroplas pada setiap milimeter persegi pada daun. Permukaan daun secara seragam tertutupi oleh kutikula lilin yang tahan air yang melindungi daun dari penguapan yang berlebihan dan mengurangi penyerapan sinar biru atau ultraviolet untuk mengurangi pemanasan. Lapisan epidermis yang tembus pandang memungkinkan cahaya untuk masuk melalui sel mesofil palisade tempat sebagian besar fotosintesis berlangsung.

### **III. FOTOSINTESIS PADA TUMBUHAN**

Tumbuhan bersifat autotrof. Autotrof artinya dapat mensintesis makanan langsung dari senyawa anorganik. Tumbuhan menggunakan karbon dioksida dan air untuk menghasilkan gula dan oksigen yang diperlukan sebagai makanannya. Energi untuk menjalankan proses ini berasal dari fotosintesis. Berikut ini adalah persamaan reaksi fotosintesis yang menghasilkan glukosa:



Glukosa dapat digunakan untuk membentuk senyawa organik lain seperti selulosa dan dapat pula digunakan sebagai bahan bakar. Proses ini berlangsung melalui respirasi seluler yang terjadi baik pada hewan maupun tumbuhan. Secara umum reaksi yang terjadi pada respirasi seluler berkebalikan dengan persamaan di atas. Pada respirasi, gula (glukosa) dan senyawa lain akan bereaksi dengan oksigen untuk menghasilkan karbon dioksida, air, dan energi kimia.

Tumbuhan menangkap cahaya menggunakan pigmen yang disebut klorofil. Pigmen inilah yang memberi warna hijau pada tumbuhan. Klorofil terdapat dalam organel yang disebut kloroplas. klorofil menyerap cahaya yang akan digunakan dalam fotosintesis. Meskipun seluruh bagian tubuh tumbuhan yang berwarna hijau mengandung kloroplas, namun sebagian besar energi dihasilkan di daun. Di dalam daun terdapat lapisan sel yang disebut mesofil yang mengandung setengah juta kloroplas setiap milimeter persegiannya. Cahaya akan melewati lapisan epidermis tanpa warna dan yang transparan, menuju mesofil, tempat terjadinya sebagian besar proses fotosintesis. Permukaan daun biasanya dilapisi oleh kutikula dari lilin yang bersifat anti air untuk mencegah terjadinya penyerapan sinar Matahari ataupun penguapan air yang berlebihan.

### **3.1. MEKANISME FOTOSINTESIS**

Fotosintesis terdiri dari dua tahap yang disebut reaksi terang, yang membutuhkan cahaya dan melibatkan pemecahan air serta pelepasan oksigen, dan reaksi gelap atau siklus Calvin, yang mengubah karbon dioksida menjadi gula.

Hingga sekarang fotosintesis masih terus dipelajari karena masih ada sejumlah tahap yang belum bisa dijelaskan, meskipun sudah sangat banyak yang diketahui tentang proses vital ini. Proses fotosintesis sangat kompleks karena melibatkan semua cabang ilmu pengetahuan alam utama, seperti fisika, kimia, maupun biologi sendiri.

Pada tumbuhan, organ utama tempat berlangsungnya fotosintesis adalah daun. Namun secara umum, semua sel yang memiliki kloroplas berpotensi untuk melangsungkan reaksi ini. Di organel inilah tempat berlangsungnya fotosintesis, tepatnya pada bagian stroma. Hasil fotosintesis (disebut *fotosintat*) biasanya dikirim ke jaringan-jaringan terdekat terlebih dahulu.

Pada dasarnya, rangkaian reaksi fotosintesis dapat dibagi menjadi dua bagian utama: **reaksi terang** (karena memerlukan cahaya) dan **reaksi gelap** (tidak memerlukan cahaya tetapi memerlukan karbon dioksida). Reaksi terang terjadi pada grana (tunggal: granum), sedangkan reaksi gelap terjadi di dalam stroma. Dalam reaksi terang, terjadi konversi energi cahaya menjadi energi kimia dan menghasilkan oksigen ( $O_2$ ). Sedangkan dalam reaksi gelap terjadi seri reaksi siklik yang membentuk gula dari bahan dasar  $CO_2$  dan energi (ATP dan NADPH). Energi yang digunakan dalam reaksi gelap ini diperoleh dari reaksi terang. Pada proses reaksi gelap tidak dibutuhkan cahaya matahari. Reaksi gelap bertujuan untuk mengubah senyawa yang mengandung atom karbon menjadi molekul gula.

Organisme fotosintesis itu autotrof, yang berarti bahwa mereka menyimpan energi, mereka dapat menyintesis makanan langsung dari karbondioksida, air, dan menggunakan energi dari cahaya. Mereka menumbuhkannya sebagai bagian dari

energi potensial mereka. Akan tetapi, tidak semua organisme menggunakan cahaya sebagai sumber energi untuk melaksanakan fotosintesis, karena *fotoheterotrof* menggunakan senyawa organik, dan bukan karbondioksida, sebagai sumber energi. Pada tumbuhan, alga, dan cyanobacteria, fotosintesis menghasilkan oksigen. Ini disebut *fotosintesis oksigen*. Walaupun ada beberapa perbedaan antara fotosintesis oksigen pada tumbuhan, alga, dan cyanobacteria, secara umum prosesnya cukup mirip pada organisme-organisme tersebut. Akan tetapi, ada beberapa jenis bakteri yang melakukan fotosintesis anoksigen, yang menyerap karbondioksida namun tidak menghasilkan oksigen.

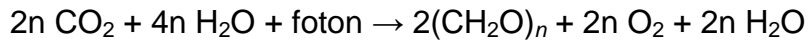
Karbondioksida diubah menjadi gula dalam suatu proses yang disebut fiksasi karbon. Fiksasi karbon adalah reaksi redoks, jadi fotosintesis memerlukan sumber energi untuk melakukan proses ini, dan elektron yang diperlukan untuk mengubah karbondioksida menjadi karbohidrat, merupakan reaksi reduksi. Secara umum, fotosintesis adalah kebalikan dari respirasi sel, yang mana glukosa dan senyawa lainnya teroksidasi untuk menghasilkan karbondioksida, air, dan menghasilkan energi kimia. Namun, dua proses itu berlangsung melalui rangkaian reaksi kimia yang berbeda dan pada kompartemen sel yang berbeda.

Persamaan umum untuk fotosintesis adalah sebagai berikut:



Karbondioksida + donor elektron + energi cahaya  $\rightarrow$  karbohidrat + donor elektron teroksidasi

Pada fotosintesis *okesigen* air adalah donor elektron dan, karena merupakan hidrolisis melepaskan oksigen, persamaan untuk proses ini adalah:



karbondioksida + air + energi cahaya  $\rightarrow$  karbohidrat + oksigen + air

Seringkali  $2n$  molekul air dibatalkan pada kedua pihak, sehingga menghasilkan:



karbondioksida + air + energi cahaya  $\rightarrow$  karbohidrat + oksigen

Proses lainnya menggantikan senyawa lainnya (Seperti arsenit) dengan air pada peran suplai-elektron; mikroba menggunakan cahaya matahari untuk mengoksidasi arsenit menjadi arsenat:<sup>[34]</sup> Persamaan untuk reaksinya adalah sebagai berikut:



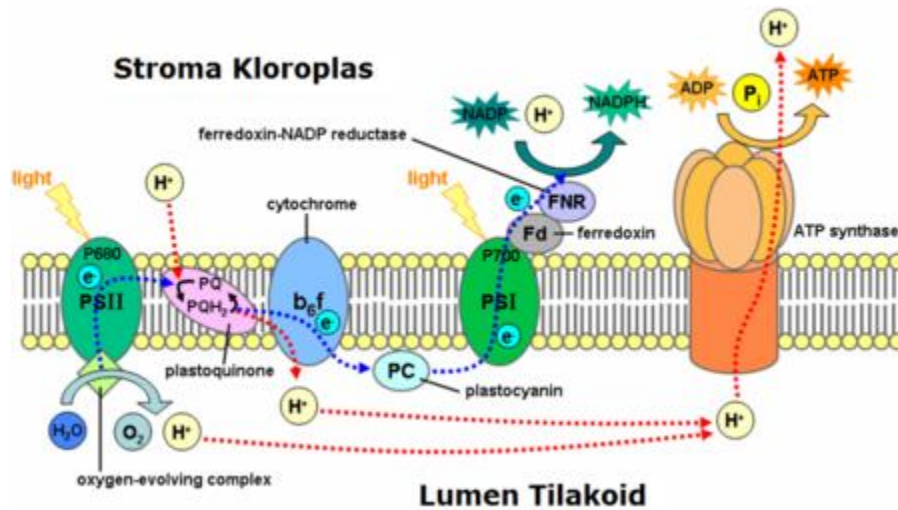
karbondioksida + arsenit + energi cahaya  $\rightarrow$  arsenat + karbonmonoksida  
(digunakan untuk membuat senyawa lainnya dalam reaksi berikutnya)

Fotosintesis terjadi dalam dua tahap. Pada tahap pertama, *reaksi terang* atau *reaksi cahaya* menyerap energi cahaya dan menggunakannya untuk menghasilkan molekul penyimpan energi ATP dan NADPH. Pada tahap kedua, *reaksi gelap* menggunakan produk ini untuk menyerap dan mengurangi karondioksida.

Sebagian besar organisme yang melakukan fotosintesis untuk menghasilkan oksigen menggunakan cahaya nampak untuk melakukannya, meskipun setidaknya tiga menggunakan radiasi inframerah.<sup>[36]</sup>



### 3.1.1 Reaksi terang

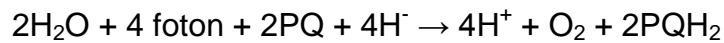


Reaksi terang fotosintesis pada membran tilakoid

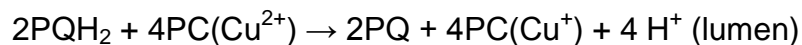
Reaksi terang adalah proses untuk menghasilkan ATP dan reduksi NADPH<sub>2</sub>. Reaksi ini memerlukan molekul air dan cahaya Matahari. Proses diawali dengan penangkapan foton oleh pigmen sebagai antena

Reaksi terang melibatkan dua fotosistem yang saling bekerja sama, yaitu fotosistem I dan II. Fotosistem I (PS I) berisi pusat reaksi P700, yang berarti bahwa fotosistem ini optimal menyerap cahaya pada panjang gelombang 700 nm, sedangkan fotosistem II (PS II) berisi pusat reaksi P680 dan optimal menyerap cahaya pada panjang gelombang 680 nm. Mekanisme reaksi terang diawali dengan tahap dimana fotosistem II menyerap cahaya Matahari sehingga elektron klorofil pada PS II tereksitasi dan menyebabkan muatan menjadi tidak stabil. Untuk menstabilkan kembali, PS II akan mengambil elektron dari molekul H<sub>2</sub>O yang ada disekitarnya. Molekul air akan dipecahkan oleh ion mangan (Mn) yang bertindak sebagai enzim. Hal ini akan mengakibatkan pelepasan H<sup>+</sup> di lumen tilakoid.

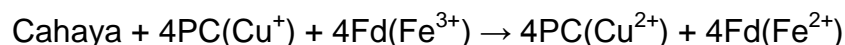
Dengan menggunakan elektron dari air, selanjutnya PS II akan mereduksi plastokuinon (PQ) membentuk PQH<sub>2</sub>. Plastokuinon merupakan molekul kuinon yang terdapat pada membran lipid bilayer tilakoid. Plastokuinon ini akan mengirimkan elektron dari PS II ke suatu pompa H<sup>+</sup> yang disebut sitokrom b<sub>6</sub>-f kompleks. Reaksi keseluruhan yang terjadi di PS II adalah



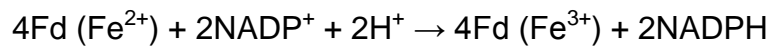
Sitokrom b<sub>6</sub>-f kompleks berfungsi untuk membawa elektron dari PS II ke PS I dengan mengoksidasi PQH<sub>2</sub> dan mereduksi protein kecil yang sangat mudah bergerak dan mengandung tembaga, yang dinamakan plastosianin (PC). Kejadian ini juga menyebabkan terjadinya pompa H<sup>+</sup> dari stroma ke membran tilakoid. Reaksi yang terjadi pada sitokrom b<sub>6</sub>-f kompleks adalah<sup>1</sup>:



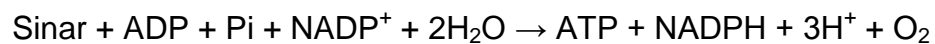
Elektron dari sitokrom b<sub>6</sub>-f kompleks akan diterima oleh fotosistem I. Fotosistem ini menyerap energi cahaya terpisah dari PS II, tapi mengandung kompleks inti terpisah, yang menerima elektron yang berasal dari H<sub>2</sub>O melalui kompleks inti PS II lebih dahulu.<sup>1</sup> Sebagai sistem yang bergantung pada cahaya, PS I berfungsi mengoksidasi plastosianin tereduksi dan memindahkan elektron ke protein Fe-S larut yang disebut ferredoksin. Reaksi keseluruhan pada PS I adalah



Selanjutnya elektron dari feredoksin digunakan dalam tahap akhir pengangkutan elektron untuk mereduksi  $\text{NADP}^+$  dan membentuk NADPH. Reaksi ini dikatalisis dalam stroma oleh enzim feredoksin- $\text{NADP}^+$  reduktase. Reaksinya adalah



Ion  $\text{H}^+$  yang telah dipompa ke dalam membran tilakoid akan masuk ke dalam ATP sintase. ATP sintase akan menggandengkan pembentukan ATP dengan pengangkutan elektron dan  $\text{H}^+$  melintasi membran tilakoid. Masuknya  $\text{H}^+$  pada ATP sintase akan membuat ATP sintase bekerja mengubah ADP dan fosfat anorganik (Pi) menjadi ATP. Reaksi keseluruhan yang terjadi pada reaksi terang adalah sebagai berikut:



Pada tanaman, reaksi terang terjadi pada membran tilakoid di kloroplas dan menggunakan energi cahaya untuk menyintesis ATP dan NADPH. Reaksi terang memiliki dua bentuk: siklus dan nonsiklus. Pada reaksi nonsiklus, foton diserap pada kompleks antena fotosistem II penyerap cahaya oleh klorofil dan pigmen aksesoris lainnya. Ketika molekul klorofil pada inti pusat reaksi fotosistem II memperoleh energi eksitasi yang cukup dari pigmen antena yang berdekatan dengannya, satu elektron akan dipindahkan ke molekul penerima elektron, yaitu feopftin, melalui sebuah proses yang disebut pemisahan tenaga terfotoinduksi. Elektron ini dipindahkan melalui rangkaian transport elektron, yang disebut **skema Z**, yang pada awalnya berfungsi untuk menghasilkan potensi kemiosmosis di sepanjang membran.

Satu enzim sintase ATP menggunakan potensi kemiosmosis untuk menghasilkan ATP selama fotofosforilasi, sedangkan NADPH adalah produk dari reaksi redoks terminal pada *skema Z*. Elektron masuk ke molekul klorofil pada fotosistem II. Elektron ini tereksitasi karena cahaya yang diserap oleh fotosistem. Pembawa elektron kedua menerima elektron, yang lagi-lagi dilewatkan untuk menurunkan energi penerima elektron. Energi yang dihasilkan oleh penerima elektron digunakan untuk menggerakkan ion hidrogen di sepanjang membran tilakoid sampai ke dalam lumen.

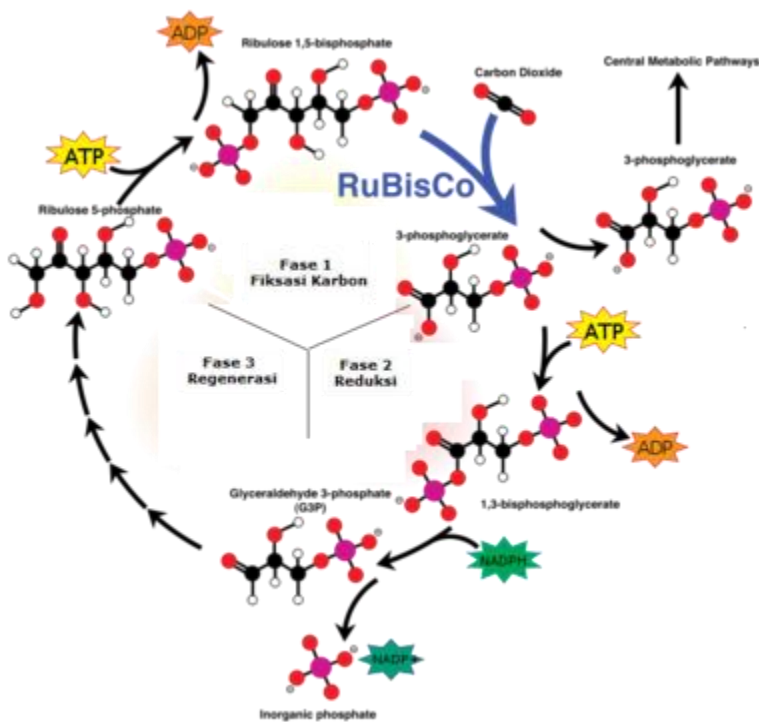
Elektron digunakan untuk mereduksi koenzim NADP, yang memiliki fungsi pada reaksi terang. Reaksi siklus mirip dengan nonsiklus, namun berbeda pada bentuknya karena hanya menghasilkan ATP, dan tidak ada NADP (NADPH) tereduksi yang dihasilkan. Reaksi siklus hanya berlangsung pada fotosistem I. Setelah elektron dipindahkan dari fotosistem, elektron digerakkan melewati molekul penerima elektron dan dikembalikan ke fotosistem I, yang dari sanalah awalnya elektron dikeluarkan, sehingga reaksi ini diberi nama *reaksi siklus*.

### **3.1.2. Reaksi gelap**

Reaksi gelap pada tumbuhan dapat terjadi melalui dua jalur, yaitu siklus Calvin-Benson dan jalur Hatch-Slack. Pada siklus Calvin-Benson tumbuhan mengubah senyawa ribulosa-1,5-bisfosfat (RuBP, senyawa dengan lima atom C) dan molekul karbondioksida menjadi dua senyawa 3-fosfoglisarat (PGA): Oleh karena PGA memiliki tiga atom karbon tumbuhan yang menjalankan reaksi gelap melalui jalur ini dinamakan tumbuhan C<sub>3</sub>. Penambatan CO<sub>2</sub> sebagai sumber karbon pada tumbuhan ini dibantu oleh enzim Rubisco, yang merupakan enzim alami yang paling melimpah di bumi.

Tumbuhan yang reaksi gelapnya mengikuti jalur Hatch-Slack disebut tumbuhan C4 karena senyawa pertama yang terbentuk setelah penambahan  $\text{CO}_2$  adalah asam oksaloasetat yang memiliki empat atom karbon. Enzim yang berperan adalah fosfoenolpiruvat karboksilase.

## Siklus Calvin-Benson



## Siklus Calvin-Benson

Mekanisme siklus Calvin-Benson dimulai dengan fiksasi  $\text{CO}_2$  oleh ribulosa difosfat karboksilase (RuBP) membentuk 3-fosfogliserat. RuBP merupakan enzim alosetrik yang distimulasi oleh tiga jenis perubahan yang dihasilkan dari pencahayaan kloroplas. Pertama, reaksi dari enzim ini distimulasi oleh peningkatan pH. Jika kloroplas diberi cahaya, ion  $\text{H}^+$  ditranspor dari stroma ke dalam tilakoid menghasilkan peningkatan pH

stroma yang menstimulasi enzim karboksilase, terletak di permukaan luar membran tilakoid. Kedua, reaksi ini distimulasi oleh  $Mg^{2+}$ , yang memasuki stroma daun sebagai ion  $H^+$ , jika kloroplas diberi cahaya. Ketiga, reaksi ini distimulasi oleh NADPH, yang dihasilkan oleh fotosistem I selama pemberian cahaya.

Fiksasi  $CO_2$  ini merupakan reaksi gelap yang distimulasi oleh pencahayaan kloroplas. Fiksasi  $CO_2$  melewati proses karboksilasi, reduksi, dan regenerasi. Karboksilasi melibatkan penambahan  $CO_2$  dan  $H_2O$  ke RuBP membentuk dua molekul 3-fosfoglisarat(3-PGA). Kemudian pada fase reduksi, gugus karboksil dalam 3-PGA direduksi menjadi 1 gugus aldehida dalam 3-fosforglisaraldehida (3-Pgaldehida).

Reduksi ini tidak terjadi secara langsung, tapi gugus karboksil dari 3-PGA pertamanya 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 diubah kembali dengan cepat menjadi ATP oleh reaksi fotofosforilasi tambahan. Bahan pereduksi yang sebenarnya adalah NADPH, yang menyumbang 2 elektron. Secara bersamaan,  $P_i$  dilepas dan digunakan kembali untuk mengubah ADP menjadi ATP.

Pada fase regenerasi, yang diregenerasi adalah RuBP yang diperlukan untuk bereaksi dengan  $CO_2$  tambahan yang berdifusi secara konstan ke dalam dan melalui stomata. Pada akhir reaksi Calvin, ATP ketiga yang diperlukan bagi tiap molekul  $CO_2$  yang ditambat, digunakan untuk mengubah ribulosa-5-fosfat menjadi RuBP, kemudian daur dimulai lagi.

Tiga putaran daur akan menambatkan 3 molekul  $\text{CO}_2$  dan produk akhirnya adalah 1,3-Pglaldehida. Sebagian digunakan kloroplas untuk membentuk pati, sebagian lainnya dibawa keluar. Sistem ini membuat jumlah total fosfat menjadi konstan di kloroplas, tetapi menyebabkan munculnya triosa fosfat di sitosol. Triosa fosfat digunakan sitosol untuk membentuk sukrosa.

## Faktor Penentu Laju Fotosintesis

Proses fotosintesis dipengaruhi beberapa faktor yaitu faktor yang dapat memengaruhi secara langsung seperti kondisi lingkungan maupun faktor yang tidak memengaruhi secara langsung seperti terganggunya beberapa fungsi organ yang penting bagi proses fotosintesis. Proses fotosintesis sebenarnya peka terhadap beberapa kondisi lingkungan meliputi kehadiran cahaya Matahari, suhu lingkungan, konsentrasi karbondioksida ( $\text{CO}_2$ ). Faktor lingkungan tersebut dikenal juga sebagai faktor pembatas dan berpengaruh secara langsung bagi laju fotosintesis.

Faktor pembatas tersebut dapat mencegah laju fotosintesis mencapai kondisi optimum meskipun kondisi lain untuk fotosintesis telah ditingkatkan, inilah sebabnya faktor-faktor pembatas tersebut sangat memengaruhi laju fotosintesis yaitu dengan mengendalikan laju optimum fotosintesis. Selain itu, faktor-faktor seperti translokasi karbohidrat, umur daun, serta ketersediaan nutrisi memengaruhi fungsi organ yang penting pada fotosintesis sehingga secara tidak langsung ikut memengaruhi laju fotosintesis.

Berikut adalah beberapa faktor utama yang menentukan laju fotosintesis

1. *Intensitas cahaya*. Laju fotosintesis maksimum ketika banyak cahaya.

2. *Konsentrasi karbon dioksida*. Semakin banyak karbon dioksida di udara, makin banyak jumlah bahan yang dapat digunakan tumbuhan untuk melangsungkan fotosintesis.
3. *Suhu*. Enzim-enzim yang bekerja dalam proses fotosintesis hanya dapat bekerja pada suhu optimalnya. Umumnya laju fotosintesis meningkat seiring dengan meningkatnya suhu hingga batas toleransi enzim.
4. *Kadar air*. Kekurangan air atau kekeringan menyebabkan stomata menutup, menghambat penyerapan karbon dioksida sehingga mengurangi laju fotosintesis.
5. *Kadar fotosintat (hasil fotosintesis)*. Jika kadar fotosintat seperti karbohidrat berkurang, laju fotosintesis akan naik. Bila kadar fotosintat bertambah atau bahkan sampai jenuh, laju fotosintesis akan berkurang.
6. *Tahap pertumbuhan*. Penelitian menunjukkan bahwa laju fotosintesis jauh lebih tinggi pada tumbuhan yang sedang berkecambah ketimbang tumbuhan dewasa. Hal ini mungkin dikarenakan tumbuhan berkecambah memerlukan lebih banyak energi dan makanan untuk tumbuh.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Salisbury FB, Ross CW. 1992. *Fisiologi Tumbuhan*. Jilid 2. Bandung: Institut Teknologi Bandung. Hal. 19-38.
2. Behrenfeld MJ, Randerson JT, Falkowski P (1998). "Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components". *Science* **281** (5374): 237–40.
3. Bidwell, R.G.S. 1979. *Plant Physiology*. Macmillan, London
4. "Photosynthesis," McGraw-Hill Encyclopedia of Science and Technology, Vol. 13, 2007
5. Institut Pertanian Bogor. 2008. *Laju Fotosintesis Pada Berbagai Panjang Gelombang Cahaya*.
6. Salisbury FB, Ross CW. 1992. *Plant Physiology Fourth Edition*. Belmont: Wadsworth Publishing Company. Hal. 15-31.



7. Institut Pertanian Bogor. 2008. Laju Fotosintesis Pada Berbagai Panjang Gelombang Cahaya.  
[http://web.ipb.ac.id/~tpb/tpb/files/materi/prak\\_biologi/LAJU%20FOTOSINTESIS%20PADA%20BERBAGAI%20PANJANG%20GELOMBANG%20CAHAYA.pdf](http://web.ipb.ac.id/~tpb/tpb/files/materi/prak_biologi/LAJU%20FOTOSINTESIS%20PADA%20BERBAGAI%20PANJANG%20GELOMBANG%20CAHAYA.pdf) [ 30 Mei 2008].