

## **BAB V**

### **PERTUMBUHAN GULMA DAN GANGGUAN YANG DITIMBULKAN**

Segera setelah perkecambahan, tumbuhan yang masih muda ini harus dapat berdiri sendiri dari ketergantungan akan sumber daya yang diperoleh dari induknya (simpanan makanan dalam biji, rizoma, tuber dan sebagainya). Tumbuhan ini harus sudah mampu untuk memanfaatkan sumberdaya yang di sekelilingnya untuk hidup. Kemampuan individu untuk menyerap cahaya, air, dan hara untuk pertumbuhannya sering kali sangat menentukan keberhasilan individu itu di dalam membesar, berkembang melalui tahapan-tahapan dalam siklus hidupnya dan akhirnya akan mati untuk kemudian digantikan oleh keturunannya. Siklus hidup jenis-jenis tumbuhan yang tidak mampu menguasai lingkungan biasanya akan terhenti sebelum waktunya dan akan menyebabkan kematian. Oleh karena itu, pertumbuhan dan fase-fase perkembangan dari tumbuh-tumbuhan sangatlah penting dan merupakan dasar dalam memahami fungsi-fungsi tumbuhan terutama interaksinya baik yang sesama jenis, berlainan jenis, maupun dalam alam lingkungannya. Oleh karena itu, adalah wajar jika pertumbuhan tanaman telah menjadi objek penelitian yang penting dan secara mendalam bagi para peneliti botani.

Pertumbuhan tanaman atau tumbuh-tumbuhan didefinisikan sebagai peningkatan secara bertahap dan perlahan baik dalam ukuran maupun bentuk yang timbul secara alami. Dalam kaitannya dengan tanaman budidaya dan gulma, pertumbuhan dapat dijelaskan sebagai hasil interaksi secara total antara sesama tumbuhan, dengan organisme lain dan alam lingkungannya.

#### **1. Hubungan Sesama Tumbuhan**

Pada bagian awal dari buku ini telah dijelaskan tentang perlbagai aspek gulma jika berada dalam keadaan terisolasi tanpa adanya jenis-jenis yang lain. Ini tentu saja tidak realistis karena hampir semua jenis gulma biasanya tumbuh berasosiasi dengan jenis-jenis tumbuhan lainnya baik gulma maupun budidaya. Oleh karena itu, perlu juga kita melihat gulma sebagai tetangga dari jenis-jenis tumbuhan lainnya baik di lahan pertanian maupun yang berada pada lingkungan atau habitat lainnya.

Burkholder (1952) dan kemudian Odum (1971) telah mencoba untuk mengelompokkan beberapa kemungkinan interaksi yang dapat terjadi di antara tumbuh-tumbuhan yang hidup secara bersama. Untuk memudahkan telah digunakan

simbol-simbol untuk menyatakan adanya interaksi atau tidak. Jika terjadi interaksi antara dua populasi, maka digunakan simbol + dan jika tidak terjadi interaksi digunakan simbol.

Tabel 5.1, menunjukkan semua kemungkinan interaksi yang terjadi di antara populasi tumbuhan. Interaksi yang selalu terjadi di antara jenis tumbuhan atau populasi disebut sebagai *gangguan*, yakni adanya sejenis tumbuhan yang menempati lingkungan hidup yang dimiliki tetangganya. Seperti yang terlihat pada tabel ini, interaksi dapat positif, negatif atau netral. Penyebab yang nyata dan interaksi ini dapat berupa pemanfaatan sumberdaya yang sangat terbatas secara bersama, produksi zat beracun dan toksin, predasi atau parasitisme.

**Tabel 5.1 Daftar Semua Jenis Kemungkinan Interaksi Biologis yang terdapat pada Makhluk Hidup**

Jenis Interaksi	Ada		Tidak	
	A	B	A	B
Netralisme	0	0	0	0
Kompetisi	-	-	0	0
Mutualisme	+	+	-	-
Protokoperatif	+	+	0	0
Komensalisme	+	0	-	0
Amensalisme	0	-	0	0
Parasitisme, predasi, herbivori	+	-	-	0

Jika kedua organisme A dan B berada cukup dekat untuk saling berinteraksi maka simbolnya Ada, tetapi jika tidak, Tidak. Stimulus, +;netral, 0,depresi-.

## 2. Interaksi Negatif

Dari 10 kemungkinan interaksi yang dapat terjadi antara makhluk hidup yang satu dengan yang lainnya, 3 merupakan interaksi yang negatif yaitu *kompetisi*, *amensalisme*, dan *parasitisme*. *Kompetisi* didefinisikan sebagai hubungan interaksi dua individu tumbuhan (baik yang sesama atau yang berlainan jenis) yang menimbulkan pengaruh negatif bagi keduanya terbatas. *Amensalisme* definisinya

hampir serupa tetapi hanya satu jenis yang dirugikan sedangkan jenis yang lainnya tidak. *Alelopati* merupakan penghambatan pertumbuhan oleh satu jenis tumbuhan terhadap jenis lainnya melalui pelepasan senyawa kimia beracun. Alelopati dapat juga dikatakan sebagai amensalisme. *Parasitisme* merupakan bentuk interaksi negatif yang spesifik yang memungkinkan tumbuhan yang satu hidup secara langsung pada tumbuhan lainnya. Jadi, menyerap sumberdaya secara langsung dari inangnya dengan sistem perakaran yang khusus.

### **Ruang dan Sumberdaya**

Setelah perkecambahan dan pertumbuhan akar, tumbuhan menjadi tidak bergantung lagi akan sumberdaya yang diberikan dari induknya. Tumbuhan ini telah mampu untuk menyerap dan memanfaatkan sumberdaya yang ada di sekelilingnya termasuk cahaya air, hara, oksigen dan karbondioksida. Sumber daya ini berbeda dengan suhu yang juga sangat dibutuhkan untuk pertumbuhan yakni dapat dikonsumsi sedangkan suhu tidak dapat. Persediaan sumberdaya yang dibutuhkan untuk pertumbuhan pada beberapa habitat tidak terbata jumlahnya, tetapi pada umumnya berada dalam jumlah terbatas. Terbatasnya persediaan sumberdaya dapat disebabkan oleh memang tidak ada atau sangat sedikit jumlahnya, atau karena banyak jenis-jenis tumbuhan yang memanfaatkannya secara bersama-sama. Adanya jenis-jenis lain atau individu-individu lain dapat menyebabkan persediaan sumberdaya menjadi sangat terbatas atau bahkan menjadi sangat kekurangan dari batas normalnya yang dibutuhkan oleh setiap individu.

Karena penggunaan sumberdaya oleh sesuatu individu adalah sangat kompleks prosesnya dan mengkaitkan pelbagai unsur hara dan faktor-faktor lainnya, maka beberapa peneliti lebih cenderung untuk menggunakan istilah *ruang* untuk menjelaskan peranan sumberdaya terhadap pertumbuhan. Ruang merupakan gabungan semua sumberdaya yang dibutuhkan untuk tumbuh termasuk juga segala interaksi yang terjadi di dalamnya. Dengan cara ini pengaruh individu yang satu terhadap yang lainnya yang menempati lingkungan yang sama dapat diukur karena salah satu individu diantaranya dapat dijadikan bio-indikator dari pemanfaatan ruang ini. Kita dapat mengamati jumlah persediaan sumberdaya yang ada sebagai faktor campuran, ataupun sebagai faktor yang berdiri sendiri-sendiri misalnya unsur hara saja, cahaya saja, suhu ataupun faktor-faktor lainnya bergantung kepada apa yang akan diteliti.

### **Jenis-jenis Kebersamaan Hidup**

Harper (1977) menjelaskan adanya 3 jenis kelas kebersamaan hidup yang sering dijumpai di alam. Yang pertama adalah kebersamaan hidup dari bagian organ suatu tumbuhan (daun, cabang, ranting dan sebagainya), kebersamaan dua individu yang berbeda jenis, dan kebersamaan dua individu atau lebih dari jenis yang berbeda. Semua jenis kebersamaan hidup ini sangat menarik perhatian para ahli biologi populasi tetapi dua jenis yang terakhir yang sangat menarik minat bagi para ahli ekologi terapan dan agronomis.

### **Kompetisi dan Interaksi Lainnya**

Diantara para ahli gulma terdapat beberapa perbedaan terminologi dalam menerangkan interaksi negatif diantara tumbuh-tumbuhan. Menurut Bukholder (1952) kompetisi merupakan salah satu saja dari beberapa jenis interaksi negatif yang ada diantara tumbuh-tumbuhan. Dalam kompetisi diasumsikan bahwa persediaan beberapa jenis sumberdaya yang dibutuhkan oleh tumbuh-tumbuhan berada dalam jumlah yang sangat sedikit. Di samping itu jenis-jenis yang berkompetisi menempati ruang yang sama sehingga pertumbuhan kedua-dua jenis terpengaruhi oleh semakin berkurangnya sumberdaya yang sudah sangat terbatas tadi. Kompetisi dapat juga digunakan untuk menjelaskan pengaruh negatif dari suatu jenis tumbuhan yang satu terhadap jenis yang lainnya (misalnya pengaruh gulma terhadap produksi tanaman budidaya) tanpa mempertimbangkan terbatas atau tidaknya sumberdaya yang ada. Ada kemungkinan bahwa pada beberapa penelitian bentuk interaksi negatif yang lain dari kompetisi yang diamati dan diukur, contohnya amensalisme atau alelopati. Ini disebabkan kesulitan yang dijumpai untuk memisahkan mana yang *amensalisme* dan mana yang kompetisi karena pada umumnya hanya pengurangan hasil pada satu jenis yang diamati/diukur (tanaman pangan) dua seringkali faktor-faktor pembatasnya tidak pernah diidentifikasi.

Istilah kompetisi dan interaksi negatif sering kali digunakan dengan arti yang sama. Banyak keterangan yang menjelaskan bahwa kepadatan individu, hubungan antar jenis dan penyebarannya merupakan parameter yang penting yang sangat menentukan besar kecilnya interaksi negatif.

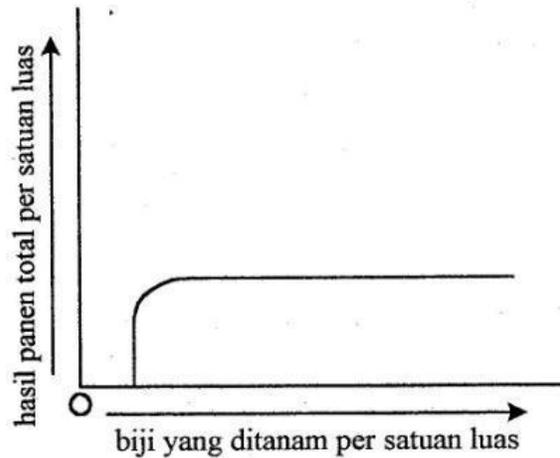
### **3. Kompetisi**

Ada dua jenis kompetisi yang biasa terjadi di alam yaitu kompetisi yang *intraspesifik* dan *interspesifik*. Kompetisi *intraspesifik* atau yang sesama jenis adalah interaksi negatif yang terjadi pada tumbuh-tumbuhan dengan jenis yang sama misalnya antara jagung dengan jagung, sesama alang-alang, sesama padi dan sebagainya. Kompetisi yang *interspesifik* atau antarjenis merupakan interaksi negatif yang terjadi pada tumbuh-tumbuhan yang berbeda jenis misalnya antara jagung dan alang-alang atau antara teki dengan kacang.

Tori evolusi masa kini mengatakan bahwa tekanan untuk seleksi alami menyebabkan jenis-jenis tumbuhan yang berada dalam suatu komunitas akan memanfaatkan semua bagian yang berbeda yang ada dalam lingkungan tempat tumbuhnya sehingga kompetisi dapat ditrekan seminimal mungkin. Jika pengkhususan jenis terhadap lingkungan tertentu tidak dapat terjadi, maka kebersamaan jenis untuk menempati suatu habitat tidak dapat terjadi, maka kebersamaan jenis untuk menempati suatu habitat tidak dapat terjadi pula, demikian pula asosiasi jenis di dalam suatu komunitas tidak dapat terjadi. Konsep satu relung untuk setiap jenis telah dikemukakan pada bab terdahulu. Meskipun kecepatan pertumbuhan kedua jenis biasanya tertekan pada awal pertumbuhannya, jenis yang satu kemudian akan mendominasi jenis yang lainnya dalam suatu komunitas campuran.

#### **Kompetisi dan Kepadatan**

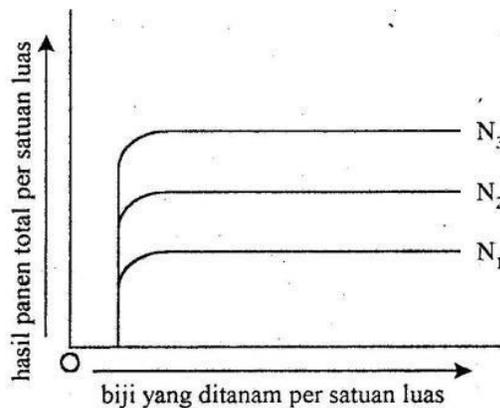
Kepadatan dapat dinyatakan sebagai jumlah individu per satuan luas. Dalam hal gulma, satuannya ialah jumlah individu tumbuhan per meter persegi, per hektar, per plot/petak atau per pot. Kepadatan seringkali digunakan untuk menjelaskan jumlah individu tumbuhan pada suatu populasi tanaman pangan, pohon hutan, atau gulma. Dengan meningkatnya kepadatan, maka gangguan yang ditimbulkan oleh tumbuhan yang satu terhadap yang lainnya akan semakin jelas dan meningkat. Respons tumbuhan terhadap adanya tekanan kepadatan timbul dalam dua cara. Yang pertama, melalui respons plastisitas yaitu terjadinya perubahan morfologi tumbuhan misalnya daunnya menjadi lebih sempit dari yang normal, tumbuhan menjadi kerdil, dan sebagainya; yang kedua melalui kematian tumbuhan itu sendiri. Kedua respons ini dapat terjadi sebagai konsekuensi adanya kompetisi baik yang sesama maupun yang berlainan jenis atau adanya interaksi negatif jenis lainnya.



Gambar 5.1 Hasil Panen secara Teoritis Persatuan Luas sebagai Fungsi Kepadatan Biji yang ditebar

Pengaruh tingkat kepadatan terhadap pertumbuhan. Gambar 5.1, menunjukkan respons pertumbuhan yang khas dari suatu populasi tumbuhan terhadap adanya penambahan/peningkatan kepadatan. Data seperti ini dapat diperoleh dengan menanam tumbuhan pada kepadatan yang berbeda-beda dan memanen hasilnya secara total. Sejalan dengan waktu, maka tumbuhan dengan tingkat kepadatan yang tinggi akan cepat mengalami tekanan yang ditimbulkan oleh tumbuhan yang berada di sekelilingnya karena berada dalam jarak yang dekat, sedangkan pada tumbuhan dengan tingkat kepadatan yang rendah tekanan baru akan timbul setelah tumbuhan yang berada di sekitarnya membesar karena jarak satu sama lainnya masih cukup jauh. Pada waktu panen akan nampak jelas bahwa hasil panen total per satuan luas tidak tergantung pada tingkat kepadatan. Hasil panen per satuan luas akan selalu sama besarnya jika padat penebaran maksimumnya telah tercapai sehingga penambahan padat penebaran tidak akan menghasilkan hasil karena meskipun jumlah individunya semakin banyak tetapi beratnya per individu akan menjadi semakin berkurang. Pada fase awal pertumbuhan atau pada tingkat yang rendah hasil panen suatu populasi sangat dipengaruhi oleh banyaknya individu, tetapi setelah sumberdaya yang ada menjadi semakin berkurang, hasil panen tidak lagi dipengaruhi oleh kepadatan.

Pengurangan akan keterbatasan sumberdaya yang ada tidak dapat mempengaruhi hubungan antara kepadatan dengan produktivitas. Pada Gambar 5.2 dapat dilihat bahwa baik pengurangan maupun peningkatan jumlah sumberdaya yang ada dapat mempengaruhi produksi biomassa tetapi tidak akan mempengaruhi hubungannya dengan tingkat kepadatan. Pada tingkat kepadatan yang tinggi, hasil panen biasanya ditandai oleh jenis-jenis tumbuhan yang kecil-kecil ukurannya atau sebagai akibat adanya tingkat kepadatan yang tinggi, maka akan timbul kematian yang menyebabkan hanya beberapa individu yang dapat hidup. Meskipun demikian, individu-individu ini mempunyai ukuran yang besar-besar. Pada keadaan yang bagaimanapun, hasil panen per satuan luas merupakan suatu proses alami yang sifatnya tetap. Sifat yang tetap ini merupakan salah satu dari sifat-sifat karakteristik yang dimiliki tumbuh-tumbuhan yang biasa disebut sebagai *plastisitas*, yaitu kemampuan yang dimiliki tumbuh-tumbuhan untuk mengubah bentuk, ukuran dan jumlah dalam kaitannya dengan tingkat kepadatan atau adanya tekanan lingkungan. Pada Tabel 5.2 disajikan berat kering gulma *Amaranthus retroflexus* yang ditumbuhkan di rumah kaca dengan tingkat kepadatan yang berbeda-beda. Berat kering total per pot (satuan luas) relatif tetap dan tidak berubah, tetapi beratnya per individu semakin berkurang dengan semakin meningkatnya kepadatan.

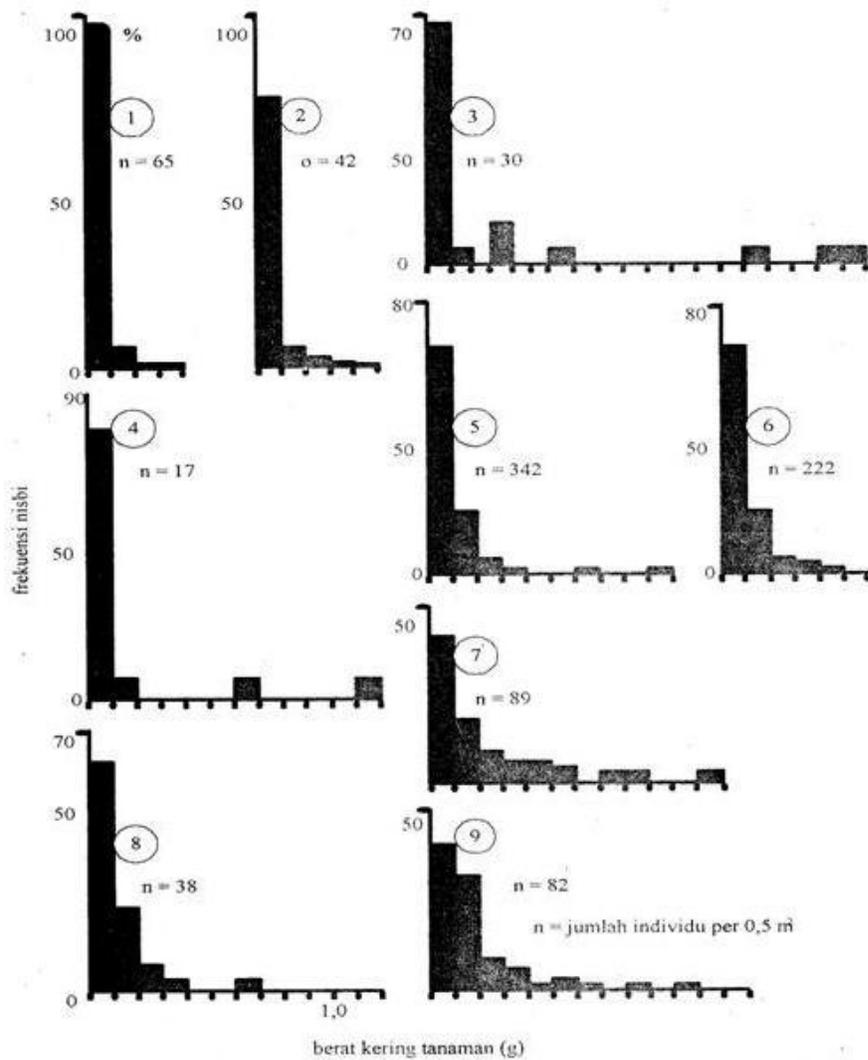


Gambar 5.2. Pengaruh peningkatan jumlah sumberdaya terhadap hubungan antara hasil panen total per satuan luas dengan kepadatan biji yang ditebar  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$  merupakan perbedaan tingkat keberadaan sumberdaya misalnya kesuburan hara

**Tabel 5.2. Hasil berat kering bebayaman (*Amaranthus retroflexus*) dalam tingkat kepadatan yang berbeda (Radosevich & Holt, 1984)**

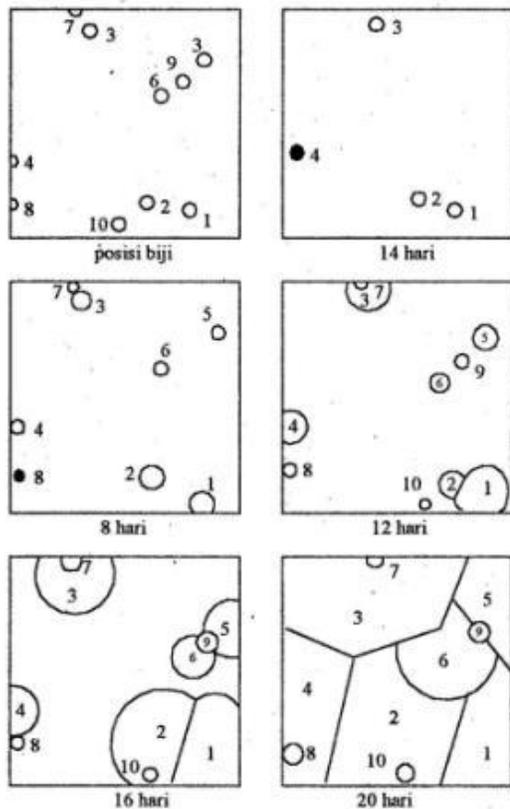
Kepadatan (individu/Pot)	Berat Kering (g)*	
	Per Pot	Per Individu
1	6.2	6.20
5	6.9	1.38
15	6.2	0.41
25	6.2	0.25
35	6.8	0.19

Pemanfaatan ruang. Pada suatu tingkat kepadatan tertentu dari satu jenis populasi tumbuhan, akan dijumpai distribusi ukuran yang karakteristik dari individu-individunya. Salah satu cara untuk menetapkan penyebaran ini adalah dengan menggunakan ukuran rata-rata dari beratnya (berat total dibagi jumlah individu). Nilai rata-rata kaangkala tidak menunjukkan nilai yang sebenarnya karena hanya beberapa individu yang berada dalam nilai rata-rata ini. Pada hampir semua populasi, distribusi ukuran dari tumbuhan timbul dengan hampir semua individunya mempunyai ukuran yang kecil-kecil dan kurus, dan sedikit sekali individu yang mempunyai ukuran besar. Distribusi semacam ini telah ditunjukkan oleh Ogden (1970) pada beberapa jenis gulma.



1) *Poa annua*, 2) *Atriplex patula*, 3) *Polygonum aviculare*, 4) jenis-jenis gulma lai, 5) *Stachys arvensis*, 6) *Stellaria media*, 7) *Spergula arvensis*, 8) *Senecio vulgaris*, 9) *Polygonum persicaria* dan *P. lapathifolium*

Gambar 5.3 Frekuensi penyebaran berat kering individu dalam populasi campuran gulma semusim di Wates bagian Utara



Gambar 5.4 Model penguasaan ruang oleh pertumbuhan kecambah nomor 1 - 10 adalah jenis-jenis gulmanya

Lokasi tempat individu menempati dalam ukuran kelasnya sudah ditentukan sejak awal lagi semasa pertumbuhan kecambahannya. Model yang menunjukkan hal seperti ini telah dikembangkan oleh Ross (1968) dan diuji kembali oleh Harper (1977). Model ini menunjukkan pengaruh urutan munculnya keambah terhadap pemanfaatan ruang. Pada Gambar 5.4, kebutuhan akan ruang dari 10 jenis kecambah rumput secara acak ditempatkan pada suatu lokasi tanah datar selama 10 hari berturut-turut. Ruangan yang dikuasai oleh masing-masing jenis adalah sesuai dengan beratnya masing-masing. Disamping itu, dapat diketahui pula bahwa masing-masing tumbuhan akan *berhenti tumbuh* jika ruang yang ditempatinya telah dikuasai oleh jenis-jenis lain yang ada disekelilingnya. Tumbuhan yang kecambahnya dipindahkan

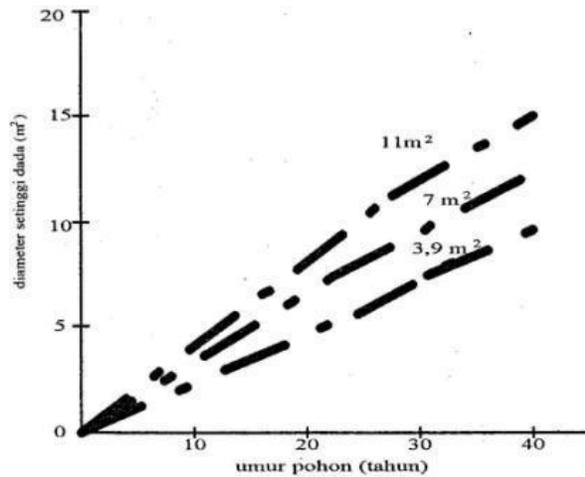
paling akhir akan mempunyai pertumbuhan yang paling lambat. Percobaan ini yang juga sering ditemui di alam, tempat biasanya jenis-jenis yang mempunyai daya saing yang tinggi muncul lebih awal, menunjukkan bahwa waktu munculnya populasi kecambah adalah lebih penting jika dibandingkan dengan letaknya kecambah dalam suatu populasi.

Pada percobaan kompetisi antara padi gogo dengan gulma khususnya teki, yang pada petak yang satu semua gulma yang tumbuh senantiasa dicabut/disiang setiap minggunya sejak perkecambahan padi, sedangkan pada petak lainnya gulma dibiarkan tumbuh, terlihat bahwa pada petak yang selalu disiang akan selalu bebas gulma dalam waktu yang lama. Hasil panen juga akan tinggi jika dibandingkan dengan petak yang tidak disiang. Ini disebabkan padi gogo berkecambah lebih awal dan mempunyai ruang yang cukup untuk tumbuhnya sehingga setelah satu bulan untuk penyiangan memberikan pengaruh yang nyata terhadap hasil panen. Pengamatan ini menunjukkan bahwa waktu yang sangat kritis bagi terjadinya interaksi antar individu mempengaruhi pertumbuhan. Juga diperlihatkan bahwa jika pengendalian gulma ditujukan untuk mengurangi tingkat kepadatan yang aa, maka pengenalan harus dilakukan sewaktu ruang yang tersedia masih cukup luas sehingga tanaman pangannya dapat tumbuh tidak terbatas oleh ruang.

*Pengaruh kepadatan terhadap mortalitas.* Tumbuh-tumbuhan mempunyai kemampuan bawaan untuk mengendalikan populasi individu-individunya pada saat ruang yang tersedia mulai menjadi semakin terbatas bagi pertumbuhannya. Fenomena ini pertama kali diungkapkan oleh Yoda dkk. (1963) dan dinyatakan sebagai hukum  $2/3$  daya dengan model matematisnya yang merupakan hubungan antara berat tumbuhan dan kecepatan yang terjadi akibat penjarangan.

Beberapa fakta yang menunjukkan bahwa penjarangan juga merupakan faktor yang penting di dalam menunjukkan hasil panen telah dibuktikan pada beberapa penelitian mengenai pengelolaan hutan buatan maupun pertanian. Para ahli agronomi seringkali menyarankan tentang jumlah benih yang harus ditebar per satuan luas lahan atau jarak tanam yang harus diikuti untuk mendapatkan hasil penenan yang maksimum pada tanaman semusim. Juga pada tanaman hutan jarak tanam antara pohon yang satu dengan yang lainnya harus diikuti sesuai dengan jenis-jenisnya untuk menghindari adanya kompetisi sesama jenis. Dari hasil penelitian tentang jarak tanam, ditemukan misalnya 50% penekanan pertumbuhan pada pinus ponderosa akan terjadi setelah 40 tahun jika pohon ditanam pada jarak  $3,9 \text{ m}^2$  dibandingkan dengan jarak  $11 \text{ m}^2$  (Gambar 5.5).

Tingkat kematian pohon meningkat secara nyata dengan semakin rapatnya jarak tanam.



Gambar 5.5 Pengaruh peningkatan kepadatan terhadap pertumbuhan pinus (Oliver dan Powers, 1978)

Sangat menarik untuk diketahui dengan semakin meningkatnya jumlah faktor pembatas, misalnya kesuburan, pada umumnya akan meningkatkan angka kematian sebagai akibat meningkatnya kepadatan individu. Ini terjadi karena jenis-jenis yang dominan pada keadaan seperti ini akan memanfaatkan sumberdaya yang ada semaksimal mungkin sehingga biasanya individu-individu yang besar ukurannya akan semakin membesar sedangkan yang ukurannya kecil-kecil akan semakin tertekan pertumbuhannya atau menjadi mati.

*Pengaruh kepadatan terhadap daya produksi.* Keberhasilan suatu jenis tumbuhan dalam menguasai suatu tempat harus juga diikuti dengan keberhasilannya dalam memperbanyak keturunan yang akan mempertahankan populasinya secara terus menerus sejalan dengan waktu. Hasil reproduksi pada gulma-gulma semusim adalah sangat penting mengingat bahwa biji-biji saja yang merupakan penyambung generasi di daerah itu. Jenis-jenis gulma setahun dapat memanfaatkan respons-respons kepadatan dan mortalitas (dikenal dengan sift plastisitas) untuk mengatur dan mempertahankan hasil reproduksi secara tetap.

Dalam suatu penelitian yang dilakukan di rumah kaca, Plambald (1968) telah mengamati pengaruh kepadatan terhadap 8 jenis gulma yaitu *Bromus tectorum*, *Capsella bursa-pastoris*, *Conyza canadensis*, *Plantago lanceolata*, *P. major*, *Senecio sylvaticus*, *S. viscosus* dan *Silene anglica*. Biji-biji ditebar dengan menjatuhkan ke permukaan tanah kosong dalam pot-pot dengan kepadatan yang bervariasi antara 5-2000 biji per pot (55-11.000 biji/m<sup>2</sup>). Pengamatan-pengamatan sebagai berikut telah dilakukan:

- (1) Selama periode dari perkembangan sampai pembuangan, semua jenis gulma kecuali *Silene anglica* menunjukkan adanya kematian akibat kepadatan. Meskipun besarnya respons sangat bervariasi dari jenis yang satu ke jenis yang lainnya, tingkat mortalitas yang tinggi terjadi pada keadaan dengan tingkat kepadatan yang tinggi pula.
- (2) Semua jenis tumbuhan pada tingkat kepadatan yang rendah dapat bertahan hidup dan menghasilkan buah. Kemungkinan dari kecambah yang bertahan hidup ini dapat menghasilkan bunga dan buah menjadi berkurang dengan meningkatnya kepadatan. Pada *C. canadensis*, *P. lanceolata* dan *P. major* yang mampu hidup pada tingkat kepadatan yang tinggi kebanyakan dari individunya tetap berada dalam keadaan fase vegetatif dan tidak dapat menghasilkan bunga/buah hingga ke musim berikutnya.
- (3) Jumlah biji yang dihasilkan per jenis adalah relatif tetap dan tidak terpengaruh oleh tingkat kepadatan. Pada tingkat kepadatan yang rendah semua jenis gulma tumbuh dengan normal dan menghasilkan biji dalam jumlah banyak. Pada tingkat kepadatan yang tinggi, penjarangan umumnya akan terjadi secara alami dan jenis-jenis yang dapat bertahan hidup sedikit jumlahnya tetapi mempunyai ukuran yang besar-besar jika dibandingkan pada keadaan dengan tingkat kepadatan yang tinggi dengan tidak adanya kematian individu.

Pengamatan di atas menunjukkan bahwa mortalitas dan plastisitas tumbuh akibat pengaruh kepadatan dapat bekerja bersama-sama guna memastikan terbentuknya biji dari suatu jenis komunitas gulma. Ada juga indikasi lain yang penting dalam pengelolaan gulma yang dapat diperoleh dari studi ini. Pengamatan menunjukkan bahwa sangat jarang terjadi semua jenis gulma menjadi musnah akibat adanya pengendalian. Oleh karena itu, biasanya beberapa jenis gulma yang luput dari pengendalian akan tumbuh dan berkembang menghasilkan biji yang kemudian akan menguasai daerah yang kosong ini. Seringkali juga dijumpai bahwa, sebagai akibat suatu pengendalian, akan terjadi perubahan gulma yang dominan yang sebelumnya jenis ini tidak memegang peranan penting. Dalam hal pengendalian yang efektif, yang

paling penting untuk diperhatikan adalah jumlah atau tingkat kepadatan kritis gulma yang dapat mempengaruhi hasil panen daripada jumlah biji yang ada di dalam tanah.

*Gangguan dan campuran jenis.* Selama ini kita hanya membicarakan pengaruh tingkat kepadatan terhadap jenis tunggal. Oleh karena itu, perlu juga untuk dijelaskan bahwa dasar-dasar yang dibahas dalam populasi sesama jenis dapat juga diterapkan untuk populasi sesama jenis dapat juga diterapkan untuk populasi jenis campuran. Dalam kenyataannya campuran beberapa jenis tumbuhan lebih banyak dijumpai di alam daripada jenis populasi yang tunggal. Untuk daerah-daerah pertanian ataupun kehutanan, pemasukan jenis-jenis tumbuhan yang baru selain tanaman pokoknya adalah sudah merupakan kejadian yang umum dan keanekaan jenis yang beragam sudah merupakan hukum alam.

Pada pembahasan yang terdahulu telah dijelaskan bahwa perjuangan yang kompetitif guna mendapatkan sumberdaya yang terbatas persediaannya merupakan suatu syarat yang mutlak bagi berlangsungnya perkecambahan dan pertumbuhan awal sesuatu jenis tumbuhan. Tumbuhan yang sedang berkembang harus mampu mengosongkan ruang di sekelilingnya dan memanfaatkan semua sumberdaya yang ada bagi pertumbuhannya. Keberhasilan akan sangat bergantung pada kemampuannya dalam memanfaatkan sumberdaya yang juga digunakan oleh jenis-jenis tumbuhan lain yang ada disekitarnya. Keberhasilan tumbuhan ini dalam menyerap sumber daya sangat tergantung pada jaraknya dimana tumbuhan ini tumbuh dengan individu lainnya dan juga tergantung dari pertumbuhan yang cepat atau dari periode-periode pertumbuhan awal yang lebih lama jika dibandingkan dengan individu-individu yang ada disekitarnya. Jika dua jenis tumbuh-tumbuhan ditumbuhkan bersama-sama maka lambatnya waktu terhadap perkecambahan dari jenis yang satu akan sangat mempengaruhi peranannya terhadap dominasinya terhadap jenis yang lain. Pada umumnya keterlambatan masa tanam atau perkecambahan tidak mempunyai pengaruh yang nyata terhadap hasil akhir total dari kedua jenis tumbuhan ini.

#### **4. Amensalisme**

Adakalanya pengaruh depresif dari suatu jenis tumbuhan terhadap jenis yang lainnya adalah sangat kompleks sehingga kompetisi akan sumberdaya yang sifatnya umum saja tidak dapat menjelaskan hasil pengamatan secara terperinci dan lengkap. Pada keadaan seperti ini tingkat kematian yang mencolok atau penurunan biomassa tumbuhan dapat terjadi secara nyata pada jenis yang satu tetapi tidak ada pengaruhnya pada jenis lainnya. Keadaan seperti ini lebih dikenal sebagai

*amensalisme*. Salah satu penjelasan bagi keadaan seperti ini adalah adanya beberapa jenis tumbuhan yang dapat melepaskan senyawa beracun ke dalam lingkungan tempat perlbagai jenis tumbuhan lainnya hidup yang dapat meracuni atau bahkan membunuh tumbuhan ini. Fenomena seperti ini disebut *alelopati*, yang sangat berbeda dari jenis-jenis interaksi negatif lainnya yang pengaruh negatifnya disebabkan oleh adanya pelepasan senyawa-senyawa kimia beracun. Di dalam respons tumbuhan terhadap interaksi negatif semacam ini, adanya amensalisme atau lebih spesifik lagi alelopati telah banyak diketahui para ahli dan didokumentasikan sejak beberapa puluh tahun yang lalu.

## 5. Parasitisme

Parasit adalah sejenis tumbuh-tumbuhan atau hewan yang hidup di dalam, melekat ataupun tinggal bersama-sama organisme hidup lainnya dan mendapatkan makanan, perlindungan, ataupun pertolongan dari tuan rumahnya. Parasit dapat bersifat tetap, artinya hanya dapat hidup jika tinggal bersama inangnya yang masih hidup (*parasit obligat*) atau yang tidak obligat yakni yang dapat hidup baik sesama inangnya masih hidup ataupun sesudah mati. Terdapat juga beberapa jenis tumbuhan parasit berbunga yang disebut *hemiparasit*. Jenis – jenis tumbuhan ini mempunyai klorofil tetapi hidupnya masih tetap tergantung pada tanaman inangnya terutama dalam hal kebutuhannya akan air dan unsur hara.

Hampir semua tumbuhan parasit terkelompok ke dalam hanya 10 famili dari sekian ratus famili tumbuh-tumbuhan dan hanya 4 famili yang dianggap berbahaya dan bertindak sebagai parasit gulma. Termasuk diantaranya ialah famili *Cuscutaceae* (*Cuscuta*, spp., tali putri), dan *Loranthaceae* (*Arceuthobium*, *Phoradendron*, *Viscum*) *Orobanchaceae* (*Orobanche*) dan *Scrophulariaceae* (*Striga* spp., rumput setan). Jenis-jenis gulma parasit yang termasuk ke dalam famili ini merupakan jenis-jenis yang sangat penting dalam kaitannya dengan tanaman pertanian dan kehutanan.

*Adaptasi gulma parasit untuk pemencaran biji dan perkecambahannya.* Guna mempertahankan dirinya dari kematian, kecambah dari gulma-gulma parasit harus dengan cepat mendapatkan tumbuhan inangnya yang sesuai. Ada 3 cara bagi gulma parasit ini untuk meningkatkan peluang guna mendapatkan inangnya. Pada beberapa jenis gulma, misalnya tali putri, bijinya mempunyai ukuran yang relatif besar sehingga biji mempunyai cukup persediaan makanan yang memungkinkan serabut akar dapat tumbuh dengan pesat sebelum memperoleh inangnya. Pengamatan lain memberikan hasil bahwa kecambah tali putri harus mendapatkan inangnya yang sesuai dalam waktu 4 – 9 hari kalau tidak akan mati. Mekanisme pemencaran yang

sama juga diperlihatkan pada *Arceuthobium* dengan pecahnya kulit buah sehingga biji akan terlempar ke batang tanaman yang lain atau ke tumbuhan lain disekitarnya.

Adapun cara ketiga untuk menentukan lokasi inangnya adalah dengan mengidentifikasi cairan kimiawi yang dihasilkan oleh akar tumbuhan inangnya. Biji-biji tumbuhan parasit ini akan berkecambah jika tersentuh cairan yang dikeluarkan akar ini. Kebutuhan akan cairan kimiawi akar tumbuhan inang dijumpai pada biji-biji tumbuhan parasit *Orobanche* dan *Striga*. Dengan adanya akar yang mengeluarkan cairan khusus ini akar tumbuhan parasit akan tumbuh mengarah pada akar tumbuhan inang secara khematropis. Meskipun perkecambahan semacam ini merupakan salah satu cara pertahanan diri agar dapat hidup, keadaan seperti ini dapat kita manfaatkan untuk mengendalikan gulma parasit *Striga* spp. dapat dipacu perkecambahannya dengan menanam jenis-jenis inang yang bukan tanaman pangan. Ini dimaksudkan agar semua biji *Striga* yang terdapat di dalam tanah berkecambah untuk kemudian dimusnahkan dengan cara pembakaran atau penyemprotan dengan menggunakan herbisida yang efektif. Baru setelah itu benih tanaman pangannya ditanam.

*Sifat-sifat fisiologis gulma parasit.* Meskipun banyak jenis-jenis gulma parasit yang mengandung klorofil, sebagian besar lagi tidak mempunyai hijau daun ini. Beberapa jenis yang mempunyai hijau daun mempunyai aktivitas fotosintesis yang sangat terbatas, misalnya pada tali putri, *Cuscuta* spp. dan *Arceuthobium* spp., sedangkan jenis-jenis lainnya dapat mengikat karbon secara normal seperti pada jenis-jenis tumbuhan yang bukan parasit.

Percobaan – percobaan mengenai hal ini telah dilakukan secara luas pada beberapa spesies maupun genus seperti pada *Striga*, *Cuscuta*, *Phoradendron* dan *Arceuthobium* serta *Orthocarpus*. Beberapa penelitian lainnya menunjukkan bahwa gulma-gulma parasit, sekali telah melekat pada tanaman inangnya, maka semua kebutuhan hidup bergantung pada inangnya. Oleh karena itu, seperti pada *Striga asiatica*, gulma parasit ini dapat tumbuh menjadi dewasa dan menghasilkan biji meskipun dalam keadaan yang gelap.

Bagian organ yang paling penting dari gulma-gulma parasit yang digunakan untuk melekat dan menembus jaringan tubuh tanaman inangnya disebut *haustorium-haustorium*. Haustoria sangat bervariasi dalam struktur dan komposisinya bergantung pada jenis gulma parasitnya. Meskipun demikian, semuanya mempunyai fungsi yang sama yaitu melekatkan diri dan menyerap makanan dari tanaman inangnya. Pada beberapa hal pengaliran dua darah dapat terjadi untuk beberapa jenis hara tetapi tidak untuk hasil fotosintesis. Beberapa penelitian yang lebih mendalam mendapatkan hasil bahwa tidak hanya air dan unsur hara yang diserap tetapi juga hormon pengatur

tumbuh sehingga beberapa jenis gulma parasit masa pembangunan tanaman inangnya.

## **6. Interaksi Positif**

Suatu hal yang sifatnya alami jika kita sering menjumpai bahwa banyak jenis-jenis tumbuhan yang hidup dan tumbuh berdampingan satu sama lain meskipun saling berinteraksi satu dengan yang lainnya. Pola-pola dari hubungan interaksi ini dapat bersifat negatif ataupun positif dan sebagai hasil dari adanya interaksi ini akan timbul pengelompokan tumbuhan yang menggerombol dan tiak acak sifatnya. Ada kemungkinan bahwa tumbuh-tumbuhan ini tidak memberikan pengaruh apapun satu sama lainnya dari situasi seperti ini lebih dikenal *netralisme*. Di alam *netralisme* jarang sekali ditemukan kecuali pada waktu individu-individu tumbuhan masih kecil-kecil ukurannya atau jarak antara tumbuhan yang satu dengan yang lainnya sangat jauh sehingga tidak memungkinkan terjadinya interaksi.

Tiga jenis interaksi yang disajikan pada Tabel 1 dapat dikelompokkan ke dalam interaksi positif, yaitu salah satu atau kedua jenis individunya mendapat keuntungan dari adanya interaksi. Komensalisme terjadi bila salah satu jenis tumbuhan mendapat keuntungan, sedangkan jenis yang lainnya tidak (+0). Protokoperasi dihasilkan jika kedua jenis individu mendapatkan keuntungan dari adanya interaksi (+ +) tetapi tidak jika interaksinya ditiadakan (00). Jenis interaksi positif yang ketiga adalah mutualisme. Tidak seperti pada komensalisme dan protokoperasi yang semuanya bersifat fakultatif dan interaksinya tidak begitu penting, mutualisme bersifat obligatif, yaitu kedua jenis individu tumbuhan saling tergantung sama lainnya. Keduanya mendapat keuntungan pada saat (++) dan akan saling mendapat kerugian jika interaksinya ditiadakan (--).

## **7. Komensalisme**

Komensalisme dapat dijelaskan sebagai hubungan satu arah yang terjadi diantara dua organisme hidup. Pada tipe asosiasi ini, hanya satu jenis organisme yang mendapat keuntungan dengan adanya organisme yang lain. Akan tetapi, organisme ini akan mendapat kerugian jika tidak terjadi asosiasi. Contoh-contoh yang umum dari komensalisme adalah pada jenis-jenis tumbuhan inang yang bertindak sebagai media tumbuh, pelindung, atau pembantu bagi jenis-jenis lainnya, tanpa memberikan pengaruh apa-apa terhadap dirinya sendiri. Organisme yang memanfaatkannya akan memperoleh keuntungan berupa perlindungan.

Komensalisme diantara tumbuh-tumbuhan biasa dijumpai dalam bentuk epifit yakni tumbuh-tumbuhan yang tumbuh melekat pada tumbuh-tumbuhan lainnya. Tumbuhan epifit memanfaatkan inangnya untuk membantu pertumbuhan secara fisik dan bukan untuk memenuhi kebutuhannya akan unsur hara dan air yang telah diperoleh dari air hujan atau kelembaban. Kebanyakan tumbuhan tingkat rendah termasuk ganggang, lumut dan paku tumbuh dan melekat pada batang pohon. Contoh jenis epifit dari golongan tumbuhan tingkat tinggi antara lain anggrek, kaktus, bromelia dan rododendron.

### **8. Protokeporasi**

Contoh-contoh yang dikemukakan di atas merupakan jenis kehidupan yang khas yang dijumpai di alam dan tidak pernah dijumpai adanya komensalisme diantara gulma dengan tanaman pangan. Lebih sering dijumpai bahwa dua jenis tumbuhan yang berinteraksi akan mempengaruhi satu sama lainnya. Ini dijumpai pada *protokoperasi*. Pada protokoperasi ini, kedua jenis akan mendapat keuntungan dari adanya interaksi, tetapi tidak akan memberikan pengaruh apa-apa interaksinya ditiadakan. Biasanya peristiwa ini sering dijumpai pada tumbuhan tingkat tinggi (pohon) yang perakarannya berada dalam lapisan tanah yang sama ke dalamnya. Pertukaran zat-zat fotosintesis sering terjadi dan dengan bantuan mikoriza dua atau lebih pohon mempunyai hubungan antara satu sama lainnya dalam hal pertukaran makanan. Artinya, adanya mikoriza semakin memperlancar adanya protokoperasi.

Tipe lain dari interaksi tumbuhan yang sering menghasilkan pengaruh yang negatif adalah adanya pengeluaran cairan kimiawi dari akar suatu jenis tumbuhan yang kemudian akan diserap oleh perakaran tumbuhan jenis lainnya. Pertukaran zat semacam ini biasanya merupakan senyawa metabolik organik atau anorganik adakalanya memberikan keuntungan bagi tumbuhan yang berperan. Pencucian zat-zat metaboit dari bagian atas tumbuhan oleh air hujan, embun, debu dan lain-lain dapat menjadi sumber terjadinya perpindahan bahan-bahan yang menguntungkan dari tumbuhan yang satu ke tumbuhan yang lainnya. Kalsium, fosfor, magnesium, dan bahan – bahan anorganik lainnya, termasuk karbohidrat, asam amino, dan asam – asam organik lainnya dapat dipindahkan dari satu jenis tumbuhan ke tumbuhan lainnya melalui proses semacam yang diatas (Tabel 3). Beberapa jenis tumbuhan dimana pencucian unsur-unsur hara dapat bersifat menguntungkan telah dibuktikan pada beberapa jenis tanaman sayur-sayuran, biji-bijian, rerumputan, kapas dan tembakau. Sangat sedikit yang telah diketahui mengenai hal asosiasi yang

menguntungkan pada interaksi gulma dengan tanaman pangan atau antara gulma dengan gulma.

Yang paling banyak diketahui dari bentuk protokoperasi diantara tumbuh-tumbuhan ialah yang terjadi pada pertanaman campuran atau pertanaman yang digilir. Praktek-praktek pertanaman serentak (lebih dari satu jenis) telah dikembangkan secara luas diseluruh dunia terutama di daerah tropis. Tinjauan pustaka yang ada mengenai pola pertanaman campuran menunjukkan adanya keuntungan-keuntungan yang diperoleh dari pertanaman campuran ini. Tentu saja dalam mempraktekkan pertanaman campuran perlu diperhatikan beberapa hal seperti pada penebaran tumbuhan, jarak tanam, fase pertumbuhan, waktu tanam, kesuburan tanah dalam merancang dan mengevaluasi hasilnya. Bergantung kepada jenis tanaman pangan dan lingkungannya, banyak hal yang menunjukkan bahwa pertumbuhan dan hasil panen suatu jenis tanaman campuran akan lebih besar jika dibandingkan dengan yang ditanam sendiri-sendiri.

Pada bab ini kita berminat untuk membahas interaksi yang terjadi diantara tumbuhan yang satu dengan yang lainnya, khususnya interaksi antara gulma vs tanaman pangan dan gulma vs gulma. Jenis-jenis interaksi yang diperlihatkan dalam Tabel 1 tidak terbatas hanya untuk tumbuh-tumbuhan dan organisme lainnya yang tergolong dalam protokoperasi adalah hubungan interaksi antara tumbuh-tumbuhan dengan hewan/serangga penyerbuk atau dengan serangga dan hewan-hewan pembawa biji. Beberapa interaksi antara tumbuhan dengan hewan lainnya tidak tergolong ke dalam definisi yang ada pada Tabel 1 secara tegas. Contohnya, pengelolaan gulma yang akan menguntungkan tanaman pangannya kadangkala juga mempengaruhi populasi serangga secara positif maupun negatif.

Adanya beberapa jenis gulma disekitar tanah-tanah pertanian dapat mengurangi populasi hama dengan adanya interaksi secara kimiawi. Beberapa jenis gulma juga dapat bertindak sebagai tuan rumah dari beberapa jenis hama dan penyakit sehingga dapat mengurangi kerusakan terhadap tanaman pangannya. Pada beberapa keadaan, sisa-sisa tumbuhan yang bertindak sebagai tuang rumah dapat memacu perkecambahan patogen yang terdapat dalam tanah, yang kemudian akan mati karena tidak ada tumbuhan dewasanya yang dapat bertindak sebagai tuan rumah. Gulma dapat juga bertindak sebagai tuan rumah sementara bagi jenis-jenis organisme yang menguntungkan khususnya serangga dapat menyediakan madu, serbuk sari, atau tempat perlindungan. Serangga-serangga yang menguntungkan ini biasanya bertindak sebagai parasit atau pemangsa dari hama-hama tanaman pangan.

Di dalam menjelaskan konsep pengelolaan jasad pengganggu secara terpadu juga akan dijelaskan betapa pentingnya interaksi antara organisme yang satu dengan yang lainnya. Diversifikasi habitat dapat menyebabkan meningkatnya kestabilan populasi serangga termasuk hama, pemangsanya, dan serangga-serangga lain yang menguntungkan. Pada beberapa keadaan, pengendalian gulma akan mengakibatkan serangan hama terhadap tanaman pangannya menjadi meningkat yang kemungkinannya disebabkan oleh adanya pengurangan keanekaan sumberdaya yang tersedia bagi kehidupan hama.

## **9. Mutualisme**

Berbeda dengan tipe-tipe positif lainnya yang telah dibahas, *mutualisme* merupakan tipe hubungan antarorganisme yang obligatif. Keuntungan yang diperoleh masing-masing organisme terikat secara mutual dan secara fisiologis saling bergantung satu sama lainnya. Dalam keadaan salah satu pasangannya tidak ada, keduanya akan dirugikan, atau pada beberapa kasus masing-masing organisme tidak dapat hidup jika dipisahkan. Mutualisme harus dibedakan dengan jelas dengan protokoperasi seperti misalnya pada pertanaman campuran. Panenan yang dihasilkan pada pertanaman campuran biasanya diperoleh sebagai akibat tidak adanya kerugian yang timbul dari adanya interaksi dan bukan sebagai akibat adanya keuntungan yang diperoleh satu sama lain. Simbiosis adalah istilah yang bisa digunakan untuk interaksi yang positif. Simbiosis dapat didefinisikan sebagai asosiasi yang saling menguntungkan dari permanen dari dua jenis organisme yang berbeda.

Salah satu contoh populer dari hubungan mutualisme yang terjadi di alam adalah lumut. Lumut merupakan asosiasi simbiose antara ganggang dan jamur. Hifa adalah jamur yang mengitari sel-sel ganggang untuk perlindungannya dan juga untuk membuat lingkungan menjadi menguntungkan pertumbuhannya. Hasil-hasil fotosintesis dan kadangkala juga nitrogen yang dihasilkan oleh ganggang akan diberikan untuk kebutuhan hidup jamur.

## **BAB VI**

### **SISTEM ENERGI LINGKUNGAN PERTANIAN**

#### **1. Sistem Energi**

Energi merupakan kebutuhan yang sangat vital kehidupan. Energi yang dimanfaatkan oleh tumbuhan, binatang, dan manusia pada hakikatnya bersumber dari energi matahari. Segala bentuk kehidupan, proses kehidupan, dan aktivitas hidup memerlukan energi. Tiada kehidupan yang dapat bebas dari energi. Jumlah energi yang dimanfaatkan untuk menjalankan aspek kehidupan itu hampir seratus persen energi radiasi matahari.

Energi matahari yang diradiasi ke bumi dengan berbagai panjang gelombang dan berbagai tingkat energi, sebelum dimanfaatkan oleh organisme terlebih dulu dikonversi menjadi bentuk energi panas, cahaya, kimia, mekanis dan bentuk lainnya, yang pada prinsipnya disesuaikan dengan formasi kebutuhan.

Matahari menyumbangkan energi bumi sebesar kira-kira  $1-3 \times 10^{23}$  kalori tiap tahun. Tumbuhan dan tanaman menangkap energi matahari itu sebesar kira-kira  $1 \times 10^{21}$  kalori setiap tahun, herbivora memperoleh sebesar kira-kira  $5 \times 10^{20}$  kalori setiap bulan. Sedangkan karnivora yang memangsa herbivora memperoleh bagian sebesar kira-kira  $1 \times 10^{20}$  kalori tiap tahun, dan yang terakhir adalah karnivora sekunder dan tertier sebesar kira-kira  $3 \times 10^{19}$  kalori tiap tahun.

#### **a. Aliran Energi**

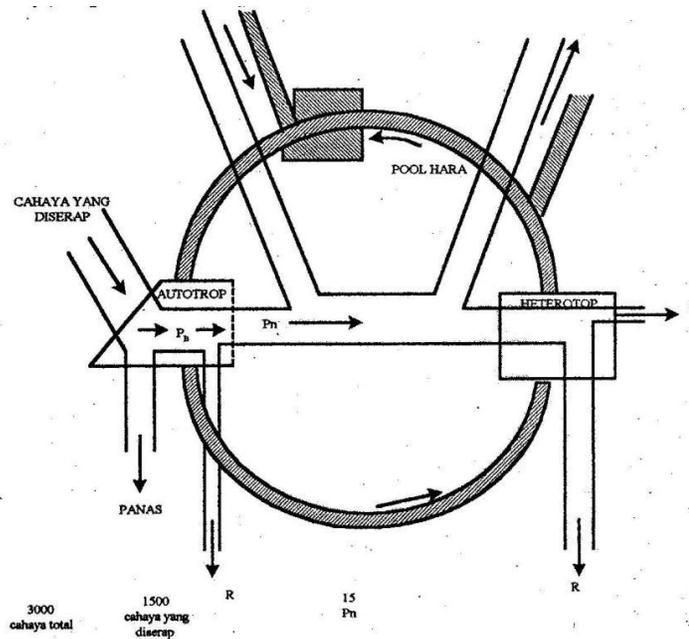
Energi merupakan faktor utama yang mengendalikan ekosistem. Sedangkan interaksi antara berbagai spesies dalam ekosistem itu hanya merupakan faktor ikutan. Pada hakikatnya hampir semua sistem di bumi dibatasi oleh jumlah energi matahari yang tersedia. Tetapi batas toleransi berbagai spesies terhadap faktor abiotik, misalnya suhu, cahaya, unsur hara, juga membatasi besarnya populasi dalam ekosistem. Tetapi peranan faktor toleransi terhadap faktor fisik lebih kecil peranannya bila dibandingkan dengan faktor energi.

Energi diartikan sebagai kemampuan untuk melakukan usaha. Energi yang ditransfer dari satu organisme ke organisme lainnya adalah konstan, selama zat pembawa energi itu tetap jumlahnya. Perilaku energi di alam mengikuti hukum termodinamika.

Hukum termodinamika pertama berbunyi ; energi dapat diubah dari satu bentuk ke bentuk lain. Energi tidak dapat diciptakan dan tidak dapat dimusnahkan. Sebagai contoh energi radiasi matahari dapat diubah oleh tanaman menjadi energi kimia yang tersimpan dalam karbohidrat. Apabila karbohidrat itu dioksidasi, energi tadi akan menjelma kembali dalam wujud lain, misalnya menjadi energi panas. Hukum termodinamika pertama sering juga disebut dengan hukum konservasi energi (*conservation of energy*). Organisme berfungsi sebagai pengalir energi, dari satu organisme ke organisme lainnya tanpa mengurangi kuantitasnya selagi jumlah zat yang mengandung energi itu tetap.

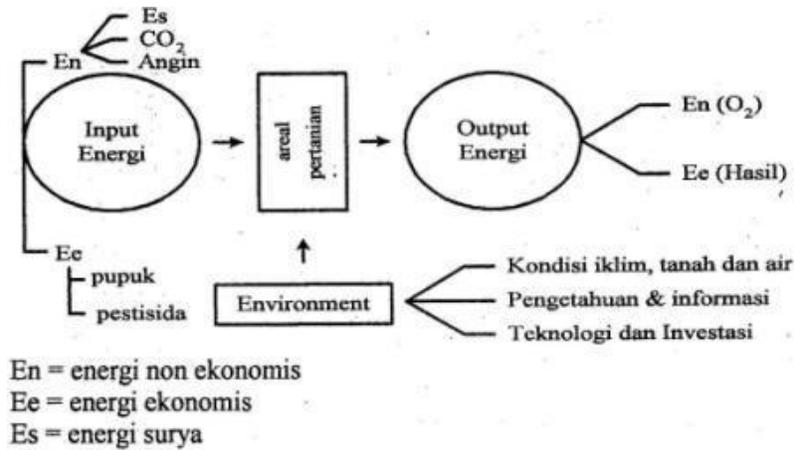
Hukum termodinamika kedua berbunyi; energi dapat terjadi spontan selama ada penurunan derajat (*degradasi*) dari suatu sumber konsentrasi tinggi secara menyebar untuk mencapai perataan. Hukum termodinamika kedua dapat diterangkan dengan panas yang makin lama panasnya menurun karena terjadi aliran (*konvensi*) untuk perataan. Contoh yang lain adalah radiasi matahari yang dipancarkan ke bumi. Energi radiasi matahari itu tidak pernah kembali ke matahari. Namun energi itu tidak pernah habis selagi bahan dasar dan proses penciptaan energi di matahari itu belum habis.

Dalam rantai makanan (*food chain*), bermacam-macam organisme yang mendapat makanan dari tumbuhan dengan jumlah transfer yang sama, menempati tingkatan trofik yang sama (*trophic lever*). Jadi dalam suatu ekosistem tanaman menempati tropik pertama, hewan herbivora menempati tropik kedua dan demikian seterusnya. Dalam urutan linear dari rantai makanan, salah satu ujung rantai berupa organisme otorotof, sedangkan ujung yang lain berupa predator yang disebut karnivora puncak. Bagaimana rangkaian transfer energi makanan di dalam ekosistem dapat dijelaskan dengan diagram aliran energi suatu komunitas (*energyflow diagram of community*) seperti terlihat pada Gambar 6.1.



Gambar 6.1 Arus Energi dalam suatu Komunitas.  $P_g$  = Produksi kotor,  $P_n$  = Produksi Bersih dan  $R$  = Respirasi, Energi Radiasi Matahari sebesar 3.000 Kcal/m<sup>2</sup> setiap hari (Odum, 1963)

Kalau ditinjau dari segi *input* dan *output* energi, pertanian pada prinsipnya merupakan suatu industri yang memiliki pola teknologi yang memerlukan energi, mengalirkan energi, memproses energi dan menghasilkan energi. Dalam proses itu melibatkan sistem tanaman dan sistem lingkungan untuk mengubah energi radiasi matahari menjadi hasil tanaman. Dalam hal ini tanaman berfungsi sebagai perangkap, yaitu menangkap energi radiasi matahari, karbondioksida, oksigen, unsur hara, air hujan dan panas, untuk kemudian diproses menjadi produk yang mempunyai nilai ekonomis. Produk tanaman dan oksigen sebagai hasil ikutan merupakan proses bahan mentah yang tersedia di alam yang diperoleh tanaman secara cuma-cuma. Tetapi pupuk dan pestisida serta air merupakan masukan energi yang memiliki nilai ekonomis. Hubungan energi *input* dan energi *output* pada suatu areal pertanian dapat dilihat pada Gambar 6.2.



Gambar 6.2. Sistem energi pada suatu areal pertanian

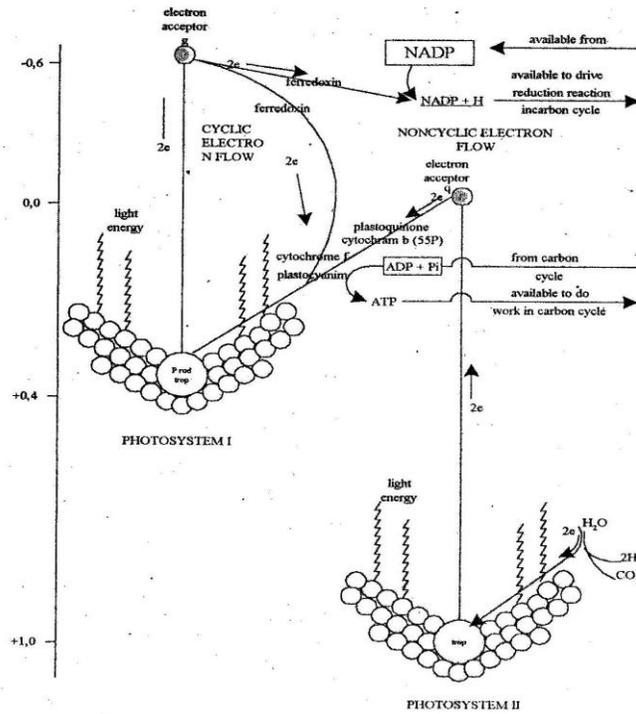
Energi matahari yang tertangkap oleh tanaman, digunakan untuk kegiatan fotosintesa, respirasi, transpirasi, translokasi unsur hara dan asimilat dan lain-lain. Energi cahaya yang ditangkap dalam fotosintesa diubah menjadi energi potensial, yang selanjutnya akan digunakan untuk antara lain:

- Mengabsorpsi unsur hara, mineral dan air.
- Mensintesa bahan-bahan organik.
- Mengkatalisa bahan-bahan organik yang terbentuk melalui proses respirasi dan transpirasi.
- Melaksanakan pertumbuhan dan melengkapi siklus perkembangan.

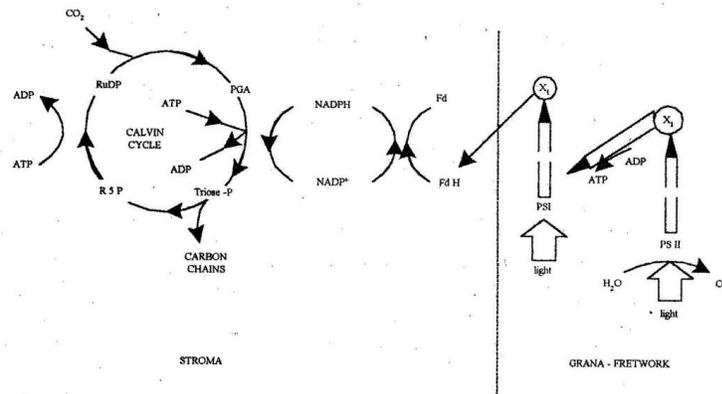
b. Mekanisme Penangkapan Energi Radiasi Matahari

Organel sel tanaman yang berfungsi sebagai penangkap energi radiasi matahari adalah khlorophyl. Penangkapan energi radiasi matahari dan transfer elektron terjadi pada reaksi terang dalam lamella. Fiksasi karbondioksida ( $CO_2$ ) terjadi dalam stroma sewaktu reaksi gelap. Bila khlorophyl kena cahaya dan itu ada elektron aseptor maka akan terjadi evolusi oksigen ( $O_2$ ). Lamella menyediakan zat pereduksi dan ATP (adenosin trifosfat) yang akan menjalankan siklus karbon dari fotosintesa yang terjadi dalam stroma.

Sistem membran internal dari khloroplas melaksanakan oksidasi air yang membutuhkan cahaya dan reduksi cofaktor ferredoxin yang dapat larut. Transfor elektron dari air ferredoxin melibatkan reaksi cahaya. Reaksi cahaya pertama mengakibatkan oksidasi air dan reduksi dari suatu rantai elektron carries. Reaksi cahaya ini dinamakan fotosintesa II (PSII). Reaksi cahaya kedua fotosintesa I (PSI). Reaksi cahaya kedua ini mengakibatkan oksidasi dari suatu rantai elektron carries dan akhirnya reduksi ferredoxin. Formulasi elektron ini dikenal sebagai skema Z, lihat Gambar 6.3 dan Gambar 6.4.



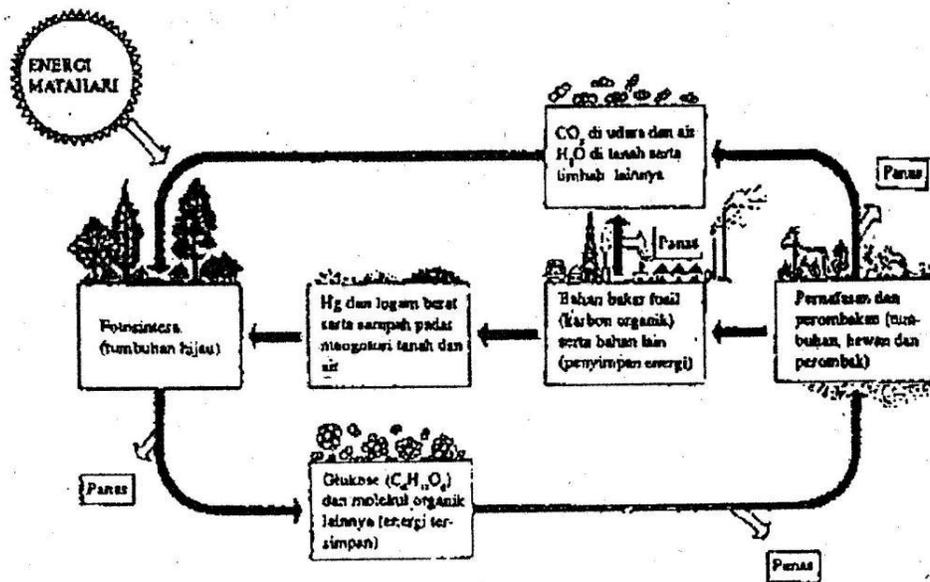
Gambar 6.3 Pembentukan ATP dan NADPPH dalam Fotosistem I dan Fotosistem II (Weier dkk, 1974)



Gambar 6.4 Tiga Tahap Proses Fotosintesis dalam Khloroplast (Leech, 1976)

Dalam reaksi gelap energi radiasi matahari yang telah diubah sesuai dengan bentuk kebutuhan secara biokimia, akan digunakan untuk menyusun karbohidrat yang bahan mentahnya dari molekul dari dan karbondioksida. Reaksi biokimia ini adalah penggabungan atom hidrogen ke molekul karbondioksida, terbentuk karbohidrat ( $C_6H_{12}O_6$ ) dan molekul oksigen.

Karbohidrat ini mengandung energi kimia yang akan menghasilkan energi lagi apabila dimanfaatkan oleh organisme dalam oksidasi biologis. Ilustrasi lingkaran energi pada lingkungan yang kompleks (Gambar 6.5). Matahari merupakan sumber energi utama di bumi. Bahan organik kaya energi dan fosil dibongkar dalam dalam respirasi dan pembakaran. Namun tanpa disadari energi fosil itu akan dapat mengotori kalau pengolaannya tidak cermat.



Gambar 6.5 Energi Matahari Langsung Mengendalikan Aktivitas Organisme. Fotosintesis merupakan Aktivitas Pertama yang Mengkonversikan Energi Matahari Menjadi Bahan Organik

### c. Produktivitas

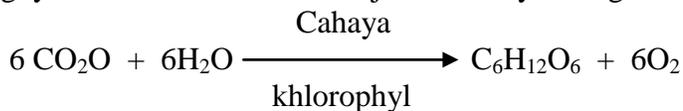
Makin pendek suatu rantai makan (*food chain*) makin besar energi yang tersedia untuk membentuk senyawa-senyawa anorganik disebut dengan produktivitas primer. Produktivitas primer sering dianggap sama dengan fotosintesa. Ini tidak seluruhnya benar, sebab sejumlah kecil produktivitas primer dapat dihasilkan oleh bakteri kemosintetik. Namun yang dimaksud dengan produktivitas primer terbatas pada tanaman.

Jumlah seluruh bahan organik yang terbentuk dalam proses fotosintesa disebut dengan produksi primer kotor, atau produksi total. Sebagian dari produksi total ini digunakan tanaman untuk kelangsungan proses-proses fisiologis, diantaranya dari produksinya total yang tertinggal akan ditransfer ke organisme lain.

Produksi primer bersih adalah jumlah sisa produksi primer kotor setelah sebagian digunakan tanaman untuk respirasi. Produksi primer bersih inilah yang tersedia bagi tingkatan-tingkatan tropik lain.

Produksi primer kotor maupun bersih pada umumnya dinyatakan dalam jumlah gram karbon yang terikat per satuan luas setiap interval waktu, atau dengan satuan ( $\text{g C.m}^{-2} \cdot \text{hari}^{-1}$ ) atau satuan lain yang lebih cepat.

Mengukur produktivitas primer dapat dilaksanakan dengan mengukur laju hilangnya karbondioksida atau laju munculnya oksigen dari proses fotosintesa.



Jumlah karbon dalam karbondioksida berbanding lurus dengan jumlah karbon yang terikat dalam gula selama fotosintesa. Memang secara teoritis pengukuran hilangnya karbondioksida ( $\text{CO}_2$ ) dan munculnya oksigen ( $\text{O}_2$ ) mudah dilakukan, tetapi secara praktis masih sukar dilakukan, karena kehilangan karbondioksida dan munculnya oksigen dari lingkungan tanaman masih dipengaruhi oleh fungsi tanaman yang lain seperti respirasi. Ketelitian dan kecermatan sangat dituntut di sini.

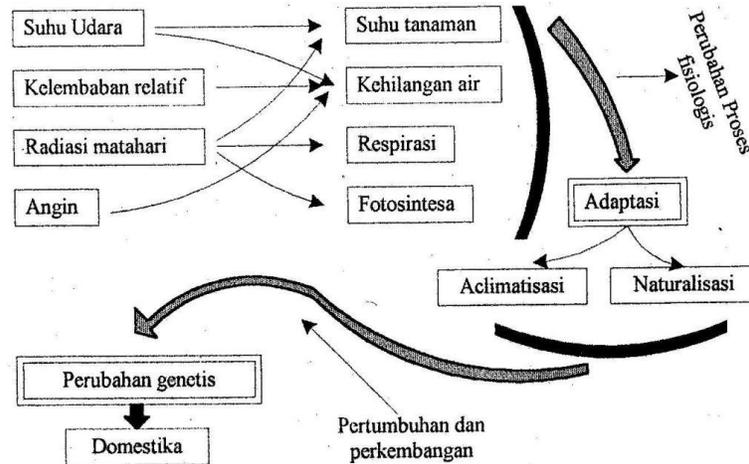
### d. Respon Tanaman Terhadap Faktor Lingkungan

Kaitan faktor-faktor lingkungan satu sama lainnya, mempengaruhi fungsi fisiologis dan morfologis tanaman. Respon tanaman sebagai akibat faktor lingkungan terlihat pada penampilan tanaman (*performance*). Tanaman berusaha menanggapi kebutuhan khususnya selama siklus hidup, kalau faktor lingkungan

tidak mendukung. Tanggapan ini dapat terlihat berupa perubahan morfologis atau proses fisiologis. Walaupun genotipnya sama, dalam lingkungan berbeda, penampilan tanaman akan berbeda pula. Sebagai contoh, tanaman nanas (*Ananas comosus*) pada tanah kering daunnya lebih tebal, dan pada tanah yang cukup air daunnya lebih tipis. Tanaman randu dan karet merontokkan daunnya pada cuaca kering.

Perontokan daun bagi tanaman randu dan karet, merupakan tanggapannya terhaap perubahan cuaca dari keadaan yang cukup air ke keadaan stress air yang akan membahayakan proses fisiologis. Tanaman berusaha mengubah kondisi morfologisnya ke arah yang lebih menguntungkan. Dengan merontokkan daun, berarti kebutuhan akan air dapat berkurang, karena transpirasi terbesar terjadi pada daun. Kenyataan ini juga berarti, dengan merontokkan daun cahaya yang tertangkap akan berkurang, sehingga laju fotosintesa menurun sejalan dengan stress air. Bila kondisi cuaca optimum (air cukup), maka daun-daun muda kembali dibentuk.

Perubahan faktor lingkungan seketika, seperti perubahan suhu, kelembaban rrlatif, radiasi matahari dan angin akan menghasilkan respon jangka pendek (Gambar 6.6). Tetapi bila perubahan lingkungan terus-menerus sampai satu periode perkembangan tanaman atau lebih, tanaman secara berangsur-angsur mengubah proses fisiologisnya. Bila penyesuaian ini berlanjut sampai beberapa keturunan, bukan saja terjadi perubahan proses fisiologis, malah terjadi perubahan genetik dalam khromosom atau gene. Perubahan secara perlahan-lahan dan turun-temurun dapat disebut dengan evolusi (Wallace dan Srb, 1963), walaupun bukan semua proses evolusi merupakan adaptasi.



Gambar 6.6 Perubahan Fungsi Tanaman akibat faktor-faktor lingkungan dalam jangka waktu tertentu

Evolusi berlangsung melalui dua jalur yang berbeda, yakni mutasi gene dan seleksi alami. Tetapi keduanya disebabkan oleh faktor lingkungan.

Mutasi gene adalah perubahan struktur dan fungsi gene akibat perubahan lingkungan yang luar biasa dan datangnya tiba-tiba. Penyebab mutasi gene diantaranya adalah bahan fisika, kimia dan biologi yang mempunyai daya tembus tinggi hingga mencapai bahan genetik dalam inti sel, misalnya radioaktif, zat kimia yang keras dan virus.

Seleksi alami adalah penyelesaian oleh lingkungan, misalnya lingkungan biotik dan lingkungan abiotik, terhadap variasi genetik yang tersedia tanpa menciptakan genotif baru. Seleksi alami berlangsung dalam kurun waktu yang lama, sehingga perubahan-perubahan terhadap bentuk dan fungsi tanaman berlangsung secara perlahan-lahan. Tanaman yang dibudidayakan sekarang merupakan hasil seleksi alami dari bentuk lainnya. Dari tahap-tahap seleksi, tanaman yang tahan terhadap faktor lingkungan dan persaingan antara sesamanya akan tetap berkembang, dan jenis yang tidak mampu musnah. Variasi-variasi genotif dapat terjadi akibat terjadinya pergeseran-pergeseran yang kecil dan tidak jelas dari satu individu ke individu lainnya.

## 2. Siklus Biogeokimia

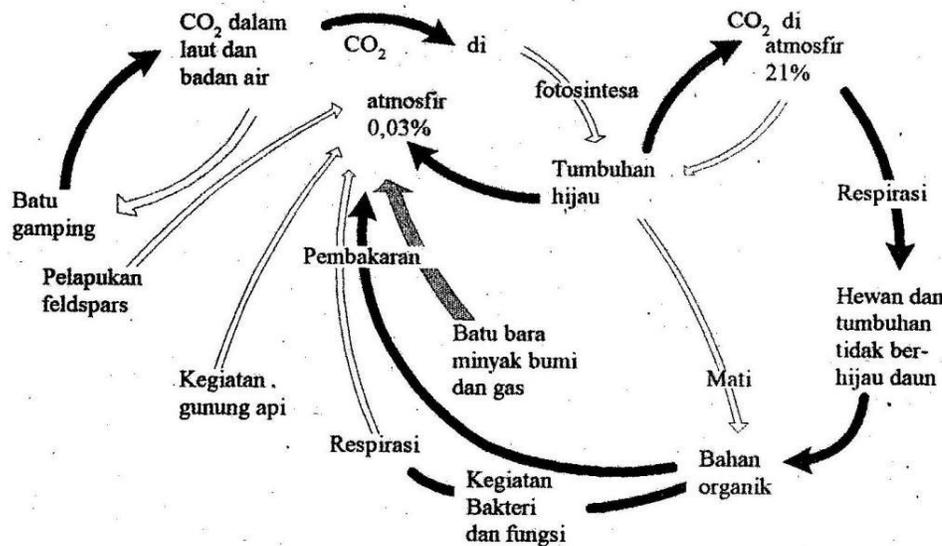
Dari sekian banyak unsur dan persenyawaan kimia termasuk unsur esensial yang terdapat dalam, protoplasma, cenderung untuk bersirkulasi antara lingkungan dengan organisme dalam biosfer. Pemindahan yang berulang-ulang atau teratur dan terbentuk terus-menerus antara komponen biotik dan abiotik disebut dengan siklus biogeokimia (*biogeochemical cycle*). Beberapa siklus ini menyangkut persenyawaan kimia yang amat diperlukan bagi kesinambungan kelestarian kehidupan dalam ekosistem.

Dalam setiap daur ini terdapat suatu persediaan cadangan utama atau gudang unsur, dimana unsur secara terus-menerus bergerak masuk dan melewati organisme. Dalam setiap siklus juga terdapat suatu tempat pembuangan sejumlah tertentu unsur-unsur kimia dan unsur kimia ini tidak dapat didaurulangkan melalui peristiwa biasa. Dalam periode waktu yang lama, hilangnya bahan kimia ke tempat pembuangan dapat menjadi faktor pembatas (*limiting factor*), kecuali jika tempat pembuangan tadi dapat dimanfaatkan kembali. Situasi ini biasanya terjadi pada peristiwa geologik, di mana unsur-unsur yang tertimbun dilepaskan kembali melalui organisme, erosi dan faktor-faktor lainnya. Siklus biogeokimia pada akhirnya cenderung mempunyai mekanisme umpan-balik yang dapat mengatur sendiri (*self regulating*) yang menjaga siklus itu dalam keseimbangan. Siklus biogeokimia yang terpenting adalah siklus karbon dan oksigen, siklus nitrogen dan siklus fosfor, yang berperan terhadap lingkungan tanaman.

### a. Siklus Karbon dan Oksigen

Karbon tersimpan dalam bentuk molekul karbondioksida ( $\text{CO}_2$ ) dan oksigen terdapat dalam bentuk molekul oksigen yaitu  $\text{O}_2$ . Karbon diikat oleh tanaman dalam proses fotosintesa dan dihasilkan bahan organik. Bila bahan ini dioksidasi akan menghasilkan kembali karbondioksida. Dari proses fotosintesa di atas selain dihasilkan bahan organik berupa karbohidrat, juga dihasilkan oksigen. Bahan organik hasil fotosintesa berpindah ke herbivora dan pemangsa (*karnivora*) dan kembali ke cadangan melalui respirasi dan kegiatan bakteri. Sisa bahan organik yang tidak dimanfaatkan oleh herbivora maupun karnivora, akan dilapuk oleh bakteri tertentu. Bagian bahan organik yang tidak dilapuk (*dekomposisi*) melalui proses-proses geologik lainnya akan membentuk gambut, batu bara dan minyak bumi. Gambut dan batu bara mengandung karbon terikat, yang besar kandungannya tergantung pada tingkat pelapukannya. Bahan tambang ini akan menghasilkan

karbon ke udara bebas setelah dibakar. Siklus karbon dan oksigen dapat dilihat pada Gambar 6.7.



Gambar 6.7 Siklus Karbon dan Oksigen (Modifikasi dari Wiksie, 1962)

### b. Siklus Nitrogen

Udara merupakan cadangan nitrogen utama dalam siklus nitrogen. Dalam udara terdapat sekitar 78 persen. Gas nitrogen tidak digunakan oleh tanaman tetapi harus dikonversi ke dalam bentuk nitrat, nitrit atau amonium. Konversi ini dilaksanakan oleh bakteri atau ganggang. Sebagian tanaman, diantaranya tanaman leguminosa mampu memfikasi gas nitrogen (N<sub>2</sub>) menjadi nitrat. Pekerjaan ini, leguminosa bersimbiose dengan bakteri pengikat nitrogen. (lebih terinci fiksasi nitrogen oleh bakteri dan leguminosa akan dibicarakan pada bagian lain).

Senyawa nitrogen selain dihasilkan oleh atmosfer, juga dihasilkan dari kegiatan gunung api. Senyawa ini bereaksi dengan air hujan dan turun ke tanah membentuk senyawa nitrat yang kemudian dimanfaatkan oleh tanaman. Bila tanaman



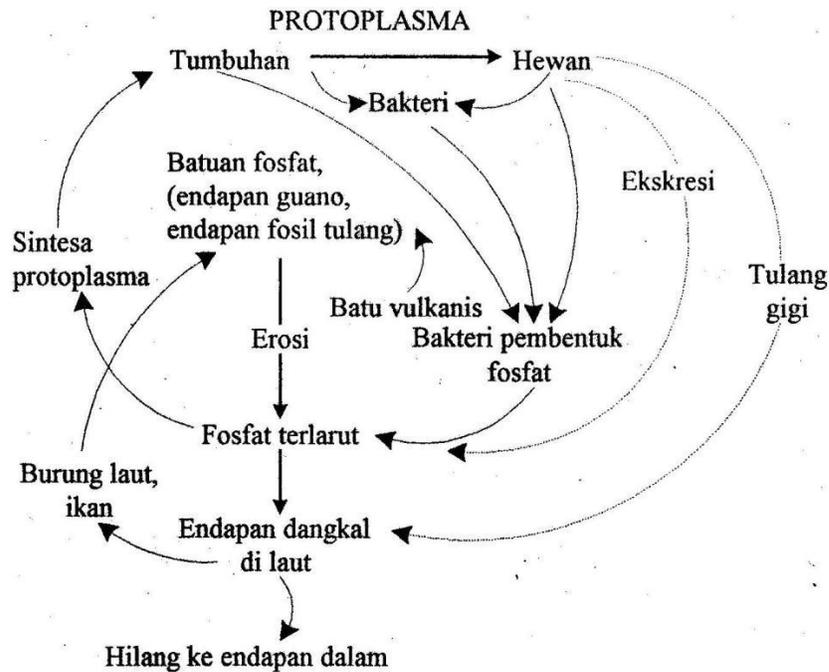
Batuan fosfat yang terlarut dalam air tanah, sebagian hilang ke badan air dan sebagian lagi diabsorpsi tanaman. Tanaman yang dimakan oleh hewan akan merupakan pula sumber fosfor, bila hewan ini mati. Bakteri dalam hal ini berfungsi sebagai agen pelapukan bahan-bahan dasar yang mengandung fosfor, misal bahan organik (sisa tumbuhan, kerangka hewan) dan batuan mineral yang mengandung fosfor.

Erosi membawa senyawa fosfat ke dalam air, dimana tumbuhan air akan memanfaatkannya. Daur ulangnya dapat terjadi bila burung yang memakan tumbuhan air dan ikan mati, atau melalui ekstretnya, lihat Gambar 6.9.

### **3. Siklus Hidrologi**

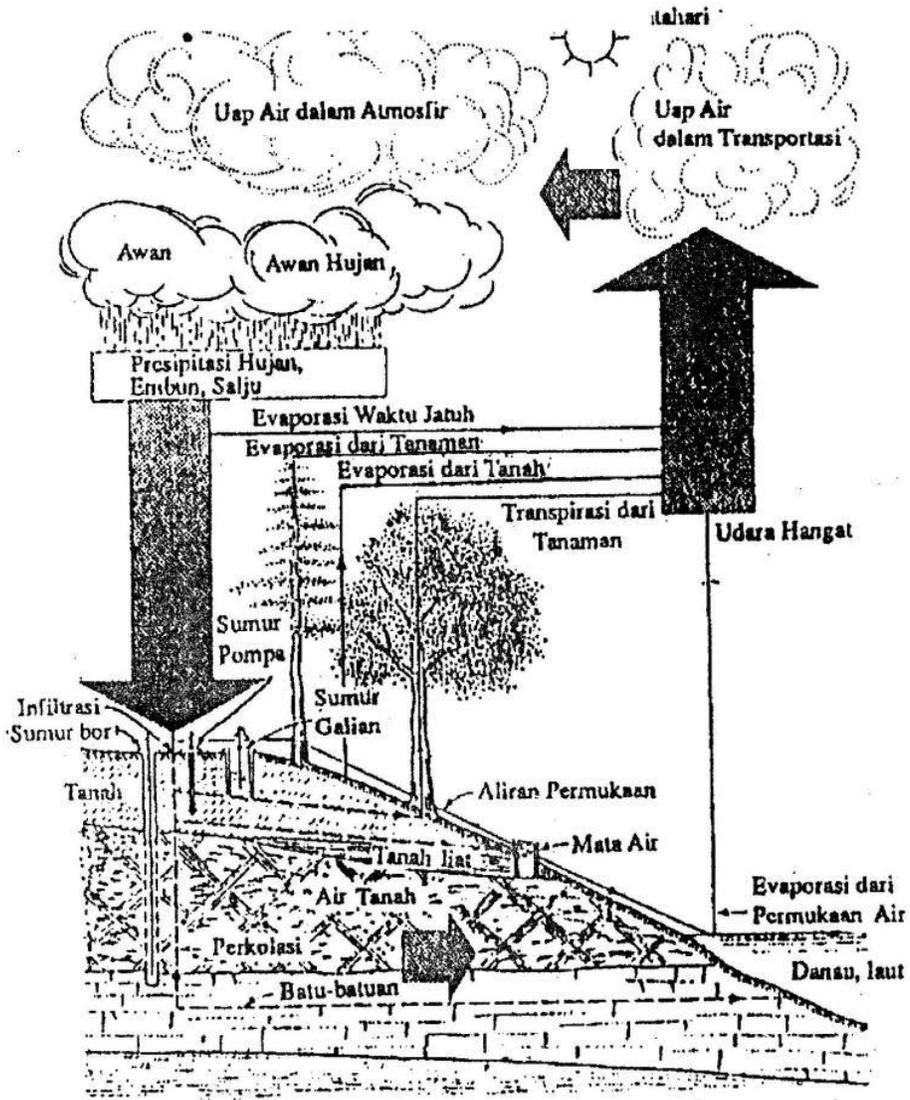
Energi radiasi matahari memainkan peranan yang menentukan pada siklus energi dan zat di bumi. Dengan adanya energi radiasi matahari kelestarian siklus biogeokimia dan siklus hidrologi dapat dipertahankan.

Jumlah air yang meninggalkan permukaan tanah dan badan air dalam bentuk uap, pada waktu tertentu selalu sama dengan jumlah air yang turun dari atmosfer dalam bentuk presipitasi. Air yang jatuh ke permukaan tanah, sebagian mengalir di permukaan tanah (*run off*) menuju sungai atau danau dan laut. Sebagian lagi akan merembes ke dalam tanah yang disebut dengan infiltrasi. Air infiltrasi bergerak terus ke lapisan tanah yang lebih dalam dan kemudian berkumpul menjadi air tanah bebas (*ground water*). Aliran air tanah (*interflow*) bergerak dalam akuifer menuju sungai, danau dan laut. Dalam perjalanannya dari atmosfer ke permukaan tanah, sungai, danau, laut maupun ke dalam tanah, air dapat berubah wujud (cair, padat dan gas) yang dikontrol oleh suhu.



Gambar 6.9 Siklus Fosfor Merupakan Kunci Kehidupan, karena setiap Proses Diperlakukan Kehadiran Fosfor (Modifikasi dari Odum, 1966)

Sirkulasi air setiap waktu tidak merata di permukaan bumi. Kenyataan ini dibatasi oleh laju evaporasi, transportasi uap air, kondensasi dan presipitasi. Akibat tidak meratanya sirkulasi air, maka jumlah air yang terdapat pada suatu daerah tidak sama. Kebanjiran bisa terjadi di suatu daerah, tapi di daerah lain mengalami kekeringan. Sehingga permasalahan air terutama di bidang pertanian tidak pernah terselesaikan. Bagaimana perjalanan air di alam dapat dilihat pada gambar 6.10.



Gambar 6.10 Siklus Hidrologi (Salvato, 1972)

Jumlah air yang terdapat di bumi diperkirakan 1,3 – 1,4 milyar km<sup>3</sup> 97,5 persen terdapat di laur, 1,75 persen berbentuk salju di kedua kutub dan puncak gunung 0,73 persen terdapat di daratan sebagai sungai, danau, rawa dan air tanah. Sedangkan yang terapung-apung berupa uap sebesar 0,001 persen. Air inilah yang setiap waktu mengadakan sirkulasinya.

#### **4. Penghematan Energi dalam Agroekosistem**

Upaya memperoleh produksi tinggi terutama pada pertanian sudah maju sebenarnya telah berubah menjadi industri pengkonsumsi energi yang besar. Ketergantungan pertanian pada energi fosil semakin sulit dipisahkan. Walaupun perhatian para pakar terhadap pemakai energi non-fosil secara efisien semakin digalakkan. Minyak dan gas alam sebagai salah satu komponen pupuk dan pestisida menurut para ahli akan habis dalam jangka waktu setengah abad mendatang, bila pemakaiannya tidak dihemat mulai sekarang. Sedangkan sumber-sumber baru semakin sulit ditemukan. Untuk mengurangi ketergantungan pertanian pada sumber daya alam yang tidak dapat diperbaharui (*non renewable sources*), pertanian masa datang harus diarahkan pada pemanfaatan sumber daya alam yang dapat diperbaharui (*renewable resources*) dengan menerapkan sistem teknologi yang menganut prinsip energi masukan rendah.

Kenyaman telah menunjukkan bahwa penggunaan pupuk nitrogen misalnya, di Indonesia selama tahun 1970-1980 terjadi peningkatan tiga kali lipat. Penggunaan pestisida meningkat 6 kali lipat. Namun sayangnya produktivitas yang diperoleh hanya 1,5 kali lipat. Tetapi neraca energi yang sama juga terjad di negara maju seperti Amerika Serikat, sejak tahun 1945-1980 tercatat kerugian akibat serangan hama meningkat dua kali lipat, meskipun jumlah pestisida yang dipergunakan telah meningkat 10 kali lipat. Penghematan energi dan mengurangi ketergantungan pertanian pada energi fosil dapat didekati dengan, antara lain ; teknik penyematan nitrogen pada tanaman leguminosa (*bioteknologi*), pemanfaatan sumber daya alam potensial yang dapat diperbaharui, dan penggunaan virus tertentu dalam penanganan pasca panen.

##### **a. Bioteknologi pada fiksasi nitrogen**

Bioteknologi dalam dunia pertanian telah memperlihatkan peranan yang menakjubkan, terutama dalam penyediaan varietas unggul yang memiliki produktivitas tinggi, tahan hama-penyakit, umur pendek dan dalam pengolahan

pasca panen. Penemuan Gene splicing yang merupakan suatu teknik penyilangan dalam penggabungan DNA yang menghasilkan varietas yang berkualitas tinggi. Teknik ini pada mulanya dengan melokalisasi suatu sifat yang dikehendaki dalam inti sel, kemudian memisahkan dan menempelkannya ke dalam inti sel baru. Di samping itu teknik protoplast fusion yang bekerja dengan cara peleburan protoplasma dua sel yang mempunyai sifat yang berbeda dapat menciptakan individu baru yang mempunyai sifat yang diinginkan. Ke dua teknik ini memang dapat dilaksanakan dengan pemuliaan tanaman konvensional, tetapi memakan waktu dan energi serta dana yang besar. Dengan menerapkan bioteknologi ke dua teknik ini dapat diselesaikan dengan hanya beberapa waktu dan sejumlah kecil energi.

Tahap-tahap fiksasi nitrogen secara biologi oleh tanaman leguminosa pada umumnya dibagi atas dua tahap.

Tahap *pertama*, penggandaan jumlah sel di zone perakaran. Pada mulanya akar mengeluarkan zat, diantaranya *tryptofan* yang dibutuhkan oleh *Rhizobium* sebagai kebutuhan hidupnya. Sementara itu *Rhizobium* juga mengubah *tryptofan* menjadi asam indol setat (*indole acetie acid* = IAA). Perubahan *tryptofan* menjadi asam indol asetat sebelumnya, melalui zat indol aseltadehida. Asam indol asetat berpengaruh terhadap jaringan yang maristematik, diantara pengaruhnya menyebabkan rambut akar menggulung (Gambar 23-a). Rambut akar yang telah menggulung (Gambar 23-b) merupakan media yang baik untuk infeksi *rhizobium*, sehingga bakteri *rhizobium* dengan leluasa masuk ke dalam jaringan korteks. Keberhasilan dan lajunya infeksi tergantung pada suhu tanah dan pH tanah. Suhu yang optimum untuk terjadinya infeksi berkisar antara 180 C sampai 260 C dan pH optimum berkisar antara 6,5 sampai 7,5. Pada suhu di bawah atau di atas suhu optimum dan di luar pH optimum kecepatan terhenti, bahkan dapat menghentikan kegiatan infeksi.

Keserasian hubungan antara *rhizobium* dengan tanaman inang dan faktor lingkungan, akan menyebabkan pula infeksi berhasil. Pada proses infeksi yang berhasil *rhizobium* mengeluarkan senyawa *polisacharida* yang menyebabkan tanaman leguminosa mengeluarkan enzim *polygalakturonase*. Enzim ini mengakibatkan menggulungnya rambut akar.

Setelah *rhizobium* berhasil menginfeksi rambut akar, dari rambut akar terbentuk suatu saluran infeksi, seperti terlihat pada Gambar 23-c.

Dalam korteks bakteri berkembang menjadi sejumlah populasi dan berubah menjadi bakteroid yang mempunyai membran sitoplasmik. Bakteroid

membentuk enzim nitrogenase (Gambar 23-d). Akibat perkembangan bakteri dalam koeks, menyebabkan akar membengkak (membentuk bintil) Gambar 23-e. Sementara itu tanaman leguminosa dirangsang untuk membentuk leghaemoglobin.

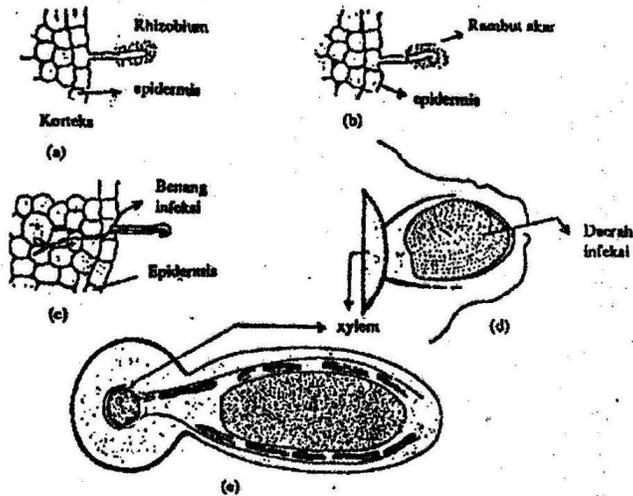
Tahan *kedua*. Leghaemoglobin dan nitrogenase akan mengikat nitrogen bebas ( $N_2$ ) di zone perakaran. Nitrogen yang telah diikat, diionisasi ke dalam, bintil akar. Penyediaan energi untuk mengikat nitrogen dari udara zone perakaran diperoleh dengan mentranslokasikan asemilat keperakaran. Asemilat yang berupa karbohidrat dioksidasi di akar. Energi diperoleh setelah oksidasi berlangsung dan menghasilkan elektron bebas. Nitrogen yang terionisasi berfungsi sebagai acceptor, yang menerima elektron bebas hasil oksidasi, hingga tereduksi menjadi  $NH_3$  (amonia). Penyusunan asam amino berlangsung setelah terbentuk karboksil ( $-COOH$ ) dari pembongkaran karbohidrat dalam respirasi, bergabung dengan gugus amino ( $-NH_2$ ) hasil reaksi amino.

**b. Azolla sp sebagai sumber nitrogen alam:**

Pemanfaatan sumber daya alam yang tersedia tanpa merusak lingkungan dan menyumbang energi masukan yang cukup besar merupakan teknologi yang diharapkan masa datang. Melestarikan siklus hara dengan pemanfaatan kembali limbah pertanian dan penggunaan sumber daya sefisien mungkin adalah salah satu cara yang dapat ditempuh dapat menghemat energi masukan.

Azolla sp merupakan alternatif yang ditujukan untuk menyumbang nitrogen secara alami. Pemanfaatan azolla sp telah dimulai di negara-negara asia, seperti Cina, Vietnam, Jepang, Thailand dan Negara-negara Benua Amerika Selatan.

Dari penelitian Rain dan Talley (1979), azolla sp yang berumur 35 hari dapat menghasilkan biomas 1.600 kg per hektar. Angka ini setara dengan 45 nitrogen atau 100 kg pupuk urea.



Gambar 6.11 Proses Pembentukan Bintil Akar dan Fiksasi Nitrogen pada Akar Tanaman Leguminosa (Epstein, 1972)

Pemakaian Azola sp sebagai pengganti pupuk nitrogen pada padi di India menunjukkan prospek yang meyakinkan. Menurut laporan Singh (1979), pemberian 5 ton per hektar Azola sp yang masuk basah dapat meningkatkan produksi padi sebesar 5% dan pemberian 15 ton per hektar meningkatkan produksi sebesar 33 persen. Pemanfaatan tumbuhan air ini selain dapat menghemat investasi, juga dapat menjaga kelestarian, karena tidak menyebabkan polusi. Jenis-jenis Azola yang digunakan adalah ; *genera Euzolla* dan *Rhioperma*.

Jenis-jenis yang termasuk *Euzolla*, yaitu:

- *Azollafiliculoides* yang menyebar di Amerika Selatan sampai Alaska.
- *Azolla caroliniana* menyebar di Amerika Serikat bagian timur, Mexico dan India Barat.
- *Azolla maxicaria* menyebar di kawasan Amerika Selatan bagian Utara sampai British Colombia.
- *Azolla microphylla* yang menyebar di Amerika Selatan, Amerika Tengah dan India Barat.

Sedangkan jenis-jenis rhizoperma adalah *Azolla Pinata* menyebar di Afrika, Asia Tenggara, Jepang dan Australia. *Azolla Nilotica* menyebar di lembah Nil Afrika.

## BAB VII CAHAYA DAN ASPEK FISILOGIS TANAMAN

### 1. Aspek Fisik

Max Plank (1901) mengemukakan suatu hipotesa yang berbunyi : energi gelombang elektromagnetik dipancarkan dan diserap bahan (zat) adalah sebagai satuan-satuan diskrit yang disebut dengan foton yang besarnya  $hf$ , di mana  $h$  adalah konstanta yang besarnya  $6,63 \times 10^{-34}$  joule detik<sup>-1</sup>, dan  $f$  adalah frekuensi gelombang elektromagnetik. Dari hipotesa Planck dapat disimpulkan bahwa gelombang elektromagnetik terdiri atas partikel-partikel yang mengandung energi.

Albert Einstein pada tahun 1905 memperkuat landasan bagi hipotesa Planck tentang cahaya sebagai paket-paket energi diskrit yang disebut dengan foton, yang besar energinya ;  $E = hf$ . Tetapi hipotesa Planck dan Einstein dapat menimbulkan keraguan, apakah paket-paket energi itu dapat diartikan sebagai partikel. Pada tahun 1923 A.H. Compton mempelajari gejala-gejala, tumbukan antara foton dan elektron. Berkas gelombang elektromagnetik yang keluar dari bahan radioaktif dikenakan pada keping tipis berilium. Pada arah tertentu dipasang alat pengamat (*detector*) elektron dan foton yang diatur agar hanya mengamati pasangan elektron dan foton yang datang serentak. Kesimpulan yang diperoleh adalah bahwa paket-paket energi gelombang elektromagnetik itu dapat berfungsi sebagai partikel dengan momentum:

$$P_{\text{foton}} = \frac{hf}{c}, \text{ dimana } c \text{ adalah kecepatan cahaya yang besarnya } = 3 \times 10^8 \text{ m. det}^{-1}.$$

Hasil hipotesa dan analisa yang telah disebutkan di atas tidak disangsikan lagi bahwa cahaya memiliki sifat kembar, yakni sebagai gelombang dan sebagai partikel. Selanjutnya pengamatan tentang radiasi kalor an gejala fotoliterik memaksa kita beranggapan bahwa cahaya (gelombang elektromagnetik) itu berbentuk paket-paket energi yang besarnya sebanding dengan frekuensinya. Hal ini penting untuk mengkaji respon tanaman terhadap energi cahaya dan kalor.

#### a. Jumlah Cahaya

Jumlah cahaya yang diterima bumi ditentukan oleh letak lintang (*latitude*) dan musim. Latitude berhubungan langsung dengan sudut datang sinar matahari

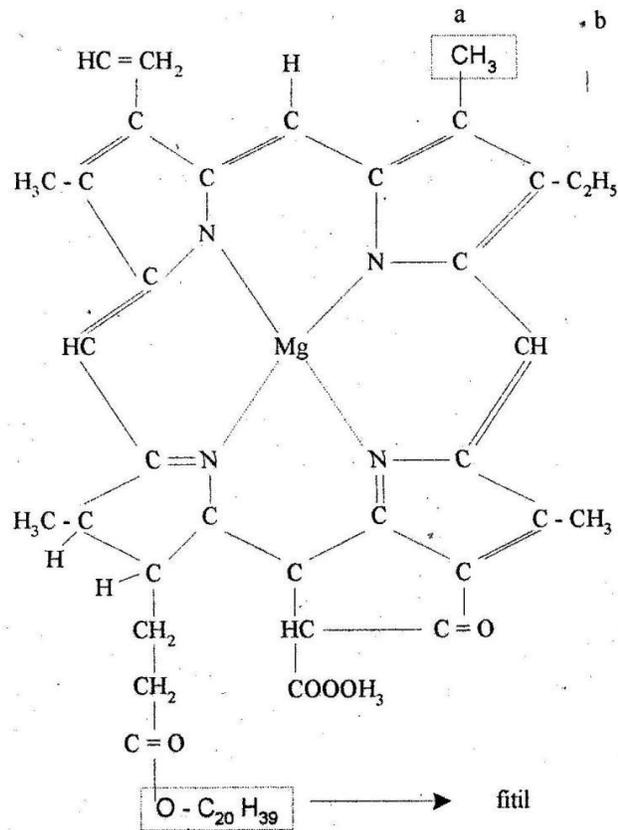
dengan permukaan bumi : sedangkan sudut sinar matahari tergantung pula dengan musim dan kemiringan (*slope*). Lamanya periode cahaya matahari atau panjang hari ditentukan oleh musim.

Di daerah tropik jumlah energi matahari yang dapat tertangkap kira-kira 191 kilo kalori/cm<sup>2</sup>, di daerah sub tropik 120 kilo kalori/cm<sup>2</sup> setiap tahunnya. Di Gurun Sahara daerah tropik energi matahari yang tertangkap dapat mencapai 200 kilo kalori/cm<sup>2</sup>/tahun. Sedangkan di Samaru Nigeria Utara paa Latitude 11<sup>0</sup> utara rata-rata energi matahari yang tertangka setiap harinya adalah sebesar 17 MJ/m<sup>2</sup> pada bulan September dan sebesar 24 MJ/m<sup>2</sup> pada bulan Maret.

#### **b. Kualitas Cahaya**

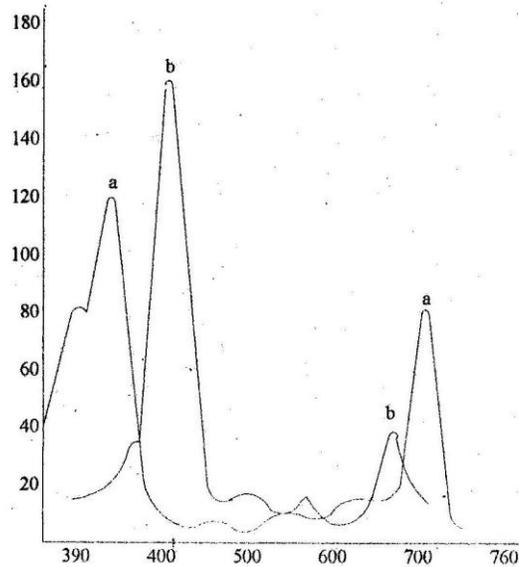
Kualitas cahaya adalah mutu, cahaya yang diterima, yang dinyatakan dengan panjang gelombang. Cahaya yang tampak (*visible light*) mempunyai panjang gelombang dari 400 m  $\mu$  sampai 760 m  $\mu$  (1 m  $\mu$  = 10 Angstrom). Cahaya itu terdiri dari berbagai panjang gelombang dan warna. Cahaya yang tampak masing-masing aalah ungu ( $\lambda$  400 m  $\mu$  - 435 m  $\mu$ ), biru ( $\lambda$  435 m  $\mu$  - 490 m  $\mu$ ), hijau ( $\lambda$  490 m  $\mu$  - 574 m  $\mu$ ), kuning ( $\lambda$  574 m  $\mu$  - 595 m  $\mu$ ), orange (jingga) ( $\lambda$  595 m  $\mu$  - 626 m  $\mu$ ) dan merah ( $\lambda$  626 m  $\mu$  - 760 m  $\mu$ ). Sedangkan panjang gelombang yang lebih pendek dari 400 m  $\mu$  ialah sinar ultra ungu, sinar X, sinar gamma dan sinar kosmis. Panjang gelombang yang lebih besar dari 760 m  $\mu$  adalah sinar infra merah, gelombang radar dan televisi serta gelombang radio.

Sehubungan dengan tanaman, tidak semua panjang gelombang yang disebutkan di atas yang bermanfaat pada tanaman. Panjang gelombang yang berfungsi untuk aktivitas fotosintesa tanaman adalah berkisar antara 400 m  $\mu$  - 760 m  $\mu$  atau sinar yang tampak. Selang panjang gelombang yang menghasilkan cahaya yang dapat dilihat disebut dengan PAR (*Photosynthetically Active Radiation*). Suatu penelitian yang dilakukan untuk melihat besarnya absorpsi tanaman (*khlorophyl*) terhadap *Photosynthetically Active Radiation*, ternyata setiap panjang gelombang memperlihatkan daya absorpsinya yang berbeda-beda. Perbedaan itu juga disebabkan oleh perbedaan khlorophyl yang terdapat paa tanaman, yakni khlorophyl a (C<sub>55</sub> H<sub>72</sub> O<sub>5</sub> N<sub>4</sub> Mg) dan khlorophyl b (C<sub>55</sub> H<sub>70</sub> O<sub>6</sub> N<sub>4</sub> Mg) rumus bangun ke dua macam khlorophyl itu. Seperti terlihat pada Gambar 7.1.



Gambar 7.1 Rumus Bangun Khlorofil a dan Khlorofil b

Absorpsi yang terbesar pada khlorophyl a diperoleh antara panjang gelombang 390 m  $\mu$  - 400 m  $\mu$  dan 650 m  $\mu$  - 700 m  $\mu$ . Lain halnya dengan khlorophyl b, absorpsi yang terbesar terdapat pada panjang gelombang antara 400 m  $\mu$  - 450 m  $\mu$  620 m  $\mu$  - 670 m  $\mu$ . Untuk lebih jelasnya lihat Gambar 7.2. Analisa absorpsi spektrum gelombang cahaya oleh khlorophyl tersebut dilakukan dalam meter.



Gambar 7.2 Absorpsi spektrum gelombang cahaya oleh Klorofil a dan klorofil b dalam larutan eter

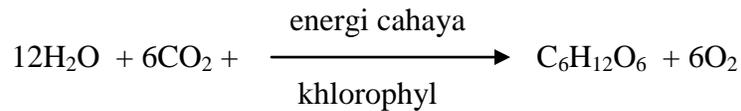
Setiap tanaman juga berbeda-beda menanggapi panjang gelombang cahaya. Sebagai contoh untuk pembentukan tepung bagi tanaman *Phaseolus multiflorus* memerlukan spektrum cahaya sedikit di luar PAR, yaitu berkisar antara 330 m  $\mu$  - 760 m  $\mu$  dan aktivitas maksimum terjadi pada panjang gelombang 687 m  $\mu$  - 656 m  $\mu$  (Miller, 1959)

## 2. Aspek Fisiologis

Cahaya merupakan energi dasar untuk proses fotosintesa, karena energi cahaya mengaktifkan beberapa proses dan sistem enzim yang terlihat dalam rangkaian fotosintesa. Energi cahaya ditangkap oleh klorophyl pada daun atau pada bagian tanaman lainnya yang mengandung klorophyl. Cahaya dan klorophyl menggalakkan proses pengadaan energi yang akan digunakan untuk sintesa makromolekuler dalam sel, misalnya karbohidrat dengan cara mereduksi karbondioksida yang berasal dari udara, yang menghasilkan oksigen. Porsi oksigen yang dihasilkan dan input karbondioksida oleh tanaman selalu menjadi ukuran untuk menentukan lajunya fotosintesa, sebagai akibat penerimaan energi cahaya.

**a. Reaksi Fotosintesa**

Fotosintesa adalah suatu proses metabolisme dalam tanaman untuk membentuk karbohidrat yang menggunakan karbondioksida dari udara bebas dan air dalam tanah dengan bantuan cahaya matahari dan khlorophyl.



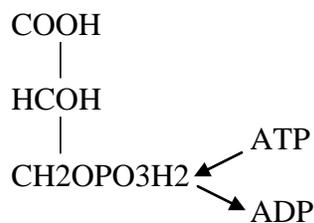
Reaksi fotosintesa digolongkan atas

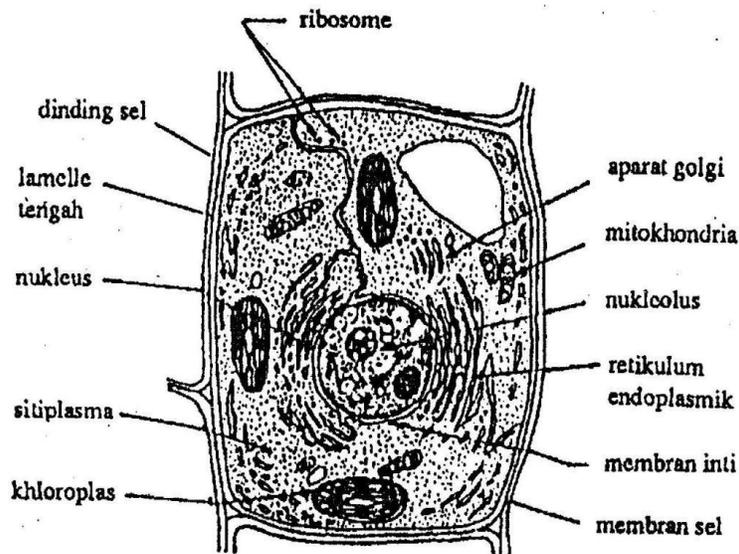
- Fase cahaya (reaksi yang memerlukan cahaya)
- Fase gelap (reaksi yang tidak memerlukan cahaya)

Fase cahaya terdiri dari penangkapan energi cahaya yang akan digunakan untuk memecahkan molekul air (*fotolisa*) menjadi H<sub>2</sub> dan O<sub>2</sub>. Oksigen dilepas ke udara untuk membentuk molekul oksigen. Sedangkan hidrogen ditangkap oleh penangkap hidrogen yang disebut NADP (*Nikotinamid Adenosin Dinukleotida Fosfat*) menjadi NADPH<sub>2</sub>.



Penangkapan energi cahaya selain untuk fotolisa juga digunakan untuk perubahan ADP (*Adenosin Disfosfat*) menjadi ATP (*Adenosin Trifosfat*) yang disebut fosforilasi.



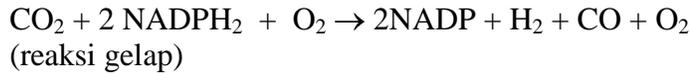
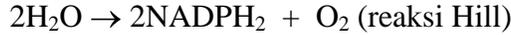


Gambar 7.3 Sel tanaman. Khlorophyl terdapat dalam Khlorophas yang merupakan salah satu komponen

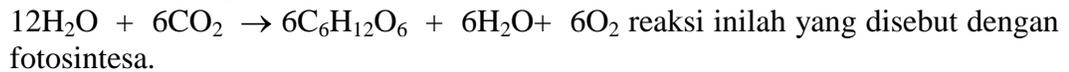
Fosforilasi dapat juga terjadi akibat peristiwa pernapasan (*fosforilasi oksidatif*). Perubahan energi cahaya ke energi kimia dicapai dengan terbentuknya penghasil energi (ATP dan ADP). Energi yang terbentuk dari perubahan ATP ke ADP diubah oleh kerja kimia menjadi bahan organik, seperti gugus fosfat yang kaya energi, sebagai bahan dasar untuk penyusunan karbohidrat.

Fase cahaya = reaksi Hill + fosforilasi

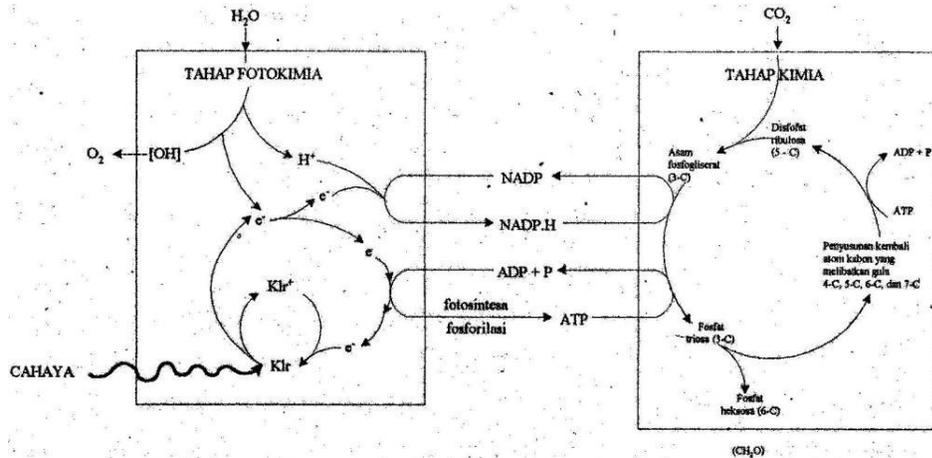
Pada fase gelap energi yang telah dihasilkan dari fase cahaya akan dipergunakan dalam reaksi gelap. Reaksi gelap tidak memerlukan cahaya tapi sangat tergantung pada suhu. Karena fase gelap reaksi biokimia yang berlangsung sangat ditentukan oleh kegiatan enzim. Fase gelap pada prinsipnya adalah pemindahan hidrogen dari air hasil peristiwa hidrolisis oleh pembawa (*aseptor*) hidrogen ( $\text{NADPH}_2$ ) ke asam organik berenergi rendah untuk membentuk karbohidrat dan atom hidrogen ke karbondioksida yang berakhir dengan terbentuknya unit gula.



Reaksi Hill + reaksi gelap =  $2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$ , kalau reaksi ini dikalikan dengan 6



Proses fotosintesa secara skematis dapat dilihat pada Gambar 7.4



Gambar 7.4 Skema Fotosintesis

Reaksi cahaya dan reaksi gelap terpisah beberapa saat. Mekanisme reaksi cahaya menjadi jenuh hanya dengan disinari cahaya selama  $10^{-5}$  detik. Hasil dari reaksi cahaya ini dapat dipergunakan dalam reaksi gelap hanya dalam waktu  $\pm 100$  m second. Kemudian ditingkatkan sedemikian rupa sehingga fiksasi  $\text{CO}_2$  dalam reaksi gelap intensitas penyinaran mencapai maksimum. Dalam hal ini dianggap bahwa seluruh komponen untuk mengubah energi sudah jenuh. Perbandingan antara jumlah khlorophyl dalam proses fotosintesa dengan jumlah molekul-molekul  $\text{CO}_2$  yang difiksasi selama reaksi gelap dapat ditentukan jumlah khlorophyl yang terlibat dalam reduksi satu molekul  $\text{CO}_2$ . Angka ini disebut

dengan unit khlorophyl. Hasil penelitian ahli fisiologi bahwa 2.500 buah molekul khlorophyl untuk setiap molekul CO<sub>2</sub> yang difikasasi. Untuk memfikasi satu molekul CO<sub>2</sub> diperlukan 10 quanta. Dalam mereduksi satu molekul CO<sub>2</sub> diperlukan 10 kali tingkat penyinaran, dengan demikian setiap unit seharusnya mengandung  $10^{-1} \times 2.500 = 250$  butir khlorophyl. Urutan kerja dalam proses fotosintesa yang kompleks dimulai dari unit khlorophyl (*khlorophyl unit*) dan berakhir pada unit fotosintesa (*photosyntetic unit*). Fotosintetik unit merupakan suatu ekspresi fisiologis dan ekspresi morfologis dari fotosintetik unit merupakan adalah unit quatosone.

Sinar matahari yang ditangkap khlorophyl menaikkan tingkat energi elektron-elektron yang dihasilkan dari oksidasi air dalam proses fotosintesa. Elektron yang telah mempunyai tingkat energi tinggi, setelah kembali ke tingkat energi semula akan menghasilkan energi, seperti terlihat pada Gambar 26. Energi yang dihasilkan tersebut kemudian dapat digunakan untuk keperluan biologis, atau dapat digunakan alam sintesa makromolekul dalam sel.

Laju fotosintesa dapat dihitung dengan cara mengukur besarnya karbondioksida (CO<sub>2</sub>) yang difiksasi setiap satuan luas daun dalam satuan waktu tertentu, atau dalam satuan luas lahan setiap satuan waktu.

Laju fotosintesa dapat dijadikan sebagai alat untuk menyatakan aktivitas fotosintesa suatu tanaman. Tidak dapat dipungkiri lagi bahwa aktivitas fotosintesa merupakan hal yang amat penting bagi pertanian. Namun pendekatan produksi dari aspek ini jarang dilakukan.

Dalam upaya meningkatkan produksi suatu tanaman pendekatan melalui aktivitas fotosintesa dapat dilakukan dengan memanfaatkan lingkungan dan potensi tanaman, yang relatif murah bahkan Cuma-Cuma. Pengkajian-pengkajian fotosintesa agar diperoleh behavior fotosintesa, yang merupakan landasan mencari jalan meningkatkan proses fotosintesa pada suatu areal pertanian sangat mutlak diperlukan.

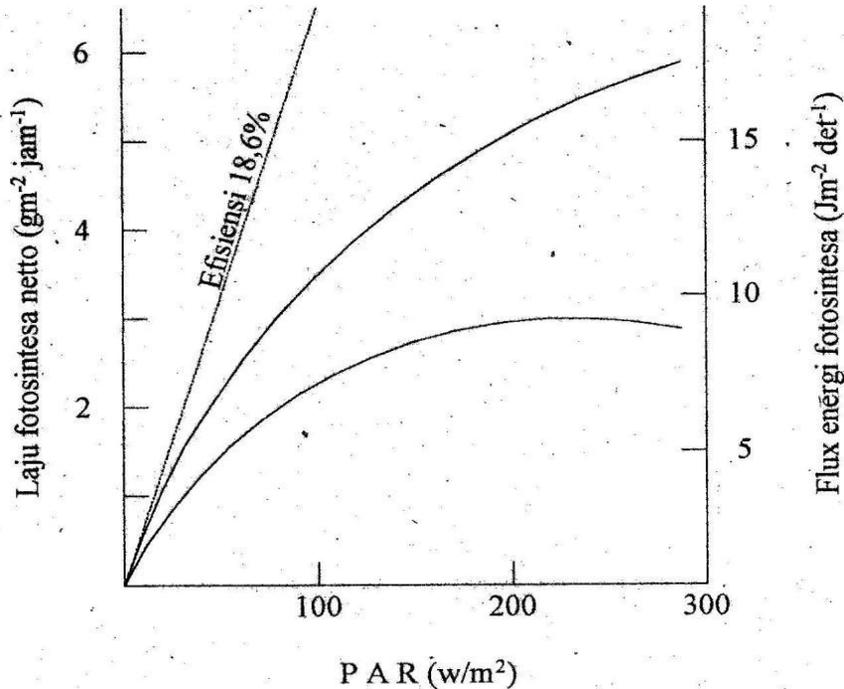
Pendekatan-pendekatan secara fisiologis untuk meningkatkan produksi tanaman dapat dilalui dengan cara:

- Mencari tanaman yang mempunyai efesiensi fotosintesa besar.
- Mencari tanaman yang dapat beraaptasi luas, respon terhaap pupuk dab resistensi terhadap hama dan penyakit.

## **b. Efisiensi Fotosintesa**

Efisiensi fotosintesa adalah ratio antara energi yang tersimpan oleh asimilasi CO<sub>2</sub> dan energi matahari (cahaya) yang diserap oleh sistem fotosintesa (Monteith, *dalam* Alvin dan Kozlowski, 1977). Efisiensi fotosintesa dibatasi oleh sistem cahaya (intensitas, kualitas dan lamanya penyinaran), golongan tanaman (C<sub>4</sub>, C<sub>3</sub> dan C<sub>AM</sub>), suhu dan air. Faktor-faktor pembatas efisiensi fotosintesa secara langsung berakibat mempengaruhi kegiatan respirasi, translokasi asimilat dari source ke sink dan penumpukan asimilat pada sink.

Di daerah tropis yang identitas cahaya relatif lebih tinggi dan didukung oleh suhu juga tinggi lebih cocok untuk tanaman yang jalur fotosintesanya tergolong C<sub>4</sub>, seperti jagung, tebu, sorghum dan kebanyakan rumput pedangan, daripada tanaman yang jalur fotosintesanya tergolong C<sub>3</sub>, seperti legum (kedele, kacang hijau), gandum, padi dan lain-lainnya. Konsep ini didasari bahwa, tanaman yang jalur fotosintesanya tergolong C<sub>4</sub> lebih besar dapat mengubah energi matahari (lapar cahaya) menjadi energi kimia dalam sistem fotosintesanya. Tanaman C<sub>4</sub> juga menghendaki suhu lebih tinggi atau fotosintesa optimumnya tercapai pada suhu tinggi (suhu optimum untuk fotosintesa lebih kurang 35<sup>0</sup>C). Sedangkan tanaman yang jalur fotosintesanya tergolong C<sub>3</sub> lebih cenderung (senang) intensitas cahaya lemah atau fotosintesa optimumnya tercapai pada suhu rendah, (suhu optimum untuk fotosintesa lebih kurang 30° C) lihat Gambar 7.5.



Gambar 7.5 Laju Fotosintesa Netto sebagai fungsi Radiasi Surya untuk Dua Spesies Rumput Tropik C<sub>4</sub> Grass dan C<sub>3</sub> Legume (Ladlow dan Wilson, 1971 dalam Monteith, 1977)

Untuk memperlihatkan perbedaan yang nyata terhadap efisiensi fotosintesa antara tanaman yang tergolong C<sub>4</sub> dan C<sub>3</sub> di daerah tropik, analisislah Gambar 28 dengan Gambar 32.

Selanjutnya Prasetio (1982) suatu perbandingan dari laju fotosintesa tanaman yang tergolong C<sub>3</sub> dan C<sub>4</sub> dapat dibedakan antara lain:

- Maksimum laju fotosintesa tanaman C<sub>4</sub> adalah lebih tinggi dibandingkan dengan tanaman yang tergolong C<sub>3</sub>.
- Suhu optimum untuk tanaman C<sub>4</sub> tajam batasnya dibandingkan dengan tanaman C<sub>3</sub>. Pengaruh hal ini ternyata bahwa laju fotosintesa tanaman C<sub>3</sub> agak berbeda-beda sebanding dengan perubahan suhu di daerah umumnya antara 10<sup>0</sup>C – 35<sup>0</sup>C. Sebaliknya, hasil bersih fotosintesa tanaman C<sub>4</sub>, seperti jagung,

tebu dan lain-lainnya kira-kira dua kali lebih cepat untuk setiap kenaikan  $10^{\circ}$  C diantara  $15^{\circ}$  C. Suhu optimumnya lebih kurang  $35^{\circ}$  C dan terdapat penurunan yang cepat dalam hasil fotosintesa pada suhu yang lebih tinggi dan akan berhenti pada suhu  $43^{\circ}$  C karena protein sudah mulai mengalami denaturasi.

- Tanaman yang tergolong  $C_4$  mempunyai kapasitas fotosintesa lebih besar daripada tanaman yang tergolong  $C_3$  pada suhu tinggi. Akan tetapi, tanaman  $C_3$  lebih tahan terhadap dingin. Beberapa tanaman seperti jagung ( $C_4$ ) sama sekali tidak efisien pada suhu rendah di bawah  $15^{\circ}$  C, walaupun intensitas penyinaran optimum.

### c. Kesulitan Pendugaan Efisiensi Fotosintesa

Walaupun fotosintesa dapat disebut sebagai proses yang menghasilkan source, namun untuk menduga tingkat efisiensi fotosintesa masih sulit dilakukan, karena ; (1) Pendugaan efisiensi fotosintesa pada suatu tingkat perkembangan tanaman mungkin tidak ada hubungan dengan hasil akhir yang diperoleh. Hal ini dapat disadari bahwa hasil akhir yang dibutuhkan (buah, biji, minyak nabati atau bahan kering lainnya) hanya sebagian dari produk fotosintesa. (2) Efisiensi merupakan suatu yang kompleks yang memerlukan peralatan ilmiah yang *sophisticated* kalau ingin ditentukan secara tepat (akurat).

Tingkat efisiensi fotosintesa setiap jenis dan golongan tanaman tidak sama, karena pembagian asimilat ke sink (buah, biji dan bagian vegetatif lainnya) bervariasi. Variasi ini juga akan terjadi antara tingkat pertumbuhan tanaman.

Oleh karena itu perhitungan-perhitungan efisiensi fotosintesa harus didasarkan pada seluruh bahan kering tanaman, yakni bagian vegetatif, akar dan generatif, agar perhitungan yang diperoleh tetap akurat. Memang disadari bahwa beberapa kendala dalam pendugaan bahan kering tanaman antara lain;

- Kesulitan dalam memperhitungkan respirasi dari pertukaran  $CO_2$ . tetapi sebagai acuan bahwa laju respirasi dari suatu tanaman dapat dinyatakan sebagai suatu fungsi yang linear dari laju fotosintesa (respirasi tumbuh) dan berat kering (respirasi pemeliharaan).
- Menetapkan seberapa wajar laju fotosintesa daun berkurang dengan bertambahnya umur tanaman tersebut, yang tentu bergantung pula pada faktor-faktor seperti hara, suplai air dan suhu.

Tingkat efisiensi dibatasi oleh suhu yang ekstrim, kekurangan air, kekurangan unsur hara dan teknologi budidaya dan lain-lainnya. Eka factor

pembatas ini dihilangkan, efisiensi fotosintesa dapat ditingkatkan. Kemampuan konversi energi radiasi matahari di daerah tropik dapat mencapai 5,32 persen di Puerto Rico. Angka ini setara dengan 100,6 ton/ha/tahun rumput gajah kering. Ini berarti bahwa tingkat efisiensi fotosintesa dapat mencapai 5,32 persen pada kondisi lapang yang faktor pembatasnya berada pada kondisi optimum. Beberapa penelitian yang terinci menunjukkan bahwa efisiensi fotosintesa dapat mencapai 20 persen di Laboratorium dengan menggunakan spektrum yang sempit.

#### d. Perhitungan Efisiensi Fotosintesa

Efisiensi fotosintesa dihitung berdasarkan pada energi radiasi matahari yang dapat diterima pada suatu luasan lahan tertentu dan pada bahan kering yang dihasilkan. Sebagai contoh adalah perhitungan yang berdasarkan rata-rata energi matahari yang diterima pada garis 43<sup>o</sup>41', lintang Utara di Guelp, Canada, untuk hasil jagung pipilan 6.200 kg/ha pada kandungan air 15 persen. Perhitungan ini mendemonstrasikan efisiensi fotosintesa pada keadaan lapang. Menurut Yahya (1988) perhitungan adalah sebagai berikut:

Tahap I. Menentukan produksi total per hektar sebagai bobot kering tanaman. Air diambil dari dalam tanah dan penting fotosintesa tetapi bukan untuk produk fotosintesa. Hasil biji biasanya dinyatakan dengan kandungan air 15 persen, taraf air ini untuk menjaga viabilitas dan penyimpanan benih. Hasil biji 6.200 kg/ha (15 persen air) harus dinyatakan dalam bobot kering mutlak:

$$6.200 \text{ kg/ha} \times \frac{85}{100} = 5.270 \text{ kg/ha}$$

Stover (daun dan batang) jagung diperoleh seberat 6.270 kg/ha dan bobot akar diperkirakan 4.480 kg/ha. Jadi bobot kering total yang dihasilkan:

Biji	5.270
Stover	6.270
Akar	4.480
Total	16.020 kg/ha

Tahap II. Menentukan bobot kering yang dihasilkan oleh fotosintesa dengan mengurangi kandungan abunya. Hara tanaman dari tanah memberikan 10 persen dari bobot kering per hektar. Jika bahan tanaman diabukan (dibakar), bagian yang tidak terbakar habis adalah kandungan abunya,

dan ini dipisahkan dari bobot karena bukan produk fotosintesa. Bobot karena bukan produk fotosintesa. Bobot yang dihasilkan dari fotosintesa adalah;

$$16.020 \text{ kg/ha} \times \frac{90}{100} = 14.418 \text{ kg/ha}$$

Tahap III. Menentukan kehilangan respirasi.

Dalam menghasilkan 14.418 kg/ha, energi tanaman telah digunakan untuk respirasi dan bisa dianggap sebagai "biaya hidup" normal yang hilang. Di sini dipilih besaran 25 persen, tetapi kehilangan respirasi bervariasi menurut kondisi lingkungan. Pada keadaan stress air, kehilangan respirasi bisa lebih tinggi daripada 25 persen. Hasil fotosintesa setara total yang dihasilkan:

$$14.418 \text{ kg/ha} \times \frac{100}{75} = 19.224 \text{ kg/ha}$$

Tahap IV. Menentukan output tanaman dengan memperkirakan energi yang dikandung tanaman. Energi yang diperlukan untuk sintesa satu kilogram gula (glukosa) adalah 15.792 kilo joules (KJ) (3.760 kilo kalori). Kandungan energi dalam 19.224 kg/ha tanaman adalah ;  $19.224 \times 15.792 (3.760) = 303.584.400$  KJ atau 72. 282.240 kilo kalori.

Tahap V. Menentukan *input* energi atau berapa banyak energi matahari yang diterima per hektar. Diperkirakan energi matahari yang sampai paa lahan seluas satu hektar selama 100 hari (musim tanam) di Guelph adalah 20.593 juta kJ (4.903 jua kilo kalori). Data radiasi matahari di berbagai tempat penghasil padi dapat dilihat pada Tabel 7.1.

Tabel 7.1 Radiasi Matahari (cal, cm<sup>-2</sup>, day<sup>-1</sup>) di delapan lokasi wilayah pertanaman padi.

Location	Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Juni	Juli	Agt	Sep	Okt	Nov	Des
Grifith, Australia <sup>a</sup>	700	670	520	380	260	250	240	340	460	560	720	710
Madrash, India <sup>b</sup>	476	556	608	374	568	486	432	456	532	397	356	370
Jakarta, Indonesia <sup>b</sup>	361	382	400	396	374	361	388	426	452	422	397	370
Milano, Itali <sup>b</sup>	62	133	220	366	493	499	515	430	325	188	84	47
Saga, Japan <sup>b</sup>	206	295	330	393	381	322	375	444	349	349	298	228
Los Banos, Philippines	336	342	479	568	500	442	402	373	379	363	421	428
Bangkok, Thailand <sup>b</sup>	424	434	481	516	427	425	420	392	374	393	421	428
Davis, USA <sup>b</sup>	158	256	402	528	636	702	690	611	498	348	216	148

<sup>a</sup>CSIRO, Division of Irrigation Research, Grifith, NSW, Australia, meteorological data (1931 – 1976).

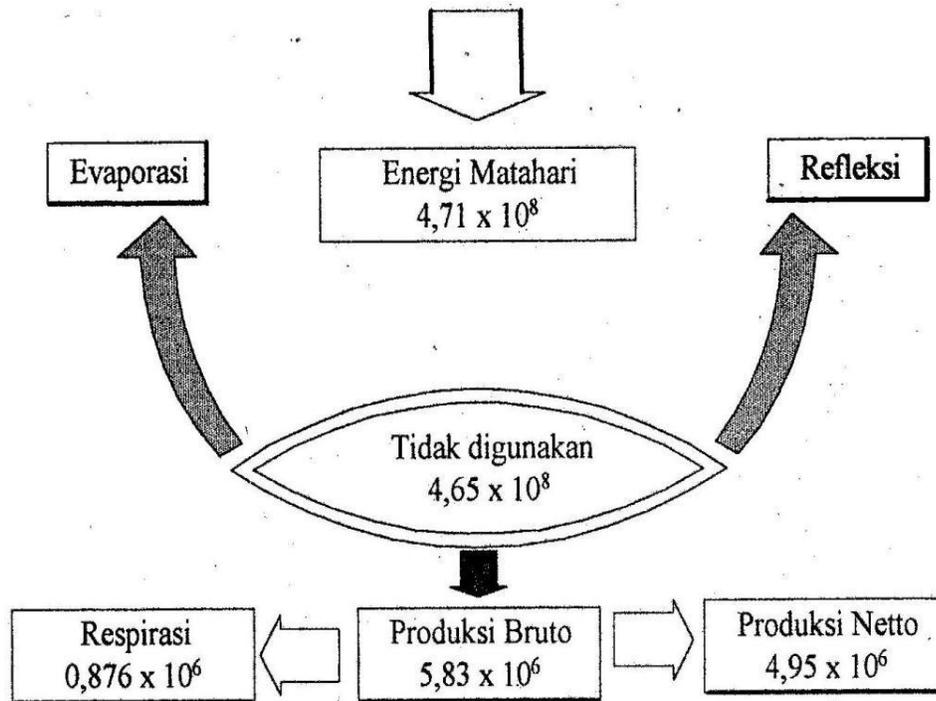
<sup>b</sup>Hayashi (1972)

tahap VI. Menentukan efesiensi fotosintesa dengan menghitung perbandingan *output energi/input energi*.

$$\frac{303.584.400kJ}{20.593.000.000kJ} \times 100 = 1,47 \text{ atau } 1,5 \text{ persen}$$

#### e. Fluktuasi Laju Fotosintesa

Laju fotosintesa bervariasi kibat kegiatan-kegiatan fisiologis tanaman (respirasi, transpirasi), golongan tanaman, letak lintang (*latitude*), kondisi air tanah, suhu dan keadaan atmosfer (kecerahan udara) dan lain-lain. Semua faktor yang mempengaruhi laju fotosintesa di atas secara garis besarnya dikelompokkan atas 3 golongan besar, yakni iklim, tanah dan tanaman. Faktor tanah akan dibicarakan pada bagian lain. Faktor iklim langsung mempengaruhi penerusan radiasi matahari ke bagian tanaman yang mengkonversi energi matahari menjadi bahan kering tanaman. Besarnya energi matahari yang diterima, oleh tanaman tidak sama dari musim ke musim dan latitude ke latitude lainnya. Tetapi besarnya energi matahari yang diterima tanaman (tumbuhan) setiap tahunnya pada latitude yang sama tidak banyak bervariasi. Pada Gambar 7.6 diperlihatkan aliran energi matahari pada areal padang rumput di Michigan U.S.A.

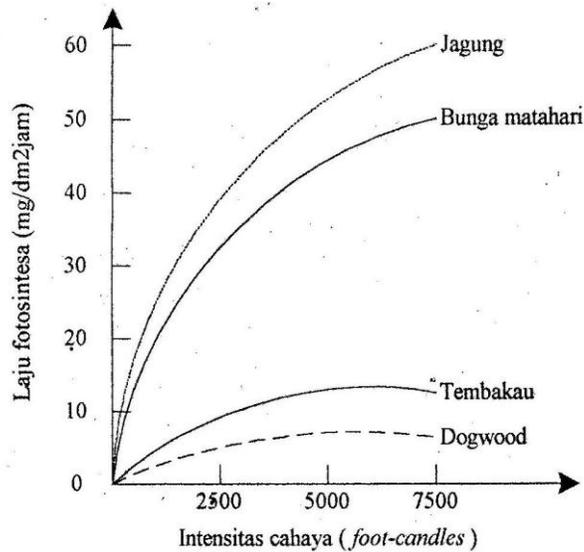


Gambar 7.6 Aliran Energi Matahari di Padang Rumput Michigan U.S.A. Satuan dalam (cal. cm<sup>-1</sup>. tahun) (Golley, 1960 dalam Phillipson, 1969)

Besarnya energi matahari yang ditangkap tanaman untuk jenis tanaman yang berbeda, juga berbeda-beda. Gambar 7.7 dan 7.8 menunjukkan beda laju fotosintesa di antara tanaman.

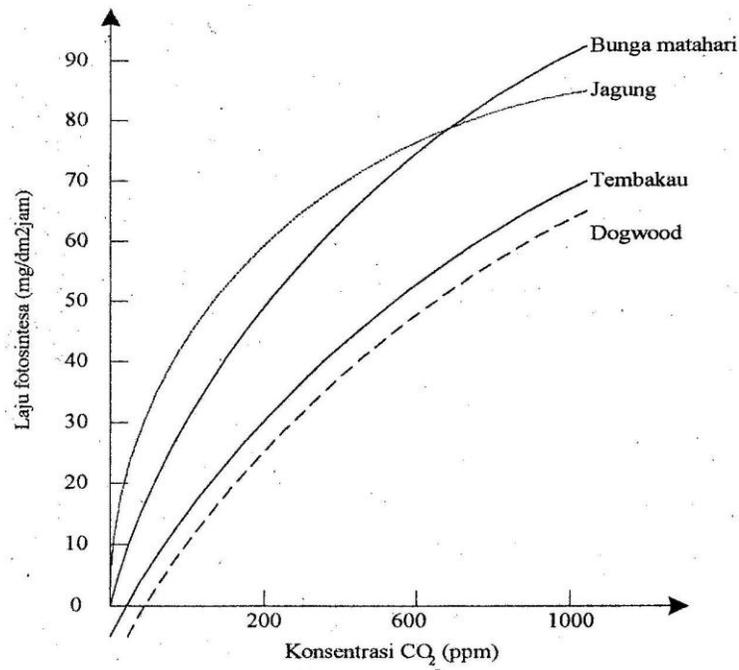
Pada Gambar 7.7 menunjukkan bahwa respon jagung lebih besar pada intensitas cahaya yang lebih tinggi. Intensitas cahaya 7.500 *foot-candles* masih menunjukkan laju fotosintesa yang meningkat. Lain halnya dengan tembakau dan *dogwood* responnya terhadap cahaya lebih kecil bila dibandingkan dengan jagung dan bunga matahari. Intensitas cahaya 2.500 *foot-candles* saja sudah merupakan

laju fotosintesisnya mencapai maksimum dan menjelang intensitas cahaya 7.500 *foot-candles* laju fotosintesisnya berjalan pada kecepatan yang sama. Dari Gambar 29 dapatlah diketahui bahwa respon tanaman sangat ditentukan oleh golongan tanaman, dimana jagung dan bunga matahari adalah tanaman C<sub>4</sub>, dan tembakau dan *dogwood* tergolong tanaman C<sub>3</sub>.



Gambar 7.7 Respon Fotosintesa Empat Spesies Tanaman terhadap Peningkatan Cahaya (dari Ston Kopf, 1981)

Demikian pula halnya konsentrasi di udara memberikan laju fotosintesa yang berbeda antara tanaman, sesuai dengan tingkat konsentrasi karbondioksida (Gambar 7.8).



Gambar 7.8. Laju Fotosintesa pada Berbagai Taraf Karbondioksida dari Empat Species pada Intensitas Cahaya 10.000 foot-candles (Stoskopf, 1981)

## f. Faktor-faktor yang Mempengaruhi Fotosintesa

### 1) Suhu

Suhu berkorelasi dengan penangkapan cahaya matahari. Intensitas cahaya tinggi, suhu juga tinggi. Sampai batas tertentu laju fotosintesa meningkat dengan meningkatnya suhu. Tanaman beriklim sedang suhu maksimum untuk fotosintesa berkisar antara 20<sup>0</sup>C sampai 30<sup>0</sup>C. fotosintesa naik dengan meningkatnya suhu dari 10<sup>0</sup>C sampai 30<sup>0</sup>C, tetapi akan menurun dengan naiknya suhu setelah di atas 30<sup>0</sup>C dan fotosintesa juga menurun dengan turunnya suhu dari 10<sup>0</sup>C sampai 0<sup>0</sup>C. Pada suhu 0<sup>0</sup>C fotosintesa

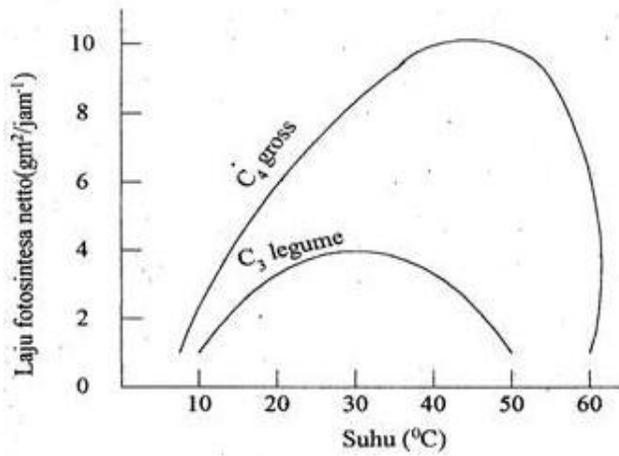
terhenti. Dari kondisi ini diketahui bahwa suhu bekerja sebagai faktor pembatas.

Suhu tinggi menurut Edwards dan Walker (1983) menurunkan kelarutan karbondioksida, meningkatkan ratio kelarutan oksigen/karbondioksida dan aktivitas enzim *karboksilaseoksigenase ribulose bifosfat*. Selanjutnya menurut Bidwel (1974) meningkatnya ratio oksigen/karbondioksida akan menghambat siklus  $C_3$  dengan mengurangi produksi asam fosfat gliserat, karena sebagian ribulase bisofat bereaksi dengan oksigen (bila aa cahaya) membentuk fosfoglikolat yang dikatalisa oleh enzim oksigenase, sedangkan oksigen molekuler sendiri menghambat fotosintesa pada konsentrasi lebih dari 2 persen.

Suhu rendah juga bersifat membatasi proses metabolisme tanaman. Suhu di bawah  $5^{\circ}\text{C}$  bagi tanaman beriklim sedang sudah menghentikan fotosintesa. Suhu rendah meningkatkan viskositas air sehingga translokasi air dari akar dapa terhalang mencapai daun. Aktivitas enzim terganggu apabila suhu mencapai titik beku, karena terjadi viskositas tinggi dan akan menghalang difusi enzim dalam jaringan tanaman. Beberapa enzim dapat rusak karena suhu rendah (denaturasi dingin). Enzim *karboksilaseoksigenase ribulase bifosfat* akan menurun aktivitas pada suhu di bawah  $15^{\circ}\text{C}$  dan akan terhenti aktivitasnya pada suhu  $0^{\circ}\text{C}$ . Terhalangnya air dari akar dan berkruangnya atau terhentinya aktivitas enzim akibat suhu rendah akan menurunkan laju fotosintesa tanaman.

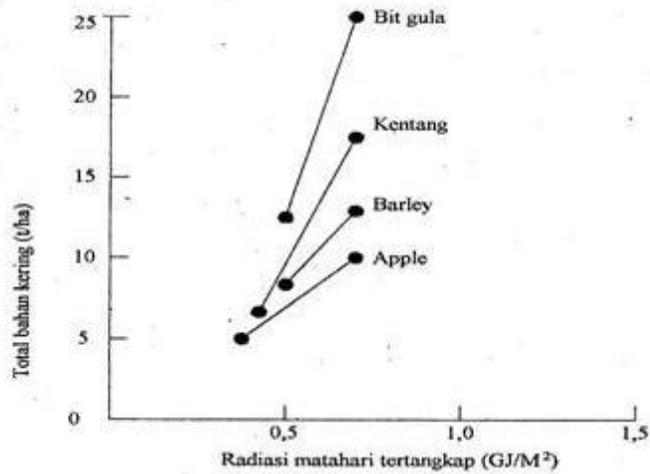
Tanaman daerah tropik suhu maksimum untuk fotosintesa antara  $30^{\circ}\text{C}$  sampai  $40^{\circ}\text{C}$ . Laju fotosintesa akan berjalan pada kecepatan maksimum pada selang suhu  $30^{\circ}\text{C}$  sampai  $40^{\circ}\text{C}$ . Di atas suhu  $40^{\circ}\text{C}$  laju fotosintesa semakin menurun bahkan terhenti pada suhu kritis. Hal ini disebabkan respirasi semakin besar dan beberapa enzim yang terlibat fotosintesa mengalami gangguan aktivitas dan rusak. Demikian pula sebaliknya, suhu rendah di bawah  $10^{\circ}\text{C}$  akan mengganggu aktivitas enzim dan menghalangi aliran air karena viskositas air tinggi. Walaupun respirasi pada suhu rendah kecil laju fotosintesa juga kecil, yang pada akhirnya respirasi sama dengan fotosintesa.

Pengaruh suhu terhadap laju fotosintesa netto pada 2 tanaman; yaitu  $C_4$  grass (Hamil grass, *Panicum maximum*) dan  $C_3$  legume (*Calopo*, *Calopogonium mucunoides*) dapat dilihat pada Gambar 7.9.

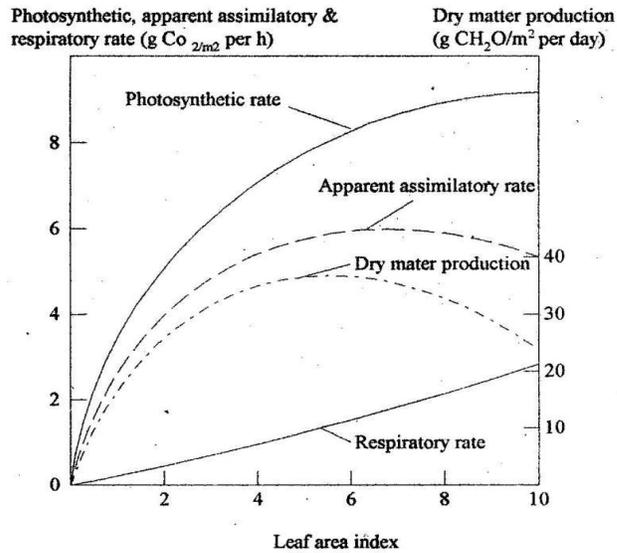


Gambar 7.9 Laju Fotosintesa Netto adalah Fungsi dari Suhu Daun untuk Dua Spesies Rumput Tropical, C<sub>4</sub> Grass (Hamil grass Panicum maximum) dan C<sub>3</sub> Legume (Calopo Colopogonium mucunoides) (Ladlow dan Wilson, 1971 dalam Monteith, 1977)

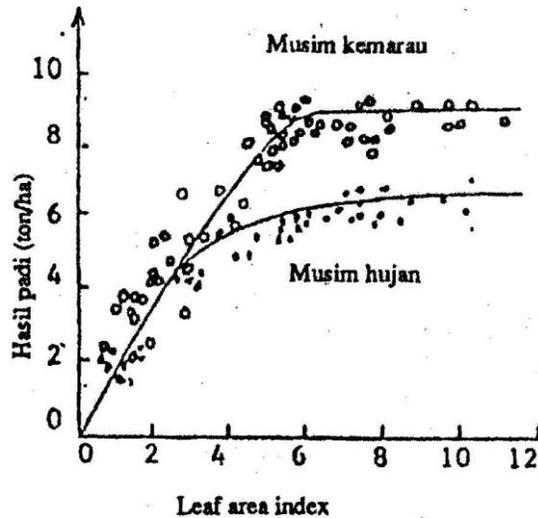
## 2) Penangkapan Radiasi Matahari



Gambar 7.10 Hubungan antara total bahan kering pada saat panen dan radiasi tertangkap oleh daun selama musim tanam untuk apel, baeley, kentang dan bit gula di Inggris (dari Minteith dalam Ritchie, 1980)



Gambar 7.11 Hubungan antara LAI (Leaf Area Index = Indek Luas Daun), Fotosintesa, Laju Pemupukan Asimilat (Apparent Assimilation), dan Produksi Bahan Kering (Dry Matter Production) (Tanaka dkk, 1966)



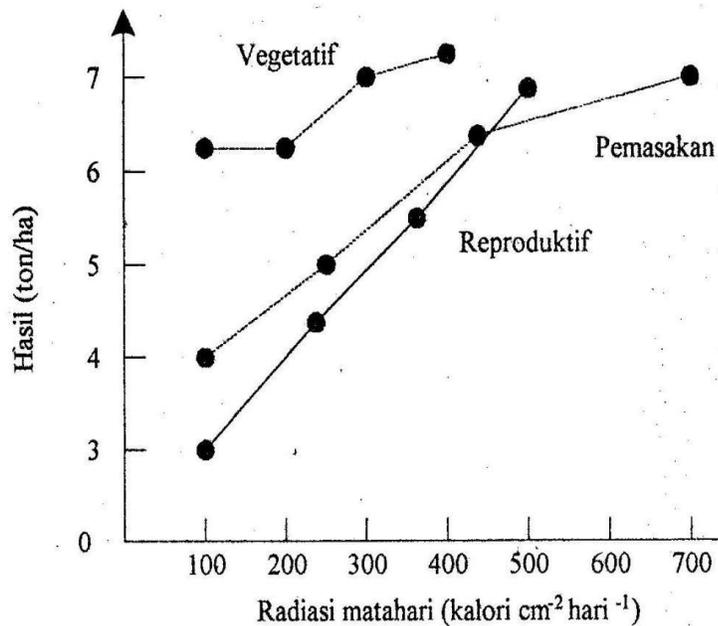
Gambar 7.12 Hubungan antara Hasil Padi dan Leaf Area Index pada saat muncul Bunga dalam Musim Hujan dan Kemarau, 1966-1971, Var. IR8 (Yoshida dan Parao dalam Yoshida, 1977)

Hubungan antara total bahan kering tanaman dengan radiasi matahari tertangkap oleh daun dapat dilihat pada Gambar 7.10. Faktor daun yang mempengaruhi besarnya intersepsi radiasi matahari adalah indeks luas daun (*leaf area index* = LAI). Apabila LAI ditingkatkan besarnya penangkapan radiasi matahari juga akan bertambah. Dengan bertambahnya penangkapan radiasi matahari laju fotosintesa dapat ditingkatkan sampai batas tercapainya LAI optimum. Hal ini juga berarti penumpukan bahan kering dapat diperbesar. Hubungan antara LAI (*leaf area index*), fotosintesa dan laju penumpukan asimilat dan produksi bahan kering tanaman dapat dilihat pada Gambar 7.11, dan Gambar 7.12. Pengaruh besarnya radiasi matahari yang tertangkap daun akibat pemberian naungan pada berbagai taraf pertumbuhan dapat dilihat pada Tabel 7.2 dan Gambar 7.13.

**Tabel 7.2. Pengaruh Penaungan pada Berbagai Tahap Pertumbuhan terhadap Hasil dan Komponen Hasil IR 747B2-6a**

Komponen Hasil					
Cahaya matahari (%)	Hasil biji (ton/ha)	Indeks panen	Spikelet No./m <sup>2</sup>	Biji berisi (%)	Bobot 100 Butir (g)
Tahap Vegetatif					
100	7.11	0.49	41.6	88.9	20.0
75	6.94	0.48	40.6	89.9	19.9
50	6.36	0.51	28.2	89.5	19.9
25	6.33	0.51	38.1	84.3	19.8
Tahap Reproduksi					
100	7.11	0.49	41.6	88.9	20.0
75	5.71	0.47	30.3	87.8	20.3
50	4.45	0.40	24.4	89.4	19.5
25	3.21	0.36	16.5	89.4	19.1
Tahap Pemasakan					
100	7.11	0.49	41.6	88.9	20.0
75	6.53	0.49	41.1	81.1	20.0
50	5.16	0.44	40.6	64.5	19.5
25	3.39	0.38	41.7	54.9	19.1

<sup>a</sup>Yoshida and Parao (*dalam* Yoshida, 1977)



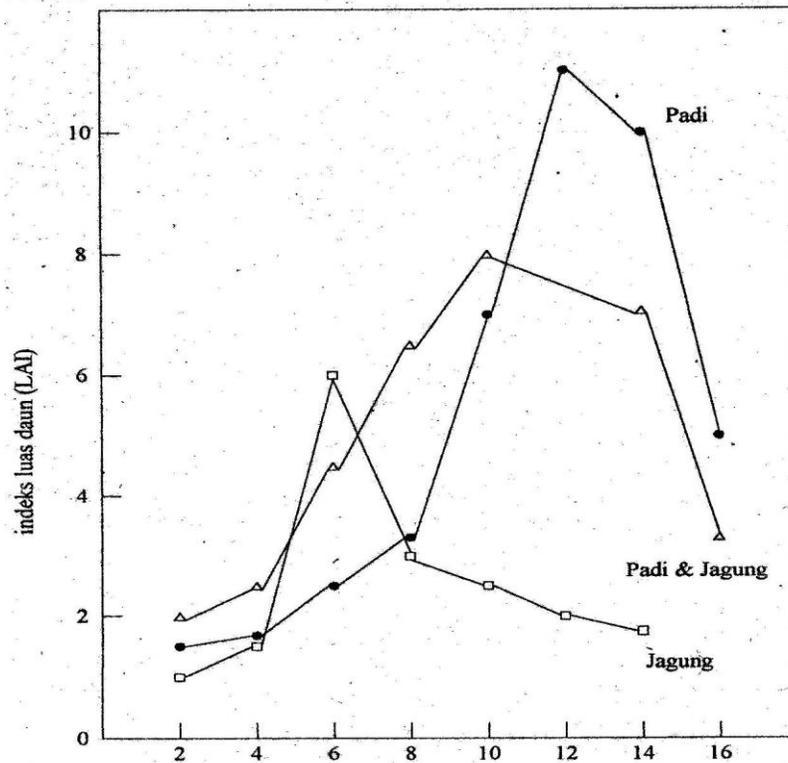
Gambar 7.13 Pengaruh Radiasi matahari pada Berbagai Tahap Pertumbuhan Terhadap Hasil Padi IR 747B2-6 (Yoshida and Parao dalam Yoshida, 1977)

Intensitas radiasi matahari sangat berkorelasi dengan laju fotosintesa tanaman (Hesketh dan Musgrave, 1962). Sedangkan menurut Powes dan Critchley, (1980), tanaman suka cahaya akan menunjukkan perbedaan karakteristik fotosintesa bila diberi intensitas radiasi matahari tinggi atau rendah. Energi radiasi yang kurang diterima tajuk menyebabkan laju asimilat netto menurun, sehingga asimilat yang dihasilkan berkurang.

Hann (1977) melaporkan bahwa intensitas cahaya rendah menghambat perkembangan umbi. Diduga terhambatnya perkembangan umbi (ubijalar) karena kurangnya asimilat yang ditranslokasikan ke umbi dan lambannya aktivitas kambium primer. Laju lignifikasi sel-sel stele tetap lambat dengan berkurangnya intensitas penyinaran. Akibatnya perkembangan umbi terhambat, umbi tetap muda dalam waktu lama. Sedangkan menurut Agata

(1982), intensitas cahaya berpengaruh nyata terhadap umbi pada periode setengah pertumbuhan vegetatif.

Upaya memanfaatkan potensi tanaman akan radiasi matahari dalam pola tanam campuran penting diperhatikan bentuk tajuk tanaman. Tanaman yang suka cahaya lebih diprioritaskan ditumpang sari dengan tanaman yang suka cahaya secara bebas dapat menangkap energi radiasi matahari. Sebaliknya tanaman yang bentuk tajuknya lebih rendah sebaiknya dipilih tanaman yang tidak senang intensitas radiasi matahari tinggi. Karena kalau sedikit terlindung oleh tanaman yang suka cahaya pertumbuhannya tidak terganggu. Gambar 37, menunjukkan pengaruh tumpang sari terhadap pertumbuhan tanaman.



Gambar 7.14 Total Indeks Luas Daun dari Tanaman Campuran Antara Jagung dan Padi ( $\Delta$ ), sistem Pertanaman Monokultur dari Padi (o) dan Sistem Pertanaman Monokultur dari Jagung ( $\square$ ). Populasi Jagung sebanyak 60.000 Tanaman

Dari gambar 7.14 terlihat bahwa indeks daun tertinggi diperoleh setelah tujuh minggu setelah tanam untuk tanaman jagung. Sedangkan untuk padi indeks luas daun tertinggi dicapai setelah 12 minggu setelah ditanam. Apabila kedua tanaman ini digabung indeks luas daun tertinggi dicapai setelah 10 minggu sesudah tanam. Kondisi demikian penting bagi pertumbuhan jagung dan pemanfaatan lahan yang optimum. Jagung yang tergolong C, yang rakus cahaya dapat menaikkan indeks luas daunnya, tetapi padi walaupun indeks luas daunnya turun (Gambar 37) sebenarnya masih mungkin dinaikkan apabila jadwal tanaman diatur sedemikian rupa. Padi yang tergolong tanaman C, sebaiknya ditanam setelah jagung mulai menutupi lahan. Setelah tajuk jagung melebar padi masih berumur muda, yang relatif memerlukan intensitas cahaya lemah. Sewaktu padi memerlukan intensitas cahaya lebih besar, jagung sudah mulai masak, sehingga bentuk tajuknya mengecil dan memberikan kesempatan bagi padi untuk tumbuh sampai mencapai taraf generatif.

Produksi bahan kering tanaman merupakan resultante dari tiga proses, yaitu penumpukan asimilat melalui fotosintesa, penurunan asimilat akibat respirasi dan akumulasi ke bagian sink. Pada prinsip apabila laju fotosintesa besar, kegiatan respirasi kecil dan translokasi asimilat lancar ke bagian generatif, maka produksi akan naik. Laju fotosintesa maksimum tercapai pada saat LAI optimum. Selanjutnya produksi bahan kering tanaman menurun dengan meningkatkan LAI. Ada dua macam hal yang dapat meningkatkan berat kering tanaman, yaitu mempebesar LAI sampai optimum dan meningkatkan laju fotosintesa setiap satuan luas daun. Beberapa penelitian yang cermat menunjukkan bahwa sumbangan luas daun terhadap total produksi bahan kering dapat mencapai 70 persen. Sedangkan peningkatan laju fotosintesa menyumbangkan total produksi bahan kering sekitar 30 persen. Dari data di atas peningkatan indeks luas daun (LAI) jauh lebih berarti daripada peningkatan laju fotosintesa. Namun kedua faktor tersebut tidak dapat dipisahkan satu sama lainnya.

Hubungan antara luas dengan laju fotosintesa digambarkan oleh Ohno (1976) dalam bentuk persamaan regresi :

$$\bar{Y} = -302 + 4,36X_1 + 3,58X_2$$

Dimana:  $\bar{Y}$  = total produksi bahan kering (mg/tanaman)  
 $X_1$  = luas daun (cm<sup>2</sup>/tanaman)  
 $X_2$  = NAR (net assimilation rate) atau asimilasi netto  
(mg/dm<sup>2</sup>/hari)

Persamaan di atas hanya memperhitungkan produksi bahan kering tanaman setiap individu dan tidak dapat atau kurang akurat untuk menghitung produksi bahan kering tanaman di lapangan (populasi). Kelemahannya tidak memperhitungkan faktor saling menaungi (*mutual shading*) antara daun satu tanaman maupun antar tanaman.

Intersepsi (penangkapan) radiasi matahari dapat dimanipulasi dengan (1) varietas; morfologi dan arsitektur tanaman (tajuk = canopy), (2) kerapatan (jumlah produksi) tanaman setiap satuan luas lahan dengan pengaturan jarak tanam dan pola tanam.

Kedua metode di atas pada prinsipnya adalah untuk memperoleh LAI optimum. LAI optimum dapat dicapai dengan upaya kombinasi pengaturan jarak tanam dan varietas yang berdaun tegak. Apabila LAI optimum dicapai helaian daun yang terbawah biasanya dalam keadaan sedikit di atas titik kompensasi cahaya. Tetapi jika LAI di bawah optimum sebagian radiasi matahari terbuang percuma, laju fotosintesa netto berkurang, akibatnya hasil menurun.

Laju fotosintesa berbanding lurus dengan intensitas radiasi matahari (cahaya) sampai kira-kira 1.200 *foot-candles*. Di atas 1.200 *foot-candles* tanaman sudah jenuh cahaya sehingga tercapai titik kompensasi cahaya. Titik kompensasi cahaya diartikan sebagai titik dimana mulai intensitas cahaya tidak lagi dapat meningkatkan laju fotosintesa, karena tanaman telah jenuh cahaya. Apabila titik kompensasi cahaya dicapai menyebabkan karbondioksida yang diikat dalam fotosintesa sama besarnya dengan jumlah karbondioksida yang dilepas dalam proses respirasi. Tetapi pada LAI tinggi kejenuhan cahaya tidak akan tercapai walaupun intensitas cahaya melampaui 1.400 *foot-candles*.

Pada umumnya tanaman mempunyai LAI 2 sampai 6, tetapi nenas, tebu, padi dan padang rumput mempunyai LAI 9 sampai 12. LAI tinggi biasanya dapat dicapai pada tanaman yang morfologi daunnya tegak.

Pengaruh jarak tanaman terhadap hasil padi pada tiga varietas (IR 747 B2-6), (IR22), dan (IR8) dalam musim hujan dapat dilihat pada Tabel 7.3.

**Tabel 7.3 Pengaruh Jarak Tanam Padi pada Hasil Padi Tiga Varietas dalam Musim Hujan\***

Variety (line)	Spacing (cm)	Groth duration (days)	Grain yield (tonsi/ha)
IR747B2-6	5 x 5	95	5.62
	10 x 10	95	4.70
	20 x 20	95	4.15
IR22	5 x 5	114	4.92
	10 x 10	114	5.01
	20 x 20	114	4.57
IR8	5 x 5	124	5.32
	10 x 10	124	5.31
	20 x 20	124	5.14

\* International Rice Research Institute Annual Report for 1970

### 3) Kapasitas Sink dan Keseimbangan Antara Source dan Sink

Source (sumber) adalah jaringan yang mensuplai asimilat (fotosintat), organ tanaman yang aktif berfotosintesa itu adalah daun dan bagian tanaman yang berwarna hijau (yang mengandung *khlorophyl*). *Sink* adalah jaringan yang menampung atau menerima asimilat, tetapi tidak aktif berfotosintesa, misalnya buah, biji dan umbi.

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa agar fotosintesa berlangsung pada laju yang optimum, tanaman harus mempunyai suatu sink yang cukup untuk menampung hasil fotosintesa. Menurut Yahya (1982), laju fotosintesa menurun setelah pembuangan tongkol yang sedang tumbuh pada tanaman jagung. Sedangkan pada kentang laju fotosintesa menurun setelah pembuangan umbi yang sedang tumbuh dan aktivitas fotosintesa pada tanaman ubi jalar juga dibatasi oleh kapasitas sink.

Apabila terjadi stress air, suhu, cahaya atau hara mengakibatkan terganggunya keserasian hubungan antara *source* dan *sink*. Hal ini perlu dikaji karena menyangkut banyak sistem produksi tanaman selama siklus hidupnya.

Aktivitas *source* diperlukan selama siklus tanaman terutama pada fase vegetatif. Tetapi aktivitas sink hanya penting bila tanaman sedang dalam fase pembentukan organ-organ yang menghasilkan bunga, buah (generatif) dan penting pada pertumbuhan vegetatif. Beberapa penyebab berkurangnya perkembangan organ yang merupakan sink adalah (1) tidak sempurnanya penyerbukan, yang mungkin disebabkan oleh faktor lingkungan ataupun faktor genetik; (2) stress air, suhu, cahaya atau hara terjadi sewaktu pembentukan organ sebelum penyerbukan; (3) rendahnya populasi tanaman setiap satuan luas; (4) keracunan unsur hara/mineral yang menyebabkan reduksi atau organ tanaman (*nutrition-included organ reduction*).

Oleh karena organ-organ yang menghasilkan mempunyai batasan-batasan genetik dalam hal ukuran maksimumnya, jadi tidaklah mungkin laju pertumbuhan organ tersebut banyak dapat ditingkatkan dengan meningkatkan secara berlebihan tersedianya *source*. Hal ini disebabkan rendahnya jumlah *sink*, misalnya jumlah tongkol per tanaman dan ukuran tongkol pada tanaman jagung.

Pertumbuhan dari organ penyimpanan (*storage*) dipengaruhi oleh faktor lingkungan dan faktor genetik. Faktor-faktor ini secara langsung juga mempengaruhi lajunya fotosintesa. Pengaruh faktor-faktor pembatas di atas bekerja melalui perubahan-perubahan pada penggunaan hasil fotosintesa dan kemudian status hara pada tanaman yang akhirnya menentukan laju fotosintesa. Sebagai contoh, kekurangan hara nitrogen akan mempengaruhi kandungan *chlorophyll* pada daun dan mengurangi pertumbuhan vegetatif, mengurangi aktivitas *sink* yang pada gilirannya mempengaruhi laju fotosintesa per satuan luas daun. Berkurangnya laju fotosintesa karena kekurangan unsur hara nitrogen terutama disebabkan berkurangnya luas daun sehingga mengurangi pula fotosintesa setiap satuan luas.

Kapasitas tanaman untuk menghasilkan organ-organ tanaman yang baru, misalnya daun (*source*) yang dapat berfotosintesa akan mempengaruhi fotosintesa total dan produktivitas tanaman. Sifat ini lebih penting dari sifat-sifat tanaman lainnya. Oleh karena itu laju pembentukan daun baru dan lamanya berbagai fase perkembangan tanaman merupakan indikator penting untuk menentukan produktivitas.

Keserasian hubungan antara fase pertumbuhan vegetatif dan fase penyimpanan (generatif, *storage*) dari perkembangan tanaman karena adanya perubahan lingkungan tumbuh, lama penyinaran, suhu, air dan sebagainya

selama musim tumbuh adalah penting untuk memperoleh hasil-hasil maksimum. Kalau dianalisa faktor-faktor yang mempengaruhi keserasian hubungan antara fase pertumbuhan vegetatif dan fase generatif di atas sama pentingnya dengan faktor-faktor yang mempengaruhi fotosintesa.

#### 4) Sistem Teknologi Budidaya

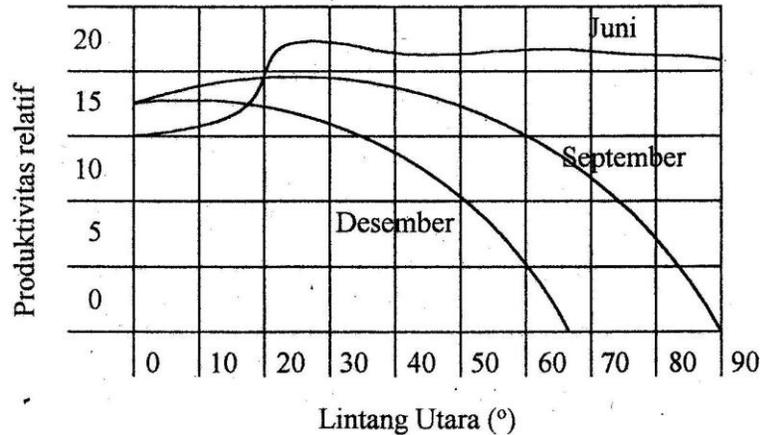
Lama dan lanjutnya perkembangan tanaman akan dipengaruhi oleh fluktuasi iklim. Suhu yang rendah pada permulaan fase vegetatif akan menyebabkan panjangnya fase vegetatif tersebut, sehingga kesempatan tanaman untuk mempertinggi batang dan pertambahan jumlah dan luas daun semakin besar. Tetapi bila suhu tinggi pada permulaan fase vegetatif akan menyebabkan tanaman pendek dan luas daun sempit. Hal ini akan mempengaruhi perkembangan *sink*. Demikian pula halnya dengan lama penyinaran, hari panjang pada permulaan fase vegetatif akan meningkatkan asimilat yang akan dipergunakan untuk pembentukan organ-organ baru, diantaranya adalah organ penyimpanan (*storage*).

Daerah yang musimnya relatif nyata antara musim semi, panas, dingin dan gugur, penjadwalan tanam merupakan bagian penting dari teknologi budidaya. Hal inilah yang membedakan produktivitas di daerah subtropik dengan daerah tropik.

Di daerah subtropik, bertanam dijadwalkan pada musim semi dan diperkirakan panen tercapai pada awal musim gugur. Perubahan suhu secara perlahan-lahan, rendah pada awal pertumbuhan, memberikan kesempatan fase vegetatif lebih panjang. Suhu tinggi tercapai pada fase generatif yang memang keadaan ini sangat dibutuhkan tanaman, karena dalam siklus perkembangan tanaman suhu tinggi diperlukan pada waktu berbunga dan pembuahan sampai permulaan pengisian biji. Suhu tinggi pada saat pembuangan dan pembuahan akan meningkat persentase biji yang diserbuki dan biji bernas. Pada saat ini pula suhu turun secara perlahan-lahan, karena musim panas segera berakhir akan memasuki musim dingin. Setelah tercapai berat kering maksimum (*maximum dry weight*), suhu rendah sangat menguntungkan, karena respirasi kecil.

Bagaimana dengan cahaya? Perubahan cahaya sejalan dengan perubahan suhu. Intensitas cahaya rendah pada awal fase vegetatif, yang menyebabkan besarnya luas daun. Musim datang bersamaan dengan fase pembuangan dan pembuahan. Pada waktu yang sama di daerah subtropik

terjadi hari panjang. Hari panjang berarti waktu untuk berfotosintesa lebih lama akibatnya asimilat untuk pembentukan organ baru dan *sink* lebih banyak. Intensitas cahaya menurun selama fase pemasakan. Kondisi ini menguntungkan, karena fotorespirasi rendah dan fotosintesa netto tinggi. Keadaan ini tercapai menjelang musim panas berakhir dan akan menuju musim dingin. Musim dingin datang tanaman sudah siap untuk dipanen, kondisi iklim musim dingin baik untuk biji yang telah masak, karena menurunkan kegiatan respirasi. Hari panjang (lama penyinaran) inilah yang tidak pernah ada di daerah tropik, tetapi suhu rendah dapat ditemukan di pegunungan daerah tropik.

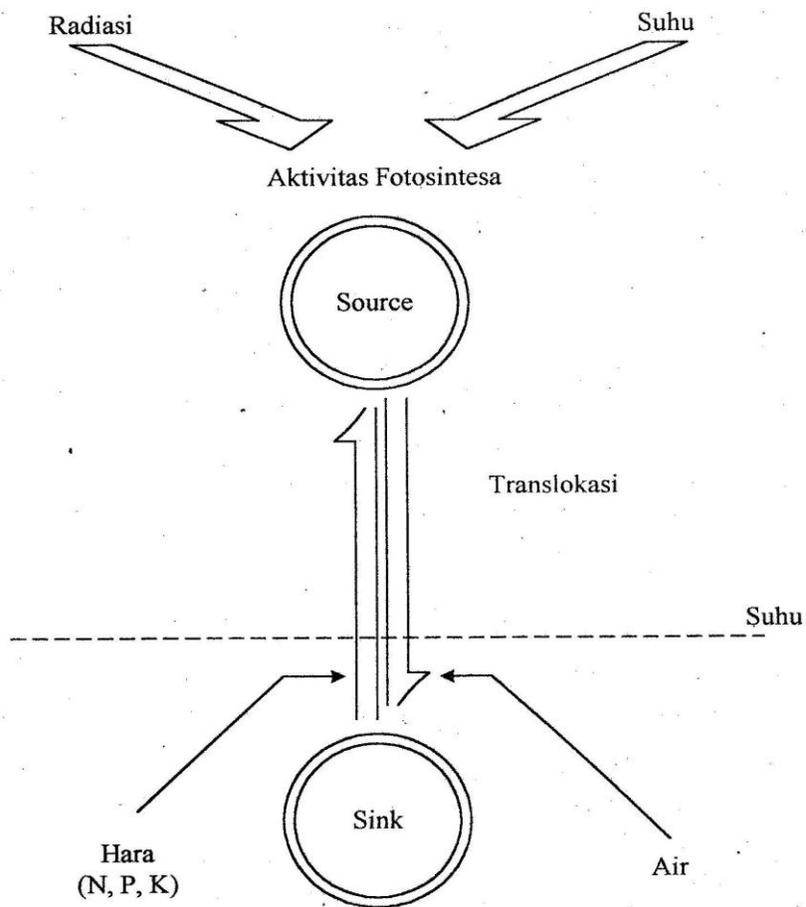


Gambar 7.15 Aktivitas fotosintesa sebagai fungsi dari letak lintang untuk tiga musim dalam setahun (J. Ryther, Geographical variation in productivity dalam The Seas, vol. II, Editor M.N Hill Wiley)

Dilihat pada Gambar 7.15. Pada bulan Juni lama penyinaran dibelahan bumi utara adalah besar. Hal ini memberikan dampak terhadap fotosintesa, yaitu tingginya produktivitas. Tetapi pada bulan September lama penyinaran dan intensitas matahari semakin berkurang, sehingga fotosintesa berkurang sesuai dengan berkurangnya lama penyinaran dan intensitas cahaya, karena pada waktu itu matahari berada di kawasan katulistiwa. Sedangkan pada bulan

Desember merupakan aktivitas fotosintesa yang paling minimum, karena matahari berada sekitar garis  $23\frac{1}{2}^{\circ}$  lintang selatan.

Dari uraian di atas dapatlah diketahui bahwa fluktuasi faktor-faktor iklim akan mempengaruhi kapasitas *source* dan *sink* tanaman. Faktor-faktor iklim yang dimaksud adalah suhu, lama dan intensitas cahaya, dan air. Hubungan antara faktor-faktor lingkungan tanaman yang mempengaruhi produksi bahan kering dapat dilihat pada Gambar 7.16



Gambar 7.16 Hubungan antara faktor-faktor lingkungan terpenting yang mempengaruhi produksi bahan kering (Hahn, 1977)

### 3. Fotoperiodisma

#### a. Posisi bumi dalam Hubungannya dengan Musim

Rotasi dan revolusi bumi dari hari ke hari dan dari tahun ke tahun akan memberikan pengaruh yang beragam terhadap pertumbuhan tanaman. Lamanya periode siang dan malam diberbagai tempat di bumi ditentukan oleh posisi bumi terhadap matahari.

Tanggal 21 Maret sampai dengan tanggal 21 Juni, kutub utara seakan-akan makin condong ke arah matahari. Sebaliknya kutub selatan seakan-akan makin menjauhi matahari. Selama waktu itu belahan bumi utara mengalami musim *semi* dan belahan bumi selatan mengalami musim gugur. Pada tanggal 21 Juni matahari berada tepat pada  $23\frac{1}{2}^{\circ}$  lintang utara.

Dari tanggal 21 Maret sampai 21 Juni belahan bumi utara menerima panjang siang semakin panjang (lebih dari 12 jam). Dari tanggal 21 Juni sampai dengan tanggal 23 September, kecondongan kutub utara kearah matahari makin berkurang, dan kecondongan kutub selatan makin bertambah. Selama waktu itu belahan bumi utara mengalami musim panas dan belahan bumi selatan mengalami musim dingin. Pada tanggal 23 September matahari tepat berada pada equator (katulistiwa).

Dari tanggal 21 Maret sampai dengan 23 September siang lebih panjang daripada malam di belahan bumi utara, dan siang lebih pendek di belahan bumi selatan.

Dari tanggal 23 September sampai dengan tanggal 22 Desember kutub selatan seakan-akan makin menjauhi matahari. Selama waktu itu belahan bumi selatan mengalami musim semi, dan belahan bumi utara mengalami musim gugur. Dari tanggal 23 September sampai tanggal 22 Desember di belahan bumi selatan menerima panjang siang semakin panjang (lebih dari 12 jam) dari malamnya. Sedangkan di belahan bumi utara menerima siang yang semakin pendek dari malamnya. Tepat pada tanggal 22 Desember matahari berada pada  $23\frac{1}{2}^{\circ}$  lintang selatan.

Dari tanggal 22 Desember sampai dengan tanggal 21 Maret, kecondongan kutub selatan ke arah matahari makin berkurang. Sedangkan kecondongan kutub utara makin bertambah. Selama waktu itu belahan bumi selatan mengalami musim panas dan belahan bumi utara mengalami musim dingin. Dari tanggal 22 Desember sampai tanggal 21 Maret, panjang siang di belahan bumi selatan semakin berkurang, tetapi masih panjang dari 12 jam. Demikian pula sebaliknya di belahan bumi utara panjang siang semakin

panjang, tetapi masih kurang 12 jam. Tepat pada tanggal 21 Maret, lama siang di belahan bumi selatan maupun belahan bumi utara adalah sama, yakni 12 jam. Dengan demikian dari tanggal 23 September sampai dengan tanggal 21 Maret siang lebih panjang dari malamnya di belahan bumi selatan dan siang lebih pendek di belahan bumi utara. Pada tanggal 21 Maret matahari kembali berada di garis khatulistiwa dan demikian seterusnya kembali seperti semula.

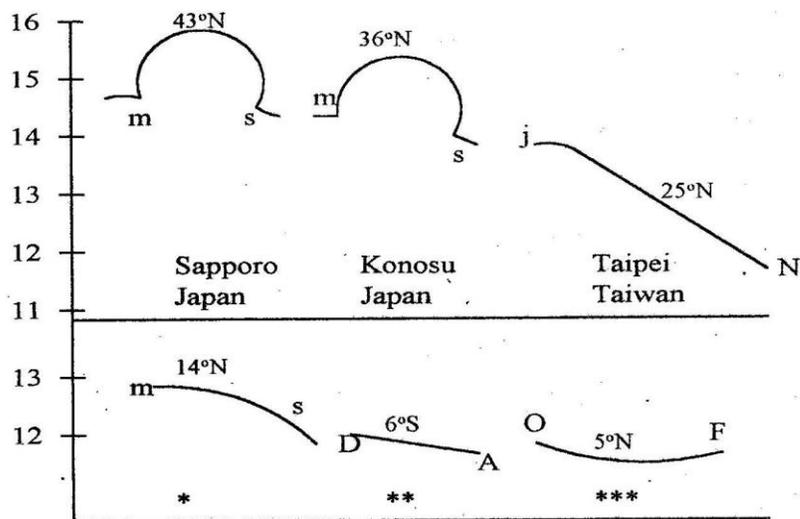
Di daerah tropik kejadian seperti di atas tidak pernah terjadi. Panjang hari yang berkisar antara 11 jam, 53 menit dan 12 jam, 07 menit (equator = 0°).

Perbedaan panjang siang dan malam berhubungan erat dengan latitude. Makin jauh letak dari equator, makin besar pula perbedaan siang dan malam dalam bulan tertentu. Dari tabel 7.4 dapat dilihat bahwa tempat yang terletak pada garis lintang (latitude) 50° LU dalam musim dingin (*winter*) pada tanggal 22 Desember akan mendapatkan siang yang pendek, yaitu 8 jam, 05 menit dan malamnya selama 15 jam, 55 menit. Sedangkan tanggal 21 Juni dalam musim panas (*summer*) pada tempat yang sama akan memperoleh lama siang 16 jam, 22 menit dan malamnya selama 7 jam 38 menit.

Tabel 7.4 Panjang siang dan malam di berbagai tempat (dalam jam, menit)

Tempat-tempat pada derajat garis Lintang Utara	Tanggl 22 Desember ( <i>winter</i> )		Tanggl 21 Juni ( <i>summer</i> )	
	Lamanya siang	Lamanya malam	Lamanya siang	Lamanya malam
0°(equator)	12 j. 07 m	11 j. 53 m	12 j. 07 m	11 j. 53 m
10° LU	11.33	12.27	12.43	11.17
20° LU	10.55	13.05	13.21	10.39
30° LU	10.13	13.47	14.05	9.55
40° LU	9.20	14.40	15.01	8.59
50° LU	8.05	15.55	16.22	7.38
55° LU	7.13	16.47	17.23	6.37
60° LU	5.52	18.08	18.52	5.08

Dari tabel 7.4, diketahui bahwa pada tempat yang sama misalnya pada latitude 60° LU, hari yang terpanjang adalah pada musim panas dan hari yang terpendek adalah musim dingin. Untuk lebih jelasnya lihat Gambar 7.17



Gambar 7.17 Pola Panjang hari selama musim tanam di Bogor dan di beberapa tempat di negara pada letak yang berbeda (Moomav dan Vegara, 1964 dalam Williams, 1964

\* Los Banos, Filipina    \*\* Bogor, Indonesia    \*\*\* Bk. Merah, Malaysia

Lamanya periode penyinaran matahari (fotoperiode) dapat mempengaruhi terhadap laamnya fase-fase suatu perkembangan tanaman dengan bahan genetik tertentu. Fase-fase perkembangan tanaman yang dapat dipengaruhi oleh fotoperiode diantaranya perkecambahan, vegetatif dan fase berbunga (reproduktif).

Selain faktor lamanya penyinaran untuk mengantarkan ke fase pembungaan adalah faktor hormon, unsur hara, air dan vernalisasi. Vernalisasi merupakan pengaruh suhu rendah yang menstimulir pertumbuhan tanaman agar tanaman sampai pada fase pembungaan. Lama penyinaran yang diterima tanaman memberikan tanggapan tertentu. Terhadap kegiatan fisiologis.

Tanggapan ini disebut dengan fotoperiodisma. Fotoperiodisma adalah respon tanaman terhadap lama terang dan lama gelap relatif (panjang hari relatif).

Berdasarkan respon tanaman terhadap fotoperiode, Wilsie (1962) dan Daubenmire (1959) membagi tanaman atas tiga golongan:

- \* Tanaman berhari pendek
- \* Tanaman berhari panjang
- \* Tanaman berhari netral

#### **b. Tanaman berhari pendek**

Tanaman berhari pendek adalah tanaman yang hanya dapat berbunga bila panjang hari kurang dari nilai kritis (panjang hari maksimum). Panjang hari maksimum berkisar antara 12 jam sampai 14 jam (Daubenmire, 1959).

Tanaman yang berhari pendek akan mengalami pertumbuhan vegetatif terus menerus apabila panjang hari melewati nilai kritis, dan akan berbunga dihari pendek di akhir musim panas dan musim gugur. Tetapi tanaman berhari pendek tidak berbunga dihari pendek di awal musim panas. Hal ini disebabkan karena suhu tidak cukup hangat untuk melanjutkan pertumbuhan ke fase reproduktif. Disamping itu pertumbuhan vegetatif yang tersedia pada saat itu belum mencukupi untuk menghantarkan tanaman ke pembungaan, di samping banyak sistem (hormon, enzim dan lain-lain) juga belum siap.

Di daerah beriklim sedang (*temperate*) tanaman dua tahunan (*biennials*) tidak akan berbunga sebelum tanaman tersebut melewati suatu periode suhu rendah alam siklus perkembangannya. Memang sifat-sifat yang telah disebutkan di atas berbeda untuk setiap spesies tanaman. Tanaman-tanaman yang tergolong berhari pendek adalah padi, kedele, tebu, kopi dan sayur-sayuran lain. Tanaman ini banyak diusahakan di kawasan tropik dan pada umumnya tidak peka terhadap fotoperiode dan akan berbunga pada panjang hari 11 jam sampai 12 jam.

Tanaman yang tidak peka terhadap fotoperiode yang tergolong berhari pendek, biasanya mempunyai sifat fisiologis yang menonjol daripada sifat yang ditimbulkan oleh pengaruh lingkungan. Misalnya pembungaan dan pematangan akan lebih dipengaruhi oleh ketersediaan asimilat, dan sistem hormon dalam tubuhnya. Tanaman yang peka terhadap fotoperiode, pembungaan dan pembentukan buahnya sangat ditentukan oleh panjang hari, dan sedikit saja dipengaruhi oleh ketersediaan asimilat dan hormon. Dengan

perbedaan panjang hari sebesar 15 menit saja sudah berarti bagi terbentuknya bunga.

**c. Tanaman berhari panjang**

Tanaman berhari panjang adalah tanaman yang menunjukkan respon berbunga lebih cepat bila panjang hari lebih panjang dari panjang hari minimum (kritis) tertentu, atau disebut juga tanaman yang bermalam pendek. Tanaman yang berhari panjang yang berasal dari zone sedang (temperate) akan berbunga dalam bulan Mei, Juni dan Juli apabila panjang siang selama 15 jam. Sebagai contoh tanaman berhari panjang adalah Spinasi (*Spinacia oleraceae* L) Barley (*Hordeum spp*), Rey (*Secale cereale*), Bit gula (*Beta vulgaris*), Alfalfa dan lain-lain. Tarwe winter (*Triticum aestivum*) yang tergolong tanaman berhari panjang menghendaki lama penyinaran lebih dari 14 jam sehari dan untuk berkecambah memerlukan suhu rendah. Sedangkan pertumbuhan selanjutnya sampai berbunga dan berbuah menghendaki suhu yang lebih tinggi dan hari-hari panjang. Bila syarat-syarat yang dikehendakinya tidak terpenuhi, maka Tarwe Winter tidak dapat menghasilkan bunga dan buah. Kombinasi suhu dan panjang hari yang mengontrol pertumbuhan vegetatif dan generatif pada beberapa jenis tanaman hari panjang sebenarnya dapat diciptakan dengan perlakuan-perlakuan terhadap tanaman. Misalnya penyinaran singkat di malam hari untuk memperpendek periode gelap. Percobaan-percobaan seperti ini dapat mempengaruhi pembungaan, khususnya pada tanaman yang menghendaki panjang siang lebih dari 15 jam. Perlakuan vernalisasi pada biji tarwe winter yang akan berkecambah akan menyebabkan proses yang menginduksi kecambah ke arah pertumbuhan menuju pembentukan primordia bunga. Karena biji tarwe winter pada saat berkecambah juga memerlukan fase gelap yang lebih panjang (hari pendek), maka selain vernalisasi, untuk mengantarkan tanaman ini ke tahap pembungaan juga diperlukan perlakuan gelap buatan. Sedangkan hari panjang dan suhu tinggi yang diharapkan untuk pertumbuhan vegetatif dapat dibuat dengan penyinaran singkat pada malam hari dengan lampu listrik yang berkapasitas 50 watt setiap meter bukur sangkar selang 5 jam.

**d. Tanaman berhari netral**

Tanaman berhari netral (intermediate) adalah tanaman yang berbunga tidak dipengaruhi oleh panjang hari. Tanaman intermediate dalam zone

sedang bisa berbunga dalam beberapa bulan. Tetapi tanaman yang tumbuh di daerah tropik yang mengalami 12 jam siang dan 12 jam malam dapat berbunga terus menerus sepanjang tahun. Oleh karena itu tanaman yang tumbuh di daerah tropik pada umumnya adalah tanaman intermediate.

Yang tergolong tanaman yang intermediate adalah kapas (*Gossypium hirsutum*), tembakau (*Nicotiana tobaccum*), bunga matahari (*Heliantus annus*), dan sebagainya.

Tanaman intermediate memerlukan pertumbuhan vegetatif tertentu sebagai tahap untuk menuju tahap pembungaan tanpa dipengaruhi oleh fotoperiode.