

RADIASI DALAM SISTEM AGROFORESTRI

S.M. Sitompul

TUJUAN

- Membahas sifat radiasi matahari sebagai sumber energi untuk pertumbuhan tanaman dan sebagai faktor utama yang mengendalikan tingkah-laku sistem tanaman yang dipertimbangkan dalam model tanaman
- Membahas tingkat radiasi yang tersedia pada tanaman khususnya tanaman sela semusim berdasarkan faktor yang mengendalikannya dalam sistem agroforestri

1. Pendahuluan

Produksi biomasa tanaman termasuk bagian yang bernilai ekonomis (bagian yang dipanen) tersusun sebagian besar dari hasil fotosintesis. Sementara radiasi matahari, sebagai sumber utama cahaya bagi tanaman, menjadi salah satu syarat utama kelangsungan proses fotosintesis. Pengaruh dari radiasi matahari pada pertumbuhan tanaman dapat dilihat sangat jelas pada tanaman yang tumbuh dibawah naungan. Pertumbuhan tanaman di bawah naungan semakin terhambat bila tingkat naungan semakin tinggi. Apabila semua faktor pertumbuhan tidak terbatas, tingkat pertumbuhan tanaman atau produksi biomasa tanaman pada akhirnya akan dibatasi oleh tingkat energi radiasi matahari yang tersedia.

Dalam sistem agroforestri, keberadaan tanaman pelindung dari jenis tanaman tahunan (pohon) akan mengurangi tingkat radiasi yang diterima oleh tanaman sela khususnya dari jenis tanaman setahun (semusim) seperti tanaman pangan yang tumbuh diantara tanaman pelindung (Gambar 1 A dan B). Pada sistem pertanaman (budidaya) (*hedgerow-intercropping systems*), pengaruh tanaman pagar pohon seperti *Gliricidia* sangat jelas tampak pada sebaran pertumbuhan tanaman padi gogo dan jagung, semakin dekat letak tanaman sela dengan tanaman pagar pertumbuhannya semakin terhambat. Hal ini dapat dikaitkan sebagian dengan adanya kompetisi cahaya disamping kompetisi akan air dan unsur hara walaupun usaha pemangkasan pohon telah dilakukan untuk mengurangi naungan pohon dan menyediakan bahan organik (Gambar 2 A dan B). Keadaan ini berhubungan dengan habitus tanaman pelindung yang tinggi disertai dengan tajuknya yang lebat yang menghalangi pancaran radiasi yang jatuh pada tanaman sela yang tumbuh di sekitarnya. Semakin tinggi habitus tanaman pelindung dan semakin lebat (padat dan besar/lebar) tajuknya, semakin sedikit radiasi yang dapat berpenetrasi pada permukaan tanaman sela. Tingkat penetrasi radiasi dapat dimaksimumkan dengan pengelolaan tanaman yang tepat yang meliputi pengaturan jarak tanam, ukuran kepadatan tanaman, dan manipulasi pertumbuhan tanaman seperti pemangkasan tajuk.



Gambar 1. Pengaruh pohon jati (*Tectona grandis*) dalam penyediaan energi cahaya pada tanaman sela padi gogo (A) dan jagung (B) dalam sistem agroforestri di Lodooyo, Blitar (Foto: SM Sitompul).



Gambar 2. Pengaruh tanaman pagar (*Gliricidia sepium*) dalam penyediaan energi cahaya pada tanaman sela padi gogo (A) dan jagung (B) dalam sistem budidaya pagar (*Hedgerow-intercropping system*) (Foto: SM Sitompul).

2. Konsep Dasar Radiasi

2.1 Emisi Radiasi

Bagaimana radiasi timbul mungkin perlu disimak untuk melengkapi pemahaman akan radiasi dan sistem agroforestri. Ini didasarkan atas pemikiran bahwa suatu ketika pertanyaan mengenai hal itu bisa saja timbul. Pada dasarnya, setiap benda diatas temperatur nol absolut memancarkan energi dalam bentuk radiasi akibat perubahan kedudukan elektron yang mengorbit dalam atom atau molekul yang menyusun benda tersebut. Tingkat radiasi yang dipancarkan tergantung pada suhu benda tersebut. Persamaan Stefan-Boltzmann dapat digunakan untuk menaksir tingkat pancaran radiasi sebagai suatu fungsi dari suhu seperti berikut.

$$R = \epsilon \sigma T^4 \quad (1)$$

dimana R = pancaran (flux) radiasi ($\text{W.m}^{-2} = \text{J.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$), ϵ = konstanta emissivitas ($0 \leq \epsilon \leq 1$), σ = konstanta Stefan-Boltzmann ($5,67032 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$) dan T = suhu absolut ($273 + ^\circ\text{C}$). Konstanta ϵ menggambarkan kapasitas suatu benda mengabsorpsi dan memancarkan radiasi misalnya daun mempunyai nilai $\epsilon = 0,95$.

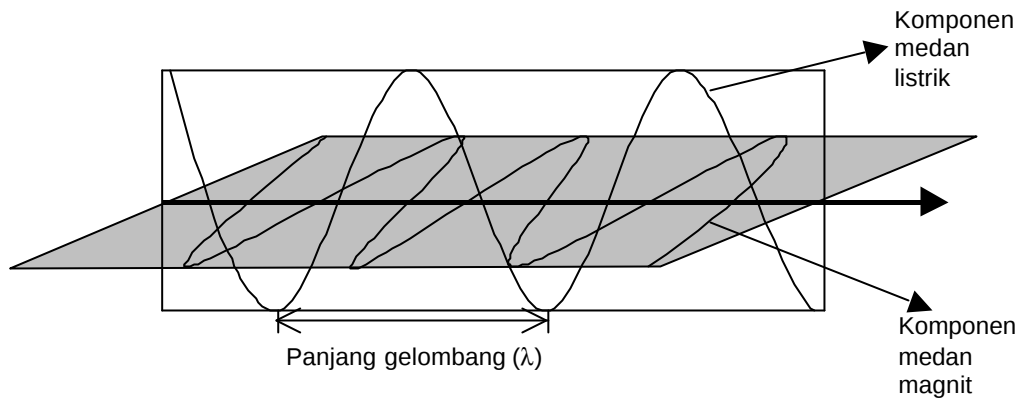
Pada kondisi alami, sumber energi untuk pertumbuhan tanaman adalah matahari yang memancarkan radiasi yang sangat besar akibat suhunya yang sangat tinggi. Bagian terpanas dari matahari, sebagai hasil dari reaksi nuklir (fisi dan fusi), adalah intinya dengan suhu sekitar $19.450.000^{\circ}\text{C}$. Permukaan matahari (photosphere) yang memancarkan panas dan radiasi mempunyai suhu 5500°C . Jika matahari dianggap berkelakuan sebagai suatu benda hitam sempurna dalam mengabsorpsi dan memancarkan radiasi ($\epsilon = 1$), tingkat radiasi yang dipancarkan adalah $5,67032 \times 10^{-8} \times (5500 + 273)^4 = 62,98 \text{ MW.m}^{-2} = 62,98 \text{ MJ m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. Tetapi hanya sebagian kecil dari radiasi yang dipancarkan matahari yang sampai pada permukaan bumi. Apabila bumi berada pada jarak rata-rata dari matahari, pancaran (flux) radiasi yang jatuh secara tegak lurus pada suatu permukaan luar atmosfer bumi adalah $1,99 \pm 0,02 \text{ ly. min}^{-1}$ ($\text{ly} = \text{Langley}$) atau $1389,02 \pm 13,96 \text{ J.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ($1 \text{ ly. min}^{-1} = 1 \text{ cal.cm}^{-2} = 698 \text{ W.m}^{-2}$ atau $\text{J.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) yang disebut sebagai konstanta radiasi (Munn, 1966). Tingkat konstanta radiasi yang sering digunakan berkisar diantara $1353 - 1367 \text{ J.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (Munn, 1966; Driessen & Konijn, 1992; Goudriaan & Van Laar, 1994).

2.2 Teori Gelombang dan Kuantum

Pada mulanya radiasi dipandang sebagai pancaran gelombang listrik dan magnet yang membawa timbulnya teori gelombang atau teori gelombang elektromagnetik. Karena itu ciri gelombang (Gambar 3) dapat digunakan untuk menggambarkan energi radiasi yaitu panjang gelombang (λ), jarak diantara dua dasar atau puncak gelombang yang berdekatan, frekuensi (ν), dan kecepatan gelombang (c). Frekuensi adalah jumlah gelombang yang melintasi suatu titik per satuan waktu, dan kecepatan gelombang adalah jarak yang ditempuh per satuan waktu yang kemudian dikenal menjadi kecepatan cahaya. Karena kecepatan cahaya tetap ($2,997.10^8 \text{ m.s}^{-1}$), tingkat frekuensi suatu spektrum radiasi tergantung pada panjang gelombangnya seperti ditunjukkan persamaan berikut.

$$\nu = c / \lambda \quad (2)$$

Perkembangan studi radiasi selanjutnya menunjukkan bahwa teori gelombang tidak dapat menjelaskan berbagai fenomena radiasi seperti emisi radiasi dari benda padat sebagai suatu fungsi dari suhu yang diamati antara lain oleh Lummer dan Pringsheim pada tahun 1899. Teori kuantum kemudian dikembangkan oleh Newton dan Einstein yang mendefinisikan radiasi sebagai pancaran partikel yang disebut foton (photon). Pancaran partikel ini tidak terjadi secara terus-menerus, tapi dalam satuan deskriptor berupa bilangan integer dengan kandungan energi sebesar kuantum (quantum) per foton. Berbagai teka-teki sebelumnya mengenai radiasi kemudian dapat dijelaskan oleh teori kuantum seperti pengaruh cahaya terhadap emisi elektron dari suatu benda (photoelectric effect). Fenomena ini terjadi hanya pada panjang gelombang tertentu, λ_0 , (photoelectric-threshold wavelength). Betapapun tingginya intensitas cahaya, emisi elektron tidak akan terjadi bila panjang gelombang lebih besar dari λ_0 .



Gambar 3. Pancaran cahaya dalam bentuk gelombang elektromagnet yang terdiri dari osilasi medan listrik dan magnet yang tegak lurus satu sama lain dan pada arah pancaran cahaya

Karena energi yang terdapat dalam suatu foton sebanding dengan frekuensi, kuantitas dapat dibuat sebagai fungsi dari panjang gelombang. Kandungan energi (E) satu foton cahaya pada suatu panjang gelombang tertentu dapat ditaksir dengan persamaan berikut.

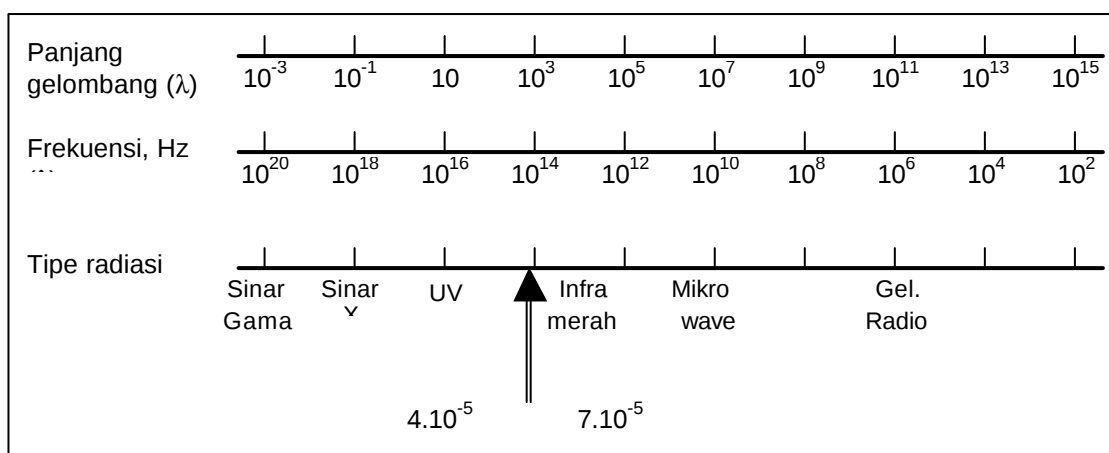
$$E = h\nu = hc/\lambda \quad (3)$$

dimana h = konstanta Planck ($6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s atau $6,63 \times 10^{-27}$ erg.s). Persamaan diatas menunjukkan bahwa tingkat energi yang dikandung oleh suatu spektrum radiasi akan semakin tinggi **bila** semakin pendek panjang gelombangnya. Karena itu, spektrum violet ($\lambda = 410$ nm) mempunyai energi yang lebih besar dari spektrum biru (460 nm), kuning (580 nm), oranye (620nm) dan merah (660 nm). Sebagai contoh, energi dari cahaya merah dengan $\lambda = 680$ nm ($680 \cdot 10^{-9}$ m) adalah

$$\begin{aligned} E &= hc/\lambda = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s} \times 2,998 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1} (1/680 \cdot 10^{-9} \text{ m}) \\ &= 2,92 \cdot 10^{-19} \text{ J} \end{aligned}$$

2.3 Cahaya dan PAR

Tanaman dalam proses fotosintesis tidak dapat memanfaatkan semua pancaran radiasi matahari yang sampai pada permukaan bumi, tetapi hanya radiasi yang terletak pada batas panjang gelombang 400 - 700 nm (Gambar 4). Bagian radiasi inilah yang disebut radiasi nampak (*visible radiation*) atau cahaya yang juga dikenal dengan istilah Radiasi Aktif Fotosintesis (PAR = *photosynthetically active radiation*). Penerapan istilah radiasi nampak didasarkan atas kemampuan mata manusia normal yang dapat mendeteksi radiasi pada batas gelombang tersebut dan paling jelas pada spektrum hijau ($\lambda = 520$ nm). Jadi tanaman hijau menyerupai mata manusia secara umum, tetapi cahaya yang paling efektif dimanfaatkan oleh tanaman hijau adalah biru dan merah yang berbeda dengan mata manusia.



Gambar 4. Karakteristik dari spektrum elektromagnetik

Radiasi dapat dinyatakan dengan beberapa satuan, dan penggunaan satuan tertentu tergantung pada tujuan. Untuk proses fotokimia dalam biologi yang membutuhkan radiasi sebagai sumber energi, bukan sebagai sumber penerangan, maka ketersediaan radiasi harus ditinjau dari ketersediaan energinya yaitu jumlah foton atau kuantanya yang merupakan satuan yang tidak mempunyai sifat fotometri. Sementara beberapa terminologi yang digunakan untuk menyatakan radiasi sebagai sumber energi diturunkan dari fotometri yang sering menimbulkan kerancuan. Fotometri berkenaan dengan pancaran (*flux*) cahaya dengan satuan “*foot-candle*” dan “*lumen*”, dan mata digunakan sebagai pembanding kerapatan pancar (*flux density*) cahaya. Mata memang baik dalam mendeteksi perbedaan-perbedaan pada permukaan yang berdekatan dalam keadaan terang, karenanya pengukuran dengan metode perbandingan umum diterapkan dalam fotometri. Akan tetapi mata mempunyai kemampuan yang bervariasi dalam menaksir tingkat keadaan terang.

Terminologi yang dapat digunakan untuk menyatakan radiasi sebagai sumber energi ditunjukkan pada Tabel 1. Suatu masalah utama dalam hal ini berkaitan dengan penggunaan satuan yang berbeda pada berbagai tulisan seperti “*foot candle*”, kalori, Watt dan Einstein yang menyulitkan untuk suatu pembandingan. Seseorang dapat membuat konversi dari suatu satuan ke satuan lain, dan hal ini dapat tidak tepat kalau informasi tidak tersedia mengenai komposisi spektrum dari radiasi yang diamati atau tanggapan alat pengukur yang digunakan kepada spektrum. Suatu taksiran konversi untuk beberapa satuan radiasi ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 1. Definisi terminologi dan satuan radiasi yang biasa digunakan

Terminologi	Definisi	Satuan
Radiasi	Energi yang ditransfer melalui ruang dalam bentuk gelombang elektromagnetik atau kuantum (ini tepatnya energi radiasi)	J (Joule)
Pancaran Radiasi	Jumlah energi radiasi yang diterima, diemisikan atau ditransmisi per satuan waktu	J det^{-1} atau W (watt)
Kerapatan Pancar Radiasi	Pancaran radiasi per satuan luas suatu permukaan yang berada tegak lurus terhadap sumber	$\text{J m}^{-2} \text{det}^{-1}$ atau W m^{-2}
Irradiasi	Kerapatan pancar radiasi yang jatuh pada suatu luasan permukaan	$\text{J m}^{-1} \text{det}^{-1}$ atau W m^{-2}
Emisi Radiasi	Pancaran radiasi yang diemisikan oleh suatu luasan permukaan	$\text{J m}^{-2} \text{det}^{-1}$ atau W m^{-2}
Intensitas Radiasi	Pancaran yang diradiasikan per satuan sudut tegak lurus dari suatu titik sumber	

Dikutip dari Woodward & Sheehy (1983)

Tabel 2. Konversi satuan radiasi yang banyak digunakan

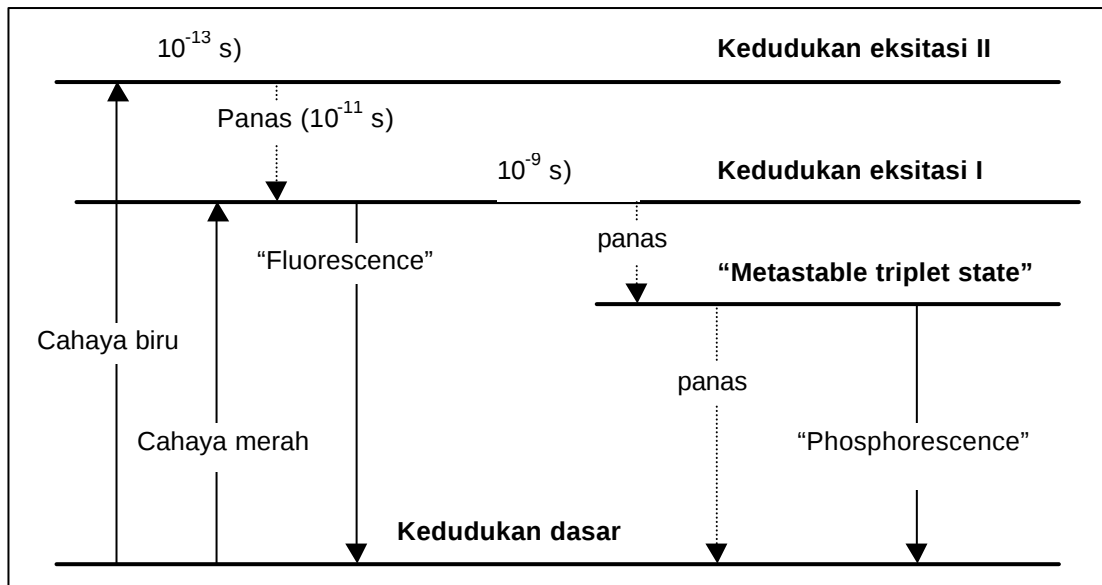
Satuan	Kisaran					
$\mu\text{E.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$	500	1000	1500	2000	2500	3000
W.m^{-2}	117,5	235,0	352,5	470,0	587,5	705,0
$\text{cal cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$	0,17	0,34	0,51	0,67	0,84	1,01
1 Einstein = 1 mol kuantas 1 foton = 1 kuantas cahaya atau radiasi $1\mu\text{E.m}^{-2}.\text{s}^{-1} = 0,235 \text{ W.m}^{-2}$ $1 \text{ cal.cm}^{-2}.\text{min}^{-1} = 1 \text{ langley} = 697,8 \text{ W.m}^{-2}$			$1 \text{ J.m}^{-2}.\text{s}^{-1} = 1 \text{ W.m}^{-2}$ Konversi berikut hanyalah suatu kira-kira $10.000 \text{ foot-candle} = 350 \text{ W.m}^{-2}$ $1 \text{ foot-candle} = 10,76 \text{ lux}$			

Dikutip dari Woodward & Sheehy (1983)

3. Energi Radiasi dan Pertumbuhan Tanaman

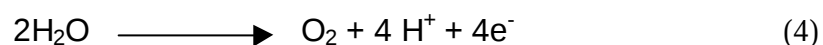
Salah satu fungsi utama dari cahaya pada pertumbuhan tanaman adalah untuk menggerakkan proses (mesin) fotosintesis dalam pembentukan karbohidrat. Proses ini sesungguhnya penting, tidak hanya untuk pertumbuhan tanaman itu sendiri, tetapi juga untuk kelangsungan hidup organisme yang tergantung pada bahan organik sebagai sumber bahan makanan atau energi. Fotosintesis merupakan proses alami satu-satunya yang diketahui dapat merubah bahan anorganik menjadi bahan organik. Kepentingan karbohidrat dalam pertumbuhan tanaman terlihat jelas dalam komposisi bahan kering total tanaman yang sebagian besar (85-90%) terdiri dari bahan (senyawa) karbon. Kegunaan karbohidrat dalam pertumbuhan tanaman tidak hanya sebagai bahan penyusun struktur tubuh tanaman, tetapi juga sebagai sumber energi metabolisme yaitu energi yang digunakan untuk mensintesis dan memelihara biomasa tanaman.

Pembentukan karbohidrat dalam proses fotosintesis terjadi dalam khloroplas yang umumnya terdapat dalam organ daun, dan berlangsung melalui dua rangkaian peristiwa yang umum dikenal dengan reaksi cahaya dan reaksi gelap. Energi cahaya yang diabsorpsi oleh sistem pigmen terutama khlorofil pada reaksi cahaya mengakibatkan eksitasi elektron (e^-) yaitu elektron terangkat dari kedudukan dasar ke kedudukan eksitasi I atau II pada sistem pigmen tersebut (Gambar 5). Pada keadaan ini, pigmen berada dalam keadaan reduksi. Elektron yang tereksitasi tidak kuat terikat pada atom atau molekul pigmen yang merupakan fungsi dari daya tarik inti. Sebagai konsekuensinya, elektron ini akan mudah ditransfer ke molekul lain di sekitarnya yang terdapat pada keadaan oksidatif. Cahaya biru mengakibatkan elektron tereksitasi ke kedudukan eksitasi II, sedang cahaya merah dengan energi yang lebih kecil hanya menghasilkan eksitasi elektron pada kedudukan eksitasi I. Tetapi energi cahaya biru yang diabsorpsi melalui eksitasi elektron tersebut kurang efektif untuk proses fotosintesis. Alasannya adalah bahwa energi ekstra dari foton biru tidak dapat dipergunakan dengan baik, karena ini biasanya hanya bertahan dalam waktu yang sangat singkat.

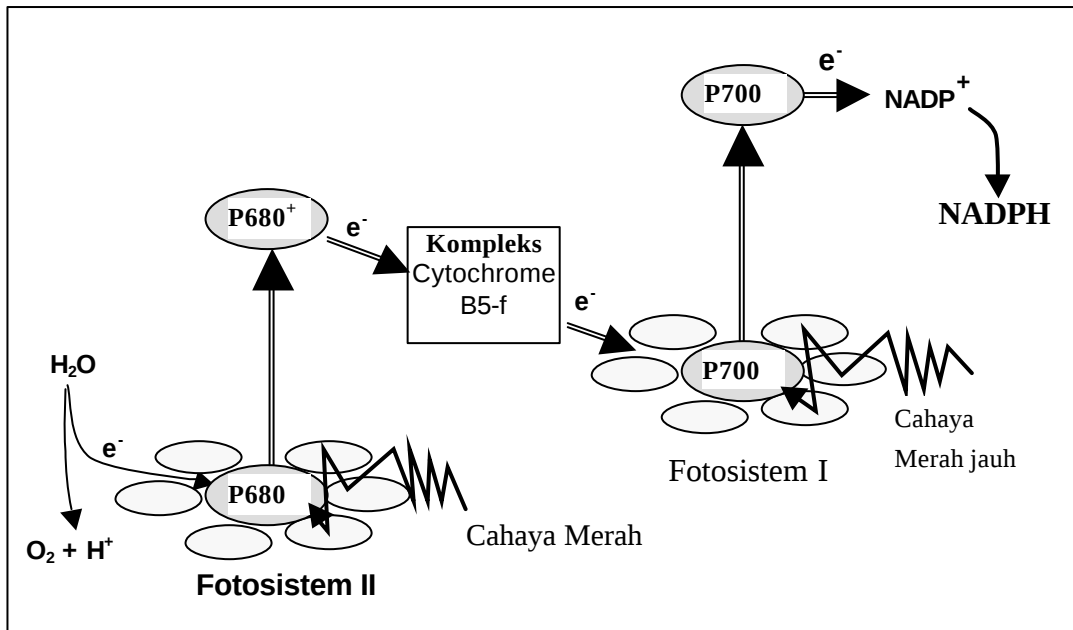


Gambar 5. Prinsip dasar pengaruh energi cahaya matahari terhadap eksitasi elektron

Ada dua fotosistem yang terlibat dalam reaksi cahaya yaitu fotosistem I dan II (PS-I & PS-II) dengan pusat reaksi masing-masing pada P680 dan P700 (Gambar 6). Elektron yang tereksitasi pada PS-II akan ditransfer ke PS-I dimana kemudian mengalami eksitasi dan selanjutnya ditransfer ke NADP^+ . Banyak molekul yang terlibat dalam rangkaian transfer elektron tersebut dari PS-II ke PS-I dan kemudian ke NADP^+ yang menghasilkan NADPH . Eksitasi satu elektron pada setiap fotosistem membutuhkan satu kuantum energi, sehingga transfer satu elektron secara lengkap membutuhkan dua kuantum energi. Elektron yang telah ditransfer dari fotosistem ke reduktan NADPH akan diganti oleh elektron yang berasal dari hasil fotolisis air. Peristiwa terakhir ini terjadi pada PS-II yang bersamaan dengan absorpsi energi cahaya dan dibantu oleh enzim yang mengandung Mn (Mangan) ion Cl^- (klor) dan Ca^{+2} (kalsium). Evolusi dari setiap satu mol O_2 dari hasil fotolisis (oksidasi) air secara lengkap akan menghasilkan empat mol elektron dan proton seperti ditunjukkan reaksi berikut.



Proton (H^+) yang terbentuk dari fotolisis air dan yang berasal dari stroma (bagian encer/cairan dari khloroplas) akan digunakan untuk membentuk ATP dalam stroma. Setiap dua proton yang dibebaskan dari air akan diikuti dengan transfer dua proton dari stroma, sehingga total proton yang tersedia untuk pembentukan ATP pada setiap fotolisis satu molekul air adalah empat proton. Stoikiometri proton yang digunakan untuk pembentukan ATP adalah $3\text{H}^+/\text{ATP}$. Jadi fotolisis satu mol air secara lengkap akan membutuhkan 8 mol kuantum cahaya (setara dengan $E = \text{einstein}$) dan menghasilkan empat mol NADPH dan $8/3 = 2,67$ mol ATP. Reduksi satu mol CO_2 yang membutuhkan 2 mol NADPH dan 3 mol ATP memerlukan minimal 9 mol kuantum ($9 \text{ mol } E \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} = 0,125 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2} \text{ atau } \text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$).



Gambar 6. Skema Z fotosintesis : PS-II mengabsorpsi cahaya merah yang menghasilkan oksidan kuat dan reduktan lemah, dan PS-I mengabsorpsi cahaya merah jauh (*far-red*) yang menghasilkan oksidan lemah dan reduktan kuat

4. Intersepsi Cahaya

4.1. Radiasi Datang

Kuantitas radiasi matahari yang diintersepsi tanaman tergantung pada kuantitas radiasi datang yaitu yang sampai pada permukaan tajuk tanaman (S_0), tingkat luas daun yang biasa dinyatakan dalam satuan indeks luas daun (ILD), kedudukan atau sudut daun dan distribusi daun dalam tajuk. Radiasi global matahari, secara kasar sekitar panjang gelombang 350-2000 nm, yang jatuh pada permukaan bumi merupakan produk dari radiasi yang sampai pada permukaan luar atmosfer yaitu konstanta surya ($SC = 1367 \text{ W.m}^{-2}$), dan tingkat transmisi atmosfer (τ_a , tau). Tingkat transmisi ini berhubungan dengan absorpsi dan penebaran radiasi matahari dalam atmosfer bumi oleh gas, embun, partikel (aerosol), asap, hama dan spora. Karena itu tingkat radiasi yang sampai ke permukaan bumi umumnya kurang dari setengah bagian dari yang sampai pada permukaan luar atmosfer dan dapat bervariasi dari waktu ke waktu. Tingkat S_0 dalam satu hari proporsional dengan sinus dari sudut tinggi matahari (β) dengan konstanta surya (1367 W.m^{-2}) yaitu:

$$SC = 1367 \cdot \sin\beta \quad (5)$$

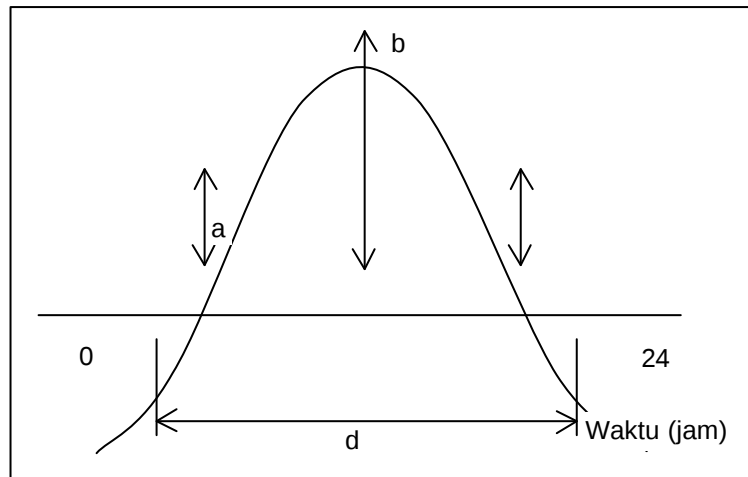
sehingga

$$S_0 = \tau_a SC = \tau_a (1367 \cdot \sin\beta) \quad (\text{W m}^{-2}) \quad (6)$$

Garis edar bumi mengelilingi matahari tidak berbentuk lingkaran bulat tapi lonjong dengan jarak maksimum dari matahari terjadi pada bulan Juli dan minimum pada bulan Januari. Fenomena ini mengurangi amplitudo suhu di belahan bumi utara, tapi meningkatkannya di belahan bumi selatan. Koreksi pengaruh ini terhadap radiasi global adalah:

$$S_0 = 1367 \cdot \tau_a \sin\beta \cdot (1 + 0.033 \cos(2\pi \cdot (td - 10)/365)) \quad (\text{W m}^{-2}) \quad (7)$$

dimana t_d adalah jumlah hari dihitung dari mulai 1 Januari (hari Julian, lawan dari hari Cardinal). Sebaliknya liku perkembangan dengan waktu dalam satu hari dari sinus tinggi matahari ($\sin\beta$) mengikuti pola sinusoidal (Gambar 7).



Gambar 7. Liku perkembangan $\sin(\beta)$ dengan waktu dalam satu hari

Suatu persamaan telah dikembangkan untuk menggambarkan liku perkembangan $\sin(\beta)$ tersebut yaitu

$$\sin\beta = A + B.\cos(2\pi.(th-12)/24) \quad [-] \quad (8)$$

dengan

$$A = \sin\lambda \sin\delta \quad B = \cos\lambda \cos\delta \quad [-] \quad (9)$$

$$\sin\delta = -\sin(\pi.23,45/180).\cos(2\pi.(td+10)/365) \quad [-] \quad (10)$$

$$\cos\delta = \sqrt{1 - \sin\delta.\sin\delta} \quad [-] \quad (11)$$

dimana,

t_h = waktu matahari (jam)

a = konstanta peralihan matahari yang tergantung musim dari segi ekuator

b = amplitudo sinus tinggi matahari yang tergantung musim

t_d = hari dari tahun (dihitung dari mulai 1 Januari)

λ = derajat lintang

δ = deklinasi matahari dipandang dari ekuator

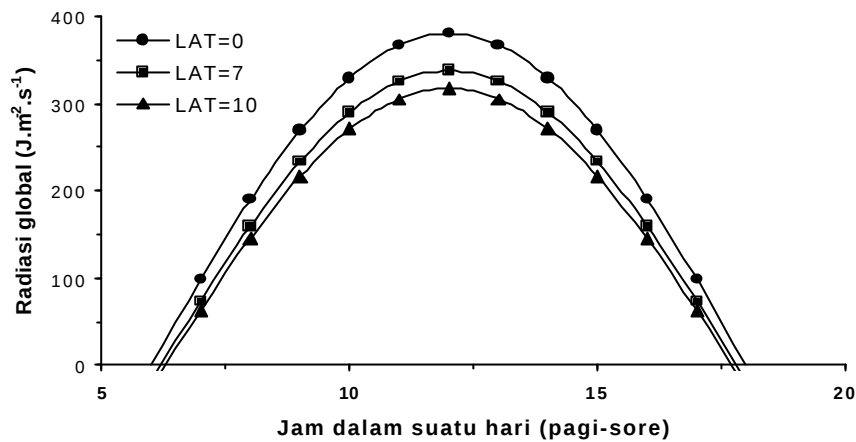
Angka 23,45 pada persamaan diatas mewakili lintang tropik yang ekuivalen dengan kemiringan sumbu bumi dipandang dari bidang dimana bumi bergerak mengelilingi matahari. Panjang hari (D) dalam jam berhubungan dengan faktor A dan B sebagaimana ditunjukkan persamaan berikut.

$$D = 12.[1+(2/\pi).asin(A/B)] \quad (\text{jam}) \quad (12)$$

Persamaan diatas juga diperlukan untuk menaksir proporsi radiasi yang tersedia akibat pengaruh lintang (FL) seperti berikut.

$$FL = A + 14.B.(1-(A/B)^2)^{0.5}/(D.\pi) \quad (-)$$

Sebagai contoh, taksiran radiasi yang sampai pada permukaan bumi di Malang (7° LS) dengan transmisi atmosfer 0,5 pada tanggal 1 Januari dibandingkan dengan daerah pada lintang 0° dan 10° LS ditunjukkan pada Gambar 8.

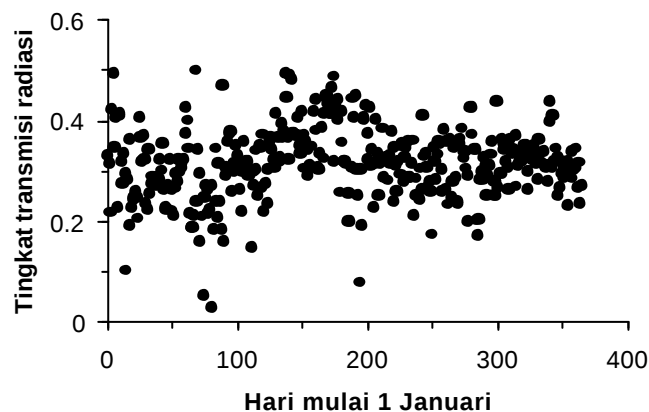


Gambar 8. Taksiran radiasi pada 0° , 7° LS (Malang) dan 10° LS (LAT =0, 7 & 10)

Untuk menghitung transmisi rata-rata radiasi total harian, integrasi sinus β diperlukan seperti berikut.

$$\int \sin \beta . \delta t = A . D + (24 . B / \pi) . \cos ((D / 12 - 1) \pi / 2) \quad (\text{jam}) \quad (13)$$

Pada bulan Juni, total harian SC (di luar atmosfer) sama dengan hasil integral ini yang dinyatakan dalam detik (8.8×3600), dikalikan dengan konstanta solar (1367 W.m^{-2}) dan dengan faktor eksentrik (bentuk lonjong) sebesar 0.97 untuk bulan Juni yang menghasilkan $42,0 \text{ MJ.m}^{-2}$. Jika total radiasi global harian pada bulan Juni diukur misalnya sebesar 20 MJ.m^{-2} , tingkat transmisi atmosfer harian pada hari tersebut adalah sebesar $20,0 / 42,0 = 0,476$. Berdasarkan persamaan diatas, taksiran tingkat transmisi di Malang (70° LS) pada tahun 1999 bervariasi sangat besar dari hari-ke hari ($0.03 - 0.5$) dan secara rata-rata adalah 0,31 (Gambar 9). Ini menegaskan bahwa kondisi atmosfer seperti embun di Malang berubah dari waktu ke waktu. Jika rata-rata transmisivitas atmosfer harian diketahui, tingkat radiasi yang sampai pada permukaan bumi pada setiap saat dapat dihitung secara mudah dengan menggunakan persamaan (7) dan (8).



Gambar 9. Taksiran tingkat transmisi radiasi di Malang pada tahun 1999

4.2 Radiasi Dalam Tajuk

Radiasi yang diabsorpsi dalam tajuk tanaman dapat ditaksir dari selisih radiasi yang sampai pada permukaan atas tajuk tanaman dengan radiasi yang lolos pada permukaan tanah dibawah tajuk. Apabila suatu tajuk tanaman dibagi kepada beberapa lapisan, tingkat radiasi yang ditransmisi dari setiap lapisan tergantung pada tingkat radiasi yang datang pada lapisan tersebut dan tingkat pemadaman lapisan tersebut seperti ditunjukkan persamaan berikut:

$$\frac{dI}{dL} = -kI \quad (14)$$

Integrasi persamaan ini akan menghasilkan

$$I = I_0 \cdot e^{-kL} \quad (15)$$

dan fraksi radiasi yang diabsorpsi adalah

$$F = 1 - e^{-kL} \quad (16)$$

dimana I = radiasi yang lolos dari suatu penampang horizontal, I_0 = radiasi yang datang pada permukaan tersebut, k = koefisien pemadaman dan L = luas daun yang sering dinyatakan dalam satuan Indeks Luas Daun (**ILD**). Harga k dapat diperoleh secara empiris melalui data pengamatan atau ditaksir dari sudut elevasi matahari dan sudut daun yang akan dibicarakan kemudian. Salah satu kelemahan dari persamaan diatas adalah bahwa tingkat absorpsi dari radiasi langsung dan yang ditransmisi tidak dibedakan, sedang kedua jenis radiasi tersebut berbeda dalam efisiensi fotosintesis.

Suatu analisis yang cukup rinci mengenai kuantitas cahaya yang diabsorpsi oleh suatu satuan luas daun dilakukan oleh Monteith (1965). Persamaan yang dikembangkan melibatkan perubahan dari kuantitas dan kualitas cahaya setelah melewati lapisan tajuk. Dalam analisis tersebut, tajuk dibagi menjadi lapisan-lapisan daun dengan luas suatu lapisan sama dengan ILD. Cahaya yang menimpa daun dapat sebagian dipantulkan dan ditransmisikan, dan kuantitas cahaya yang dipantulkan dan ditransmisi tergantung pada sifat daun yang dinyatakan dengan koefisien t (tau) untuk transmisi. Sedang cahaya yang jatuh diantara celah daun dari suatu lapisan daun akan lolos ke lapisan bawah, dan kuantitas cahaya ini tergantung pada letak daun yang dinyatakan dengan koefisien " s ".

Cahaya yang lolos dari suatu lapisan dapat menimpa permukaan daun pada lapisan dibawahnya yang sebagian kemudian ditransmisi, dan yang jatuh diantara celah daun akan terus lolos ke lapisan lebih bawah. Jika cahaya yang datang adalah diumpamakan sebesar 1, kuantitas cahaya yang lolos dan ditransmisi dari lapisan 0, 1, 2 dan 3, adalah sebagai berikut.

ILD	0	1	2	3
Cahaya lolos	1	s	s^2	s^3
Transmisi cahaya	0	$(1-s)\tau$	$2s(1-s)\tau$	$3s^2(1-s)\tau + 3s(1-s)^2\tau^2$

yang dapat dihitung dengan mudah melalui bantuan Gambar 10. Kuantitas cahaya yang sampai pada permukaan daun dari suatu lapisan ILD tertentu (**RAD**) dapat dirumuskan sebagai berikut

$$I = I_0 [s + (1-s)\tau]^{ILD} \quad (17)$$

Pendekatan ini memungkinkan penaksiran luas daun yang menerima radiasi langsung, yang diistilahkan dengan Luas Daun Terbuka (LDT), daun yang menerima cahaya yang ditransmisi kemudian diistilahkan dengan Luas Daun Ternaungi (LDN). Cahaya yang transmisi lebih dari satu kali tidak efektif untuk proses fotosintesis. Persamaan untuk menasir LDT dan LDN adalah sebagai berikut

$$LDT = 1 + s + s^2 + \dots + s^{L-1} \quad (18a)$$

$$= (1-s^L)/(1-s) \quad (18b)$$

$$LDN = (1-s)\{1+2s+3s^2 + \dots + (L-1)s^{L-2}\} \quad (19a)$$

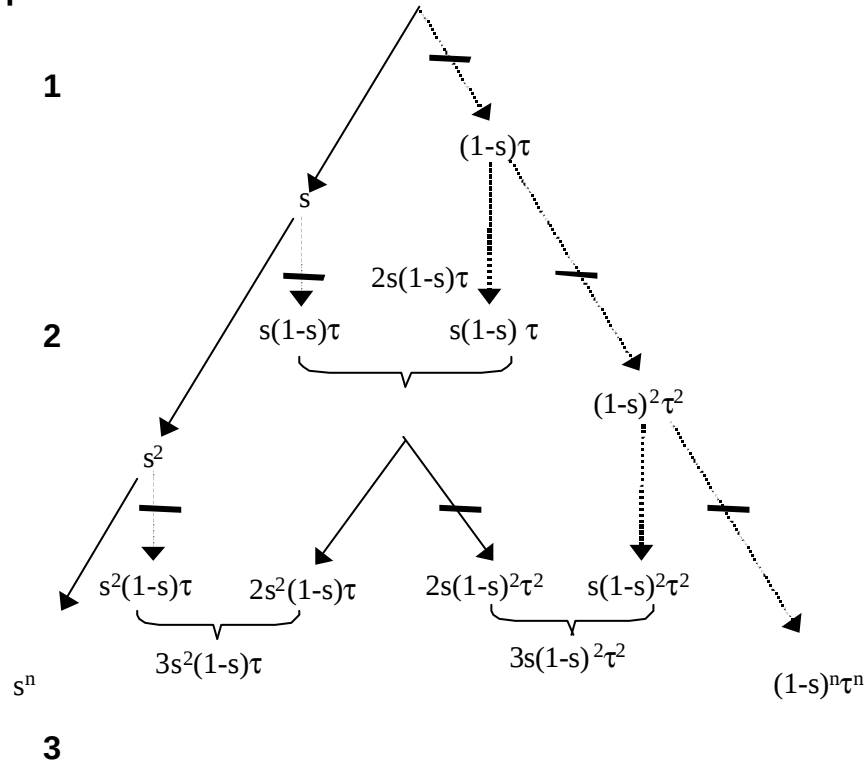
$$= \{1-s^L-(1-s)Ls^{L-1}\}/(1-s) \quad (19b)$$

Dengan menggunakan pendekatan ini, Jumlah Luas Daun (ILD) yang efektif untuk fotosintesis yaitu LDT + LDN dapat diketahui untuk harga s tertentu.

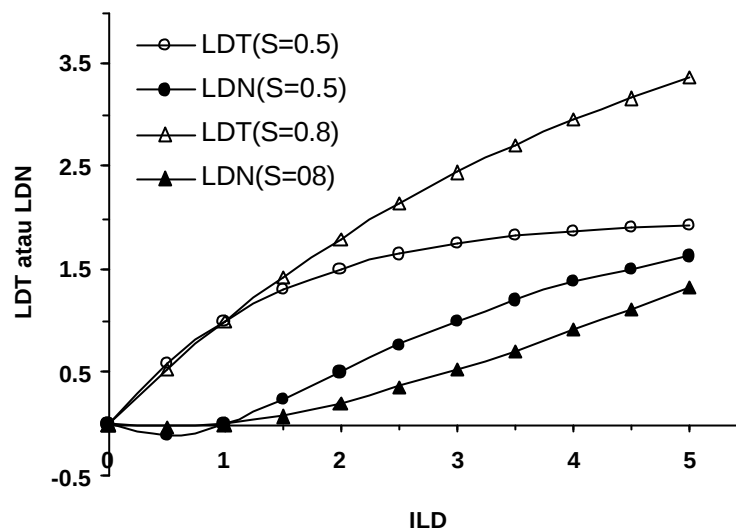
Sebagai contoh, luas daun yang efektif untuk fotosintesis pada tanaman dengan nilai $s = 0,5$ dan $0,8$ secara berturut-turut adalah sekitar $3,6$ dan $4,7$ pada $ILD = 5$ (Gambar 11).

Kelemahan dari persamaan ini adalah bahwa $LDT > ILD$ untuk $ILD < 1$ dan $LDN =$ negatif untuk $ILD \leq 1$, dan $(LDT+LDN) > ILD$ untuk $ILD > 1 - < 2$. Jadi persamaan ini hanya baik untuk bilangan bulat ILD ($0, 1, 2$ dst) atau untuk bilangan bulat ILD paling sedikit pada $ILD \leq 2$. Karena itu, persamaan ini dalam modeling pertumbuhan tanaman tentu agak sulit diterapkan untuk harga ILD yang meningkat secara terus-menerus dari nol hingga harga tertentu mengikuti pertumbuhan tanaman.

Lapisan ILD



Gambar 10. Penetrasi, transmisi dan intersepsi cahaya



Gambar 11. Tingkat LDT (luas daun yang menerima cahaya langsung) dan LDN (luas daun yang menerima cahaya yang transmisi) pada berbagai tingkat ILD dengan $s = 0,5$ atau $0,8$

Persamaan Beer dapat juga digunakan untuk menaksir area berkas cahaya yang berpenetrasi dalam tajuk.

$$A = A_0 \text{EXP}(-k.L) \quad (20)$$

dimana A dan A_0 adalah *area dari pancaran berkas cahaya* pada bidang horizontal pada suatu lapisan dalam tajuk dan diatas tajuk (Loomis & Williams, 1969), dan k adalah koefisien pemadaman area berkas cahaya yaitu nisbah area proyeksi bayangan per satuan luas daun per satuan luas tanah dengan sudut elevasi matahari. Proyeksi bayangan daun tergantung pada sudut daun (a) dan sudut elevasi matahari (b). Harga $k = 1$ terjadi apabila daun tersebar secara acak pada bidang horizontal dan tegak lurus terhadap cahaya datang dengan sudut elevasi matahari 90° . Pada keadaan ini ILD atau $L = 1$ akan mengabsorpsi cahaya sebesar 63% (Boote & Loosmis, 1991).

Jika sudut daun diketahui, harga k dapat diperoleh secara analisis dengan persamaan (Loomis & Williams, 1969; Sinclair, 1991) berikut:

$$k = G/\sin(\beta) \quad (21)$$

dimana G adalah proporsi proyeksi bayangan daun yaitu nisbah diantara luas proyeksi bayangan daun dengan luas daun. Jika daun mempunyai sudut sebesar α dan berkas cahaya tegak lurus terhadap bidang horizontal (Gambar 12), maka

$$G = b/c = \cos(\alpha) \quad (22)$$

Apabila berkas cahaya (g) berada pada posisi dengan sudut elevasi β , maka untuk mudahnya ini dapat dikonversi ke berkas cahaya dengan sudut 90° yaitu

$$\sin(\beta) = d/g \text{ dan } d = g.\sin(\beta) \quad (23)$$

Jadi harga G untuk sudut β yang bervariasi adalah:

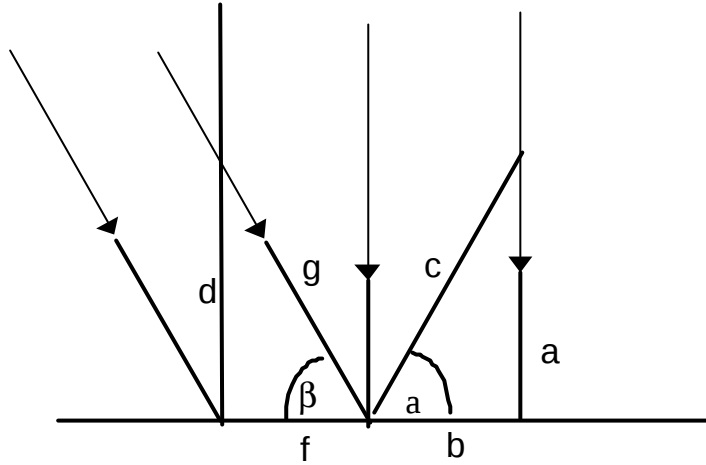
$$G = \cos(\alpha).\sin(\beta) \quad (24)$$

Pers (24) hanya berlaku untuk $\alpha \leq \beta$, dan untuk keadaan sebaliknya ($\alpha > \beta$)

$$G = \sin(\beta) \cos(\alpha) [1 + (2/\pi)(\tan \theta_0 - \theta_0)] \quad (25)$$

dimana θ_0 , yang dinyatakan dalam satuan radian, dapat diperoleh dari persamaan berikut:

$$\cos(\theta_0) = \cot(\alpha) \cdot \tan(\beta)$$



Gambar 12. Nisbah proyeksi bayangan daun dengan luas daun (b/c) ditinjau dari sudut elevasi berkas cahaya atau sinar matahari (β)

Dengan mengetahui harga G , fraksi radiasi yang diintersepsi (F) daun yang tersebar secara acak dalam bidang horizontal adalah

$$F = 1 - \text{EXP}(-L \cdot G / \sin(\beta)) \quad (26a)$$

atau

$$F = 1 - \text{EXP}(-L \cdot k) \quad (26b)$$

Sinclair & Horie (1989) menetapkan harga G sebesar 0,5 yang didasarkan atas hasil penelitian (Duncan *et al.*, 1967). Ini cukup masuk akal karena harga G akan mendekati 0, saat arah berkas sinar sejajar dengan letak daun, dan sama dengan 1 saat arah berkas sinar tegak lurus terhadap permukaan daun. Sinclair & Horie (1989) menggunakan cara yang lebih sederhana dalam perhitungan LDT dan LDN dari yang sebelumnya. Apabila I_m adalah pancaran radiasi pada tengah hari, dan I_0 adalah yang jatuh pada permukaan tajuk tanaman yang bervariasi dengan waktu sesuai dengan sudut elevasi matahari (β) seperti ditunjukkan persamaan berikut:

$$I_0 = I_m \cdot \sin(\beta) \quad (27)$$

dan

$$F = 1 - \text{EXP}(-L \cdot G / \sin(\beta)) \quad (28)$$

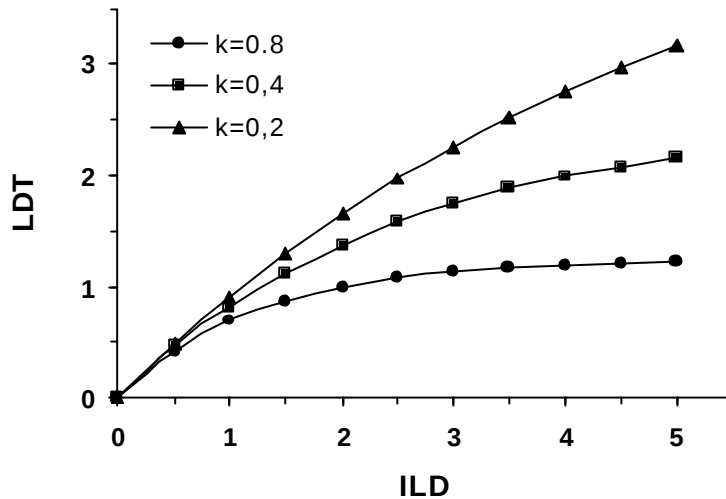
maka

$$LDT = F \times \sin(\beta) / G = F \times (1/k) \quad (29)$$

$$LDN = ILD - LDT \quad (30)$$

Tingkat LDT akan mendekati sekitar 1,2, 2,2 dan 3,2 secara berturut-turut untuk $k = 0,8$, $0,4$ dan $0,2$ dengan peningkatan ILD mendekati 5 (Gambar 13). Kuantitas radiasi yang diabsorpsi (I_A) dari radiasi yang datang (I_0) dengan mempertimbangkan tebaran radiasi oleh daun (TRD), yang meliputi pemantulan dan transmisi radiasi, adalah:

$$I_A = (1-TRD)((G/\sin(\beta)).I_0) \quad (31)$$



Gambar 13. Tingkat LDT dengan peningkatan ILD pada tanaman dengan harga k yang berbeda

Harga TRD diasumsikan $0,2$ yang mencakup difusi cahaya dari atmosfer disamping transmisi dan pemantulan cahaya. Kemudian daun yang tidak tersinari secara langsung atau yang menggunakan tebaran cahaya (LDN) disederhanakan menjadi selisih diantara ILD dengan LDT.

Kerapatan pancar (flux) radiasi yang langsung jatuh pada permukaan daun per satuan luas daun dari LDT , yang diistilahkan dengan Pancar Radiasi Daun Terang (RDT), tergantung pada tingkat radiasi langsung, F dan LDT seperti ditunjukkan persamaan berikut.

$$RDT = I_0 \times F/LDT \quad (32)$$

Kemudian kuantitas pancar tebaran radiasi per satuan luas daun dari LDN , yang disebut *pancar radiasi daun naungan* (RDN), dipertimbangkan sekitar 20% dari kuantitas pancar radiasi langsung yang diterima daun naungan, sehingga

$$RDN = 0,2 \times I_0 \times F/LDN \quad (33)$$

5. Model Cahaya Agroforestri

Cahaya adalah salah satu faktor utama yang mengendalikan ragaan sistem agroforestri untuk menjalankan fungsinya yaitu fungsi agronomi (berkaitan dengan produksi atau pendapatan) dan hutan (berkaitan dengan lingkungan). Tanaman sela setahun atau disebut juga '*tanaman semusim*' dapat diusahakan diantara pohon apabila cahaya cukup tersedia. Tanaman semusim ini tidak akan berproduksi bila pohon menaungi penuh, walaupun perbaikan kesuburan tanah telah diusahakan semaksimal mungkin. Aspek ketersediaan cahaya bagi tanaman sela dalam sistem agroforestri ini mendapat banyak perhatian, namun sayang sepanjang yang

diketahui sampai saat ini masih belum ada persamaan matematis yang tersedia (Van Noordwijk, 1996; Ong *et al.*, 1996).

Persamaan (26a) yang digunakan untuk menaksir intersepsi cahaya sebagai fungsi dari luas daun didasarkan atas asumsi bahwa daun tersebar pada lapisan-lapisan tajuk secara merata dengan transmisi cahaya yang sama dari setiap individu daun. Kenyataannya, daun dalam ruang tajuk tersebar tidak merata (acak), sehingga cahaya yang berpenetrasi melalui tajuk dapat sebagian lolos dari celah-celah daun dan sebagian lagi ditransmisi sebagaimana diuraikan sebelumnya. Transmisi cahaya berbeda diantara daun sehubungan dengan adanya perkembangan daun (ketebalan daun dan kandungan pigmen seperti khlorofil). Masalah lain yang kurang diperhatikan adalah pemadaman untuk PAR (*photosynthetic active radiation*) yang berkurang dari lapisan atas ke lapisan bawah tajuk, yang disebabkan oleh pertambahan lapisan daun atau luas daun sehingga terjadi penyaringan oleh lapisan lebih atas akan gelombang cahaya aktif untuk fotosintesis.

Analisis intersepsi cahaya pada sistem agroforestri menjadi sangat kompleks dengan variasi struktur/keragaman bentuk kanopi yang sangat besar secara horizontal dan vertikal. Ini berkaitan dengan perbedaan dalam atribut tanaman yang berkaitan dengan intersepsi cahaya yaitu (i) ukuran, bentuk dan orientasi daun, (ii) distribusi daun dalam tajuk, (iii) lebar tajuk, dan (iv) tinggi tanaman yang timbul akibat adanya perbedaan kombinasi spesies tanaman (pohon dan tanaman semusim), pola pertanaman (jarak tanam), dan waktu tanam. Keadaan ini dapat diperumit lagi oleh adanya perbedaan dalam perkembangan pertumbuhan tanaman diantara spesies tanaman, perbedaan dalam alur fotosintesis antara tanaman tipe C3 dan C4, perubahan posisi matahari dengan waktu dalam satu hari dan diantara musim. Sebagai contoh, ada jenis tanaman yang menggugurkan daun pada musim tertentu seperti pohon jati (*Tectona grandis*) yang kehilangan hampir seluruh daun pada musim kemarau, sehingga intersepsi cahaya sangat kecil. Contoh lain, adanya perbedaan waktu tanam juga akan mempengaruhi jumlah intersepsi cahaya. Tanaman semusim yang ditanam pada awal musim penghujan bersamaan dengan awal pembentukan daun, maka pohon akan mengintersepsi cahaya jauh lebih besar dari pada yang ditanam pada fase berikutnya.

Intersepsi cahaya pada sistem tumpangsari antara tanaman semusim, yang sering digunakan sebagai pendekatan untuk memahami intersepsi cahaya pada sistem agroforestri (Ong *et al.*, 1996), tidak dapat digunakan sebagai acuan. Ini didasarkan atas kenyataan bahwa pemadaman cahaya oleh tanaman semusim sangat berbeda dengan yang terjadi akibat adanya pohon. Cahaya yang berpenetrasi melalui tajuk pohon tidak hanya akan dipadamkan oleh daun saja, tapi juga oleh ranting dan dahan dengan sifat pemadaman yang berbeda dengan daun. Pada sistem tumpangsari "sisipan" (*addition intercrops*) yaitu tumpangsari dari satu jenis tanaman, yang ditanam pada populasi optimum dalam sistem monokultur, dengan satu atau lebih jenis tanaman lain sehingga populasi total tanaman meningkat, maka intersepsi cahaya dapat dianalisis secara parsial untuk masing-masing lapisan daun dengan persamaan berikut (Ong *et al.*, 1996)

$$S_l = S(1 - e^{-(k_{IA}L_{IA} + k_{IB}L_{IB})} \quad (34)$$

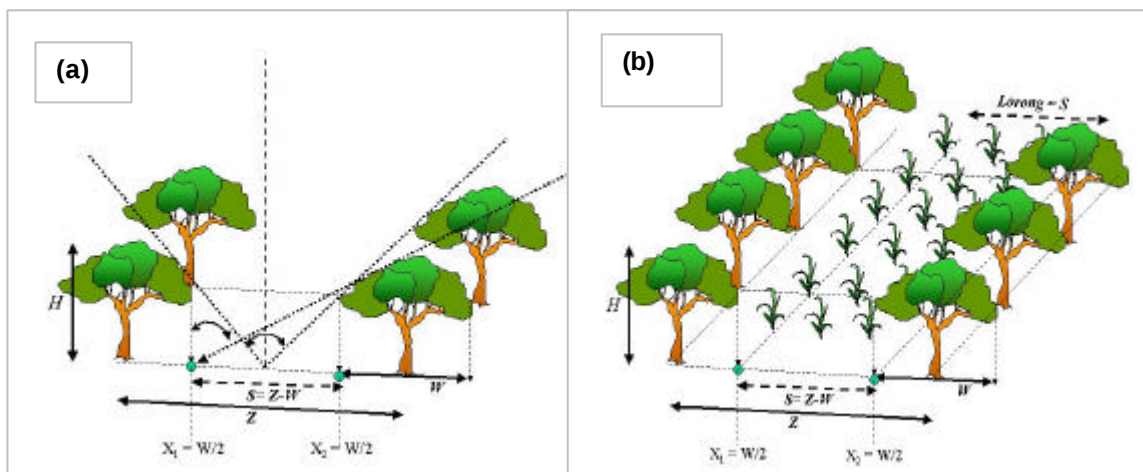
dimana **S** adalah kuantitas radiasi matahari yang mencapai permukaan lapisan **l** tajuk, **S_l** kuantitas radiasi yang diintersepsi oleh lapisan **l**, dan **k_{IA}**, **k_{IB}**, **L_{IA}** dan **L_{IB}** masing-masing adalah koefisien pemadaman pada lapisan **l** dan indeks luas daun pada lapisan **l** dari spesies **A** dan **B**. Intersepsi oleh spesies **A** pada lapisan **l** (**S_{IA}**) dapat ditaksir dengan persamaan berikut (Keating & Carberry, 1993)

$$S_{IA} = S_l \frac{k_{IA}L_{IA}}{k_{IA}L_{IA} + k_{IB}L_{IB}} \quad (35)$$

Pendekatan yang sama dapat digunakan untuk menaksir intersepsi cahaya oleh spesies **B** pada lapisan **I**. Intersepsi total harian dapat diperoleh dari jumlah intersepsi cahaya dari spesies **A** dan **B** untuk seluruh lapisan kanopi.

Kompleksitas sistem agroforestri dapat terjadi karena ada berbagai spesies pohon dengan jarak tanam yang tidak teratur dan fase perkembangan tanaman yang berbeda, mengakibatkan analisis intersepsi cahaya secara rinci tidak lagi menarik karena akan sampai pada persamaan yang terlalu banyak dan rumit. Suatu pendekatan sederhana adalah cahaya yang berpenetrasi melewati tajuk pohon diasumsikan tidak tersedia (tidak cukup) untuk poses fotosintesis tanaman semusim yang ditanam di sela-sela pohon atau diantara barisan pohon. Dengan perkataan lain, cahaya yang tersedia untuk tanaman semusim adalah cahaya yang jatuh langsung pada tanaman tersebut, sehingga tanaman semusim dianggap sebagai tanaman monokultur dengan tingkat radiasi lebih rendah akibat adanya naungan pohon. Untuk pohon yang sudah cukup berkembang, asumsi ini cukup masuk akal karena pemadaman cahaya oleh tajuk sangat besar khususnya bagian PAR (*photosynthetic active radiation*) dengan distribusi daun pada lapisan tajuk pohon yang sangat banyak. Cahaya yang ditransmisi lebih dari satu kali tidak efektif untuk proses fotosintesis (Monteith, 1965).

Model sederhana untuk menaksir intersepsi cahaya dengan parameter yang mudah diamati dapat dikembangkan dengan asumsi di atas. Kuantitas cahaya yang sampai pada lorong tempat tanaman semusim ditanam ditentukan oleh (i) jarak tanam pohon (spasi lorong), (ii) tinggi pohon, (iii) lebar tajuk, dan (iv) kepadatan tajuk. Dengan asumsi diatas, area lorong yang dapat ditanami tanaman semusim berdasarkan ketersediaan cahaya adalah yang terletak diantara dua tajuk (bagian terluar) suatu pohon dengan yang lainnya. Apabila jarak tanaman pohon adalah **Z** dan lebar tajuk **W**, maka area yang dapat ditanami tanaman semusim adalah **S = Z-W** (Gambar 14).



Gambar 14. Ilustrasi dari besar sudut yang dibentuk oleh sinar datang pada bagian lorong ($S=Z-W$) dalam sistem agroforestri yang dipengaruhi oleh jarak tanam (Z), tinggi (H) dan lebar tajuk (W) pohon (Gambar a). Area yang tersedia untuk tanaman sela adalah di bagian lorong yang terbentuk oleh 2 barisan pohon yaitu $S = Z-W$ (Gambar b), dan cahaya yang tersedia pada setiap lorong sebanding dengan sudut cahaya datang seperti ditunjukkan dalam gambar a.

Cahaya yang tersedia pada setiap titik di dalam lorong (S) ditentukan oleh kuantitas cahaya datang dan lama dari titik tersebut tertimpa cahaya langsung. Dengan perubahan posisi radiasi matahari dari mulai matahari terbit (pagi) hingga terbenam (sore), kuantitas cahaya pada setiap saat sepanjang hari dapat dihubungkan dengan *sinus* sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7. Lama dari suatu titik tertimpa cahaya langsung tergantung pada letak titik tersebut dalam lorong (**S**) yang berhubungan dengan pengaruh tinggi pohon (**H**), dan

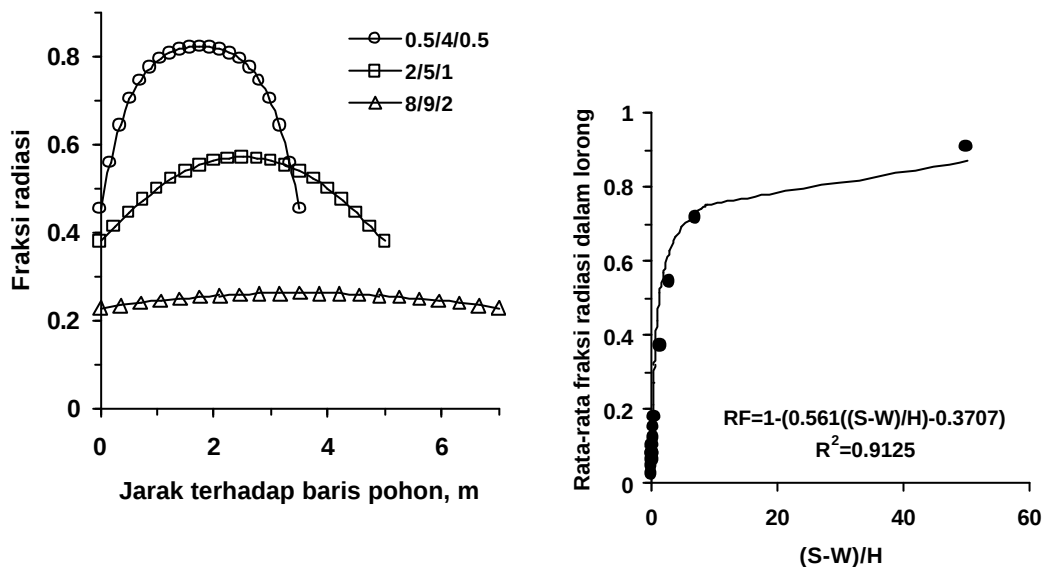
tingkat cahaya yang jatuh pada suatu titik semakin rendah semakin dekat titik tersebut dengan tajuk pohon. Ini sebanding dengan sudut yang dibentuk oleh sinar datang pada saat awal (antara matahari terbit hingga tengah hari) dengan sinar datang pada saat akhir (tengah hari hingga matahari terbenam) titik tersebut tertimpa cahaya langsung. Jika sudut ini dibagi dengan 180° (sepanjang hari titik tertimpa cahaya langsung), fraksi radiasi (RF) matahari dalam satu hari akan diperoleh seperti ditunjukkan persamaan berikut.

$$RF = (1/p)(ATAN(q_R) + ATAN(q_L)) \quad (36)$$

$$q_R = f(S-W)/H \text{ \& } q_L = (1-f)(S-W)/H$$

dimana **RF** = fraksi radiasi ($0 \leq RF \leq 1$; 0 = tertutup penuh & 1 = terbuka penuh) $p = 22/7$ (untuk konversi ke derajat relatif pada komputer), **ATAN** = arc tan (tangent), f = fraksi jarak S ($0 \leq f \leq 1$), $S = Z-W$ (jarak antara tajuk terluar pohon, m), W = lebar tajuk pohon (m) dan H = tinggi pohon (m). Persamaan diatas menunjukkan **RF** = 0 atau tanaman semusim tidak dapat ditanam pada agroforestri dengan tajuk pohon yang menutup penuh permukaan tanah ($S=W$).

Aplikasi persamaan (36) untuk distribusi cahaya dalam lorong diantara pohon ditunjukkan pada Gambar 15. Intersepsi cahaya oleh tanaman semusim kemudian dapat ditaksir dengan persamaan (26a) sebagai fungsi dari indeks luas daun dari tanaman semusim itu sendiri. Jadi pertumbuhan tanaman semusim, berdasarkan taksiran cahaya yang tersedia dalam lorong, akan semakin terhambat pada jarak yang semakin mendekati pohon. Ini sesuai dengan hasil pengamatan dari Fernandes *et al.* (1993) pada tanaman jagung yang ditumpangsarikan dengan pohon *Inga edulis* Mart yang berumur 12-24 bulan.



Gambar 15. Distribusi cahaya pada lorong di antara dua baris pohon ($S-W$) yang tersedia untuk tanaman sela dalam sistem budidaya pagar, pada kondisi pohon yang berbeda dalam tinggi (H), jarak tanam (Z) dan lebar tajuk (W) (Gambar kiri), dan hubungan antara rata-rata fraksi radiasi (RF) dengan $(S-W)/H$ untuk sistem agroforestri (Gambar kanan). Simbol angka dalam gambar kiri menunjukkan $H/S/W$ (misalnya. 0,5/4/0,4 adalah $H = 0.5$ m, $S = 4$ m dan $W = 0.5$ m)

Rata-rata harian dari kepadatan fluks radiasi yang jatuh langsung pada tanaman semusim dapat dihitung dari hasil persamaan diatas yang merupakan rata-rata integrasi dari total fluks cahaya yang jatuh di dalam lorong. Dengan melibatkan faktor Z , H dan W , rata-rata fluks cahaya pada sistem agroforestri dapat ditaksir pada jarak tanam pohon, tinggi pohon dan

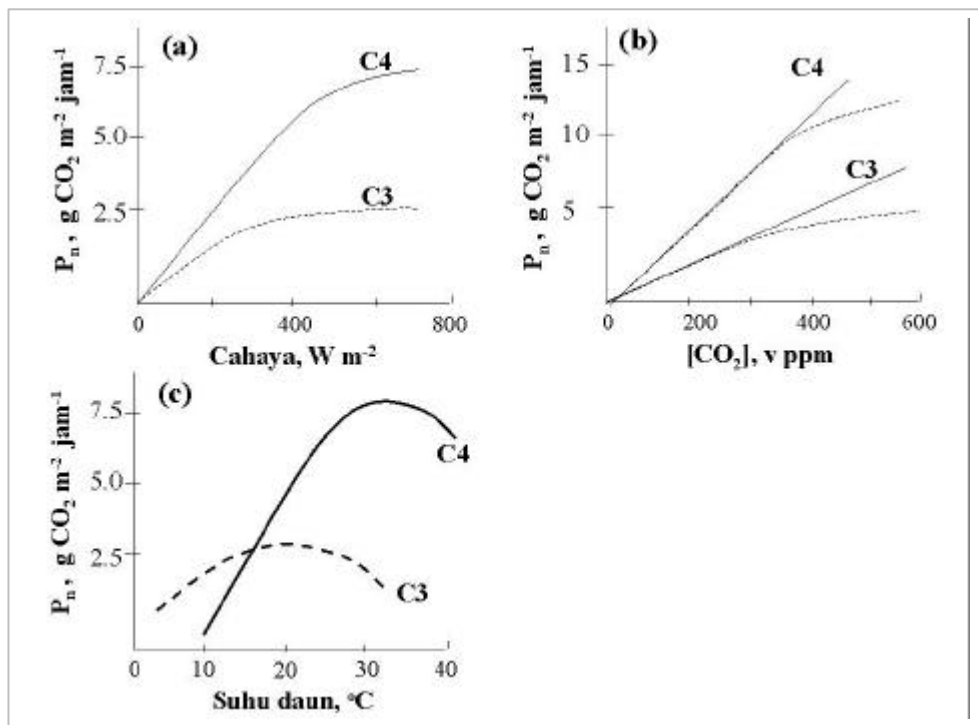
lebar kanopi yang berbeda. Hasil dari penaksiran ini disajikan pada Gambar 15 yang menunjukkan suatu hubungan yang erat antara rata-rata **RF** dengan **(S-W)/H** dengan model berikut.

$$RF = 1 - 0.561((S - W)/H)^{-0.371}; R^2 = 0,9125 \quad (37)$$

Persamaan di atas menunjukkan bahwa rata-rata radiasi matahari yang tersedia pada tanaman semusim yang ditanam di sela-sela pohon dapat ditaksir dengan mengukur jarak antar pohon, lebar tajuk dan tinggi tanaman. Persamaan ini juga berlaku untuk agroforestri kompleks yang terdiri dari beberapa spesies pohon dengan jarak tanam yang tidak teratur dan fase pertumbuhan yang tidak sama. Jarak tanam pohon adalah rata-rata jarak ruang pohon yang dapat diperoleh dari luas area (A) dibagi dengan populasi (p) dan jarak rata-rata pohon yang tidak dapat ditanami tanaman semusim (S_0).

5.1 Cekaman lingkungan dalam sistem agroforestri: Efisiensi Konversi

Energi radiasi matahari yang diintersepsi tanaman akan digunakan untuk membangkitkan energi metabolisme yaitu ATP (Adenosine triphosphate) dan NADPH (Nicotinamide adenine dinucleotide phosphate tereduksi) yang digunakan untuk mereduksi CO₂ menjadi karbohidrat. Karena itu terdapat suatu hubungan yang erat antara laju fotosintesis (reduksi CO₂ atau evolusi O₂) dengan tingkat radiasi pada tanaman C₃ dan C₄ dengan tingkat radiasi sampai tingkat kejenuhan cahaya (Gambar 16a). Tanaman yang termasuk dalam kelompok C₃ misalnya kacang-kacangan, ubi-ubian dan pepohonan umumnya, sedang yang termasuk dalam tanaman C₄ misalnya. jagung, tebu, sorghum, alang-alang.



Gambar 16. Respon fotosintesis daun dari tanaman C₃ dan C₄ terhadap (a) cahaya pada $[\text{CO}_2]$ udara normal (biasa) dan suhu optimum, (b) CO₂ pada irradiansi tinggi, dan (c) suhu pada irradiansi tinggi dan $[\text{CO}_2]$ udara normal (dikutip dari Ong and Huxley, 1996).

Kejenuhan cahaya pada tanaman C₃ ($0.2-0.8 \text{ cal.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$; $1 \text{ cal.cm}^{-2}.\text{min}^{-1} = 697.8 \text{ W.m}^{-2}$) dicapai pada tingkat irradiansi yang lebih rendah dari pada tanaman C₄ ($>1 \text{ W.m}^{-2}$). Dengan

demikian, usaha mengkombinasikan tanaman C4 dengan pepohonan dalam sistem agroforestri memiliki resiko gagal panen lebih tinggi dari pada tanaman C3 karena rendahnya radiasi cahaya yang datang. Pada kisaran tingkat radiasi ini, hubungan yang erat juga terdapat antara produksi biomasa dengan tingkat radiasi, dan sudut rata-rata yang dibentuk dari hubungan ini dengan garis horizontal yang dikenal sebagai *efisiensi konversi radiasi matahari menjadi biomasa tanaman* atau juga dikenal dengan istilah *RUE (radiation use efficiency)*. Sudut awal dikenal dengan istilah *efisiensi kuantum (quantum efficiency)* yaitu tingkat produksi *biomasa* maksimum per satuan energi radiasi matahari yang dicapai pada cahaya rendah. Belakangan ini, RUE disederhanakan sebagai nisbah dari produksi *biomasa* (bagian diatas tanah) dengan radiasi matahari yang diintersepsi atau diabsorpsi (Sinclair, 1999). Dengan demikian produksi biomasa (*BM*) dapat dinyatakan sebagai fungsi dari akumulasi radiasi matahari (*PAR*) yang diintersepsi atau diabsorpsi dan RUE seperti berikut ini:

$$BM = RUE * PAR \quad (38)$$

Persamaan (38) berlaku pada dasarnya untuk kondisi pertumbuhan tanaman yang tidak dibatasi oleh air dan hara tanaman (Ong *et al.* (1996), dan *BM* akan menggambarkan potensi produksi. Tetapi persamaan tersebut dapat juga digunakan untuk tanaman yang mengalami stres lingkungan, dan RUE akan menggambarkan efisiensi konversi pada kondisi stres. Sesungguhnya, rata-rata efisiensi konversi pada kisaran cahaya rendah hingga kejenuhan cahaya sudah mencakup kondisi stres cahaya.

Karena metabolisme yang terlibat pada reduksi CO₂ berbeda antara tanaman C3 dengan tanaman C4, maka efisiensi konversi radiasi atau efisiensi kuantum berbeda diantara kedua jenis tanaman. Proses yang terlibat pada reaksi reduksi CO₂ pada jenis tanaman C3 lebih sederhana dari pada jenis tanaman C4 yang melibatkan tambahan proses yaitu reaksi karboksilase dan transfer intermediat (zat antara) dari suatu bagian sel ke bagian lain. Dengan demikian seseorang dapat beranggapan bahwa efisiensi konversi pada jenis tanaman pertama lebih tinggi dari pada jenis tanaman kedua. Kenyataannya tidak demikian karena adanya proses fotorespirasi pada tanaman C3 yang sampai tingkat tertentu dipengaruhi oleh nisbah pCO₂/pO₂ (p = tekanan parsial), suhu, dan faktor lain seperti kekurangan air. Pada fotorespirasi, zat yang berfungsi sebagai tempat pengikatan CO₂ (ribulose 1,5-bisphosphate) digunakan sebagian untuk mengikat O₂, dan semakin tinggi konsentrasi O₂ dibandingkan dengan CO₂ dalam khloroplas pada lingkungan reaksi karboksilase semakin sedikit ribulose 1,5-bisphosphate yang tersedia untuk mengikat CO₂. Karena itu, seseorang dapat beranggapan bahwa fotosintesis tanaman C3 akan lebih responsif dari C4 terhadap peningkatan [CO₂] atmosfer, tetapi kenyataannya keduanya menunjukkan tanggapan yang tidak berbeda jauh (Gambar 16b). Tingkat fotosintesis tanaman akan meningkat dengan meningkatnya [CO₂] pada kisaran 0-800 ppm, tetapi pada tanaman C4 secara konsisten masih lebih tinggi dari pada tanaman C3.

Pengaruh suhu menunjukkan bahwa efisiensi kuantum dari tanaman C3 dan C4 adalah sama pada kisaran suhu 20-250C, tapi pada suhu yang lebih rendah nilai efisiensi kuantum tanaman C4 masih lebih tinggi dari pada tanaman C3. Dengan demikian hubungan diantara laju fotosintesis dengan suhu berbeda diantara kedua jenis tanaman dengan penurunan yang tajam pada tanaman C4 dibawah suhu 15-200C (Gambar 16c).

Faktor cekaman (stres) seperti suhu tinggi, salinitas, kekurangan air dan cahaya rendah cenderung mengakibatkan kerusakan dari sistem fotosintesis akibat radiasi termasuk PAR yang berlebihan yang tidak dapat dimanfaatkan. Fotoinhibisi terjadi apabila laju kerusakan fotosistem II (PSII) melebihi laju perbaikannya (Baker, 1991), dan dapat terjadi saat stres air atau saat tanaman yang suka naungan tiba-tiba harus tumbuh pada kondisi cahaya tinggi. Regulasi PSII ke bawah mencakup dissipasi energi (panas) yang diabsorpsi untuk

mengurangi kerusakan. Regulasi ke bawah (down-regulation) dan kerusakan akan menurunkan efisiensi konversi pada kondisi cahaya rendah dan dapat mengurangi laju fotosintesis bersih pada cahaya tinggi. Keadaan ini bersama dengan fluks PAR yang relatif rendah yang dibutuhkan untuk kejenuhan fotosintesis tanaman C3 (Gambar 16a.) dapat menjelaskan perbaikan yang telah dilaporkan pada efisiensi konversi dari tanaman C3 seperti kacang tanah yang ditumpangsarikan. Naungan dari tanaman yang lebih tinggi mengurangi intersepsi dari tanaman legum akan radiasi yang berlebihan, sehingga pengaruh fotoinhibisi dapat ditekan bersamaan dengan adanya peningkatan efisiensi penggunaan air.

Efisiensi konversi energi cahaya menjadi *biomasa* (E_c) tergantung pada efisiensi intersepsi cahaya (E_i) dan efisiensi penggunaan cahaya yang diintersepsi tersebut dalam proses fotosintesis (E_{uI}) seperti ditunjukkan persamaan berikut (Wallace & Yan, 1998)

$$E_c = E_i \times E_{uI} \quad (39)$$

Cahaya yang diintersepsi akan diabsorpsi (E_a) dan sebagian direfleksikan (E_r), sehingga persamaan (39) dapat ditulis dalam bentuk

$$E_c = E_a \times E_{uII} \quad (40)$$

Adaptasi tanaman pada cahaya rendah mungkin akan lebih banyak ditentukan oleh efisiensi intersepsi dan absorpsi cahaya serta efisiensi konversi energi cahaya yang diintersepsi menjadi energi kimia. Hasil penelitian pada tanaman padi di lapangan menunjukkan bahwa produksi biomasa tanaman ditentukan oleh E_i pada awal pertumbuhan, dan E_{uI} pada fase berikutnya. Rata-rata efisiensi penggunaan energi cahaya selama pertumbuhan tanaman adalah 45-66% untuk E_i , 1,5-2,1% untuk E_{uI} , dan 0,7-1,4% untuk E_c . Energi cahaya yang dipantulkan (E_r) adalah 17-20%, yang ditransmisi melalui tajuk ke permukaan tanah 30-47%, $E_a = 35-51\%$, $E_{uII} = 2,8-3,98\%$. Varietas padi tidak menunjukkan perbedaan dalam parameter ini, tapi peningkatan populasi tanaman padi diikuti dengan peningkatan E_i . Parameter E_{uI} meningkat dengan peningkatan populasi ke tingkat sedang dan turun pada kepadatan tanaman yang lebih tinggi (Wallace & Yan, 1998). Ini menegaskan bahwa hanya sedikit energi radiasi matahari yang dapat digunakan dalam pembentukan *biomasa* tanaman.

Dengan demikian peningkatan produktivitas tanaman yang ditanam dibawah naungan dapat didekati melalui peningkatan efisiensi intersepsi dan absorpsi cahaya serta efisiensi konversi energi cahaya yang diintersepsi menjadi biomasa tanaman. Efisiensi penggunaan radiasi yang dinyatakan dalam satuan biomasa per energi cahaya yang diintersepsi (Sinclair, 1999), merupakan salah satu pendekatan yang dapat digunakan untuk mempelajari tingkat adaptasi tanaman pada cahaya rendah. Persamaan yang dikembangkan untuk menghitung RUE dari tanaman padi dan jagung (Sinclair & Horie, 1989; Sinclair, 1991) dapat diwujudkan dalam bentuk berikut.

$$RUE = \frac{0.6(30/44)(C_{sun} + C_{shade})}{I_0 \cdot F} \quad (41)$$

dimana 30/44 adalah konversi CO_2 ke karbohidrat (hexose), 0,6 efisiensi konversi karbohidrat ke *biomasa*, C_{sun} & C_{shade} secara berturut-turut tingkat fotosintesis (CO_2) dari daun yang terkena cahaya langsung dan yang dibawah naungan, I_0 tingkat cahaya yang jatuh pada permukaan atas tajuk, dan F adalah fraksi cahaya yang diintersepsi tanaman. Tingkat C_{sun} & C_{shade} dapat ditaksir dari tingkat fotosintesis maksimum pada kejenuhan cahaya (C_{A0}), efisiensi fotosintesis (E) dan tingkat cahaya yang jatuh pada daun yang terkena cahaya langsung (I_{sun}) atau yang ternaungi (I_{shade}) seperti berikut.

$$C_{\text{sun}} = \text{LAI}_{\text{sun}} \cdot C_{A0} [1 - \text{EXP}(-E \cdot I_{\text{sun}} / C_{A0})] \quad (42)$$

$$C_{\text{shade}} = \text{LAI}_{\text{shade}} \cdot C_{A0} [1 - \text{EXP}(-E \cdot I_{\text{shade}} / C_{A0})] \quad (43)$$

Faktor tanaman yang sangat berpengaruh terhadap efisiensi penggunaan radiasi adalah pigmen khususnya khlorofil dan konsentrasi nitrogen daun. Evans & Farquhar (1991) mendapatkan bahwa peningkatan khlorofil daun dari 0,28 hingga 0,77 mmol.m⁻² diikuti dengan peningkatan fotosintesis (evolusi oksigen) pada cahaya sekitar diatas 250 μmol quanta.m⁻².s⁻¹. Tingkat fotosintesis per satuan khlorofil meningkat mengikuti pola non-rectangular hiperbola dengan peningkatan energi radiasi yang diabsorbsi per satuan khlorofil. Perbedaan dalam kandungan khlorofil tidak mengakibatkan perbedaan dalam tingkat fotosintesis per satuan khlorofil. Ini menegaskan bahwa khlorofil mempengaruhi fotosintesis melalui absorpsi cahaya.

Peranan nitrogen dalam fotosintesis berhubungan dengan enzim yang mereduksi CO₂ menjadi karbohidrat (*ribulose 1,5-bisphosphate carboxylase*) yang dapat mencapai sekitar 50% dari protein daun dapat larut (Sinclair, 1991). Pada tanaman padi, hubungan diantara tingkat fotosintesis (CER, carbon exchange rate, mg CO₂.m⁻².s⁻¹) dengan nitrogen daun (g.m⁻² daun) mengikuti model berikut (Sinclair & Horie, 1989).

$$C_{A0} = 1,5 \left[\frac{2}{1 + \text{EXP}(-1,4(N_A - 0,3))} - 1 \right] \quad (44)$$

Kesimpulan yang dapat ditarik dari uraian diatas dalam upaya pemanfaatan lahan yang ditanami pohon untuk tanaman pangan adalah bahwa efisiensi penggunaan energi radiasi matahari (*RUE*) perlu ditingkatkan untuk meningkatkan adaptasi tanaman di bawah cahaya rendah (naungan). Tingkat penggunaan energi radiasi matahari tergantung pada kandungan dan sifat absorpsi pigmen khususnya khlorofil akan energi radiasi matahari dan aktivitas enzim *ribulose 1,5-bisphosphate carboxylase* dalam konversi energi radiasi matahari menjadi karbohidrat. Karena itu, parameter yang dapat digunakan dalam seleksi tanaman dengan tingkat adaptasi yang lebih tinggi pada cahaya rendah (naungan) adalah *kandungan khlorofil* dan *nitrogen* disamping *produksi biomasaa* dan *bagian ekonomis tanaman*.

5.2 Intersepsi Cahaya model WaNuLCAS

Pendugaan radiasi cahaya dalam model simulasi WaNuLCAS juga didasarkan pada persamaan dari Beer seperti yang telah dipaparkan di atas, yaitu berdasarkan Indeks Luas Daun (ILD) tanaman serta ketinggian relatifnya terhadap tanaman lain di masing-masing zona. Secara vertikal, daerah serapan cahaya di dalam plot dibagi menjadi 4 strata berdasarkan ketinggian kanopi tanaman di masing-masing zona. Pada model WaNuLCAS, di setiap zona maksimum ada 4 jenis tanaman yang mungkin tumbuh yaitu 3 jenis pohon dan 1 jenis tanaman semusim. Pada model ini, ILD setiap tanaman di masing-masing zona dan strata diasumsikan homogen.

Berbeda dengan tanaman semusim monokultur, serapan cahaya oleh pohon dipisahkan antara cahaya yang diserap oleh daun dan cabang. Cahaya yang diserap oleh daun dan batang masing-masing dihitung berdasarkan Indeks Luas Daun (ILD) dan Indeks Luas Cabang (ILC). Estimasi ini dapat dipakai untuk mengukur besarnya pemadaman cahaya (naungan) oleh pohon yang merontokkan daunnya pada musim kemarau (misalnya pohon jati). Nisbah antara ILC dengan ILD ditentukan oleh arsitektur kanopi, ukuran daun dan umur pohon. Untuk pohon-pohon tua, ukuran daunnya menjadi semakin kecil sehingga

<http://www.icraf.cgiar.org/sea/AgroModels/WaNulCAS/index.htm>

Bahan Bacaan

Textbook

- Boote, K.J. and Loomis, R.S., 1991. The prediction of canopy assimilation. In "Modeling crop photosynthesis –from biochemistry to canopy", K.J. Boote and R.S. Loomis (eds.). CSSA Special Publ. No. 19, Madison, Wisconsin, USA
- Driessen, P.M. and Konijn, N.T., 1992. Land-use systems analysis. Wageningen Agricultural University.
- Duncan, W.G., Loomis, R.S., Williams, W.A. and Hanau, R., 1967. A model for simulating photosynthesis in plant communities. *Hilgardia*, 38: 181-205
- Evans, J.R. and Farquhar, G.D., 1991. Modeling canopy photosynthesis from the biochemistry of the C3 chloroplast. In "Modeling crop photosynthesis from biochemistry to canopy". CSSA Special publication No. 19, Madison, Wisconsin, USA. pp. 1-15
- Fernandes, E.C.M., Davey, C.B. and Nelson, L.A., 1993. Alley cropping on an acid soil in the upper Amazon: Mulch, Fertilizer, and Hedgerow root pruning effects. In "Technologies for Sustainable Agriculture in the Tropics", ASA Special Publication No. 56., Madison, Wisconsin, USA. pp. 77-96
- Goudriaan, J. and Van Laar, H.H., 1994. Modelling potential crop growth processes. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands
- Munn, R.E., 1966. Descriptive Micrometeorology. Academic Press, New York
- Ong, C.K., Black, C.R., Marshall, F.M. and Corlett, J.E., 1996. Principles of resource capture and utilization of light and water. In "Tree-Crop Interaction", C.K. Ong and P. Huxley (eds.). CAB International, Wallingford & ICRAF, Nairobi, Kenya. pp.73-158
- Ong, C.K. and Huxley, P., 1996. Tree-Crop Interactions. CAB International, University Press, Cambridge, Wallingford/Nairobi. 386 pp.
- Van Noordwijk, M., 1996. Mulch and shade model for optimum Alley-cropping design depending on soil fertility. In "Tree-Crop Interaction", C.K. Ong and P. Huxley (eds.). CAB International, Wallingford & ICRAF, Nairobi, Kenya. pp. 51-72
- Van Noordwijk, M. and Lusiana, B., 2000. WaNulCAS2.0. Background on a model of water, nutrient and light capture in agroforestry systems. ICRAF, Bogor, Indonesia. 186 pp.
- Wallace, D.H. and Yan, W., 1998. Plant breeding and whole-system crop physiology, Improving adaptation, maturity and yield. CAB International, University Press, Cambridge
- Woodward, F.I. and Sheehy, J.E., 1983. Principles and Measurements in Environmental Biology. Butterworths, London

Jurnal Ilmiah

- Baker, N.R., 1991. A possible role for photosystem II in environmental perturbations of photosynthesis. *Physiologia Plantarum* 81: 563-570
- Keating, B.A. and Carberry, P.S., 1993. Resource capture and use in intercropping; solar radiation. *Field Crops Research* 34:273-301
- Loomis, R.S. and Williams, W.A., 1969. Productivity and the morphology of crop stands: Patterns with leaves. In "Physiological aspects of crop yield", J.D. Eastin *et al.* (eds). ASA, Madison
- Monteith, J.L., 1965. Light distribution and photosynthesis in field crops. *Ann. Bot.*, 29 (113):1-37
- Sinclair, T.R., 1991. Canopy carbon assimilation and crop radiation-use efficiency dependence on leaf nitrogen content. In "Modeling crop photosynthesis from biochemistry to canopy". CSSA Special publication No. 19, Madison, Wisconsin, USA. pp. 95-107

- Sinclair, T.R. and Horie, T.,1989. Leaf nitrogen, photosynthesis, and crop radiation use efficiency: A Review. *Crop Sci.*, 29:90-98
- Sinclair, T.R. and Muchow, R.C, 1999. Radiation use efficiency. *Adv. Agronomy* 65:215-265