

PENDUGAAN KEBUTUHAN AIR UNTUK PERTUMBUHAN KELAPA SAWIT DI LAPANG DAN APLIKASINYA DALAM PENGEMBANGAN SISTEM IRIGASI

Iman Yani Harahap dan Witjaksana Darmosarkoro

ABSTRAK

Untuk mengetahui kebutuhan air untuk pertumbuhan tanaman di lapang maka telah dilakukan penelitian yang bertujuan untuk mendapatkan nilai koefisien tanaman (kc) pada berbagai umur tanaman. Dari nilai kc tersebut kemudian akan ditentukan kebutuhan air untuk pertumbuhan tanaman. Informasi kebutuhan air untuk pertumbuhan tanaman tersebut akan digunakan sebagai dasar perencanaan pengembangan sistem irigasi pada pertanaman kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq). Pelaksanaan penelitian meliputi (1) pengukuran kehilangan air pada sistem pertanaman kelapa sawit baik melalui tajuk tanaman (transpirasi), maupun melalui permukaan tanah (evaporasi), (2) pengukuran indeks luas daun pada berbagai umur tanaman, dan (3) penghitungan nilai evapotranspirasi referensi. Pengukuran kehilangan air pada sistem pertanaman dilakukan pada kelapa sawit (umur 6 – 7 tahun), dengan LAI berkisar 4,9 – 5,1. Lokasi penelitian di kebun Bah Jambi, Simalungun, Sumatera Utara, yang bertipe iklim Af (klasifikasi Koppen), yang merupakan wilayah tanpa defisit air. Untuk mendapat gambaran aplikasi pendugaan kebutuhan air tanaman dalam pengembangan sistem irigasi, maka diskenariokan pengembangan sistem irigasi dilakukan di wilayah Lampung. Hasil penelitian menunjukkan koefisien tanaman (kc) kelapa sawit berkisar antara 0,82 pada ($LAI < 2$) sampai 0,93 ($LAI > 5$). Dengan nilai kc tersebut dapat ditentukan kebutuhan air untuk pertumbuhan tanaman kelapa sawit di lapang. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa kebutuhan air untuk pertumbuhan kelapa sawit di lapang berkisar antara 4 – 4,65 mm hari⁻¹ atau sekitar 120 – 140 mm bulan⁻¹. Skenario pengembangan irigasi di wilayah Lampung menunjukkan bahwa pemberian air melalui sistem irigasi secara umum harus dilakukan pada akhir Juli sampai akhir Oktober. Air yang dibutuhkan sistem irigasi saluran terbuka berkisar antara 1.960 – 2.460 m³ ha⁻¹ bulan⁻¹, dengan puncaknya pada Agustus (2.460 m³ ha⁻¹ bulan⁻¹). Sedangkan air yang dibutuhkan sistem irigasi tertutup (sprinkler dan drip) berkisar antara 1570 – 1970 m³ ha⁻¹ bulan⁻¹, dengan puncaknya pada Agustus (1.970 m³ ha⁻¹ bulan⁻¹). Jarak waktu antar pemberian adalah 19 hari.

Kata kunci: *Elaeis guineensis*, koefisien tanaman (kc), kebutuhan air untuk pertumbuhan, transpirasi, evaporasi, sistem irigasi, skenario

PENDAHULUAN

Dengan semakin meningkatnya industri hilir yang berbahan baku minyak sawit, menyebabkan kelapa sawit memiliki posisi strategis untuk dikembangkan. Usaha pengembangan bertujuan meningkatkan produksi minyak sawit nasional untuk memenuhi kebutuhan industri dalam negeri maupun ekspor. Salah satu usaha

untuk meningkatkan produksi tersebut melalui peningkatan produktivitas tanaman kelapa sawit.

Pada kondisi lingkungan yang optimum, radiasi surya menentukan produksi biomasa tanaman yang disebut sebagai produktivitas potensial. Sedangkan produktivitas aktual, di samping ditentukan oleh energi radiasi tersebut, juga ditentukan oleh faktor-faktor lain, yang salah satunya

adalah ketersediaan air. Bila semua faktor lingkungan dalam keadaan optimum, tingkat produktivitas aktual tergantung efisiensi tanaman dalam mengkonversikan energi surya menjadi bahan kering atau efisiensi penggunaan radiasi surya (8). Tingkat efisiensi penggunaan radiasi surya, merupakan fungsi berbagai faktor, yang mempengaruhinya, seperti bahan (varietas) tanaman, hara tanah, dan ketersediaan air. Pada pertanaman kelapa sawit yang mendapatkan pemupukan dan perawatan yang baik, maka nilai efisiensi tersebut bervariasi, sehingga menyebabkan terjadi fluktuasi produksi bahan kering tanaman. Turner (12), menyebutkan bahwa musim kering dan penghujan yang berhubungan dengan ketersediaan air tanah penyebab utama terjadinya fluktuasi hasil kelapa sawit. Tulisan ini bertujuan menduga kebutuhan air yang optimum untuk pertumbuhan kelapa sawit di lapang dan mengaplikasikan informasi pendugaan kebutuhan air tersebut untuk dasar perhitungan kebutuhan air dalam pengembangan sistem irigasi di pertanaman kelapa sawit.

BAHAN DAN METODE

Landasan teoritis

Secara implisit diasumsikan fungsi utama tanaman adalah mengkonversikan energi radiasi surya ke energi kimia yang lebih stabil melalui fotosintesis, yang dapat segera tersedia apabila dibutuhkan untuk pertumbuhan (2). Asumsi tersebut dapat diformulasikan secara sederhana sebagai berikut :

$$dW = e Ri - Rs \quad (1)$$

dW : Produksi biomasa untuk pertumbuhan;

- Ri : Jumlah energi radiasi surya yang diintersepsi tajuk tanaman;
 Rs : Kehilangan (perombakan biomasa) untuk respirasi;
 e : Efisiensi penggunaan radiasi surya

Efisiensi (e) merupakan fungsi dari pengelolaan tanaman (teknik budidaya), pemupukan, bahan tanaman, dan ketersediaan air. Pada tulisan ini, selain ketersediaan air, maka faktor-faktor lainnya diasumsikan pada kondisi optimal, sehingga e hanya bervariasi terhadap ketersediaan air.

Berdasar nilai e maksimum kelapa sawit (13), maka nilai e ditentukan dengan

$$e = 12.9 \text{ min } (f\Gamma) 10^{-9} \text{ kg CO}_2 \text{ J}^{-1} \dots (2)$$

$f\Gamma$: faktor konduktan stomatik

Nilai $f\Gamma$ didekati dari nisbah konduktan aktual (Γ_a) terhadap konduktans maksimum (Γ_m) (7).

$$f\Gamma = \Gamma_a / \Gamma_m \dots (3)$$

Nilai Γ_a (mm detik^{-1}) dihitung dari transpirasi aktual (T_a) dan nilai Γ_m (mm detik^{-1}) diturunkan dari radiasi surya (Q_s) berdasar persamaan empiris yang dikembangkan Denmead dan Miller (1976), yang secara ringkas disimbolkan sebagai berikut.

$$\Gamma_a = f(T_a) \dots (4a)$$

$$\Gamma_m = f(Q_s) \dots (4b)$$

Dari deduksi di atas diperlihatkan bahwa pertumbuhan tanaman dikendalikan oleh tingkat efisiensi penggunaan radiasi surya dan efisiensi penggunaan radiasi surya tersebut ditentukan oleh faktor konduktans stomata. Sedangkan konduk-

tans stomatik tersebut merupakan fungsi dari laju transpirasi aktual tanaman (T_a) dan faktor cuaca (radiasi surya, Q_s). Doorenbos dan Pruitt (5) telah lebih awal mempertimbangkan aspek transpirasi tanaman sebagai faktor utama yang diperhatikan dalam menentukan kebutuhan air untuk pertumbuhan tanaman, di samping jumlah kehilangan air melalui permukaan tanah (evaporasi tanah). Kebutuhan air yang terlibat langsung dalam asimilasi karbon (proses fotosintesis) relatif sangat kecil (kurang dari 2 % dari kebutuhan air untuk evapotranspirasi), sehingga dapat diabaikan.

Kebutuhan air untuk tanaman didefinisikan sebagai tebal air yang dibutuhkan untuk memenuhi kehilangan air melalui evapotranspirasi (E_{Tc}) pada pertanaman yang sehat dan tumbuh pada lingkungan yang tidak memiliki faktor pembatas pertumbuhan, sehingga tanaman dapat mencapai produktivitas potensialnya (5).

Lebih lanjut Doorenbos dan Pruitt (5), merekomendasikan pendugaan E_{Tc} harus memperhatikan (1) faktor pengaruh iklim dan (2) pengaruh karakter tanaman, sehingga dapat diformulasikan sebagai berikut.

$$E_{Tc} = k_c \cdot E_{To} \quad (5)$$

k_c : Koefisien tanaman;
 E_{To} : Evapotranspirasi referensi

Nilai k_c bervariasi tergantung pada umur dan fase perkembangan tanaman. Menurut Al-Kaisi et al. (1989) dalam Brisson et al. (1), nilai E_{Tc} berkaitan dengan luas penutupan tajuk (LAI), sehingga k_c bervariasi terhadap nilai LAI.

Secara praktis, nilai E_{To} didekati dari perhitungan evapotranspirasi potensial, E_{Tp} (9) yang merupakan gambaran kebutuhan

atmosfir untuk penguapan serta batas atas dari evapotranspirasi aktual (E_{Ta}). E_{Tp} umumnya diduga dari unsur-unsur iklim. Dari beberapa metode penghitungan E_{Tp} , metode Penman (10), merupakan metode yang paling luas penggunaannya, karena hasil perhitungannya memiliki bias yang paling kecil (5).

Secara aktual, E_{Tc} adalah jumlah transpirasi tajuk tanaman (T_a) dan evaporasi dari permukaan tanah (E_a), sehingga dapat diasumsikan nilai E_{Tc} kelapa sawit berkaitan dengan luas penutupan tajuk tanaman (LAI). Berikut ini disajikan deduksi penetapan koefisien tanaman (k_c):

$$E_{Tc} = T_a + E_a \quad (6)$$

Substitusi Persamaan (5) ke Persamaan (6) didapatkan,

$$T_a + E_a = k_c E_{To} \quad (7a)$$

sehingga,

$$k_c = (T_a + E_a) / E_{To} \quad (7b)$$

$$= E_{Ta} / E_{To}$$

E_{Ta} : Laju evapotranspirasi aktual

Menurut Al-Kaisi et al. (1989) dalam Brisson et al. (1), determinasi koefisien tanaman yang mengikuti Pers. (7b) hanya berlaku pada kondisi penutupan tajuk yang penuh (nilai LAI > 5), sehingga untuk k_c pada kondisi LAI < 5, maka harus dilakukan koreksi, seperti yang disajikan persamaan (8) berikut :

$$k_c = f(LAI) \cdot E_{Ta} / E_{To} \quad (8)$$

$$= \exp(-k LAI(i)) + ((LAI(i) / 5) \cdot E_{Ta} / E_{To})$$

k : koefisien pemadaman kelapa sawit;

LAI (i) : Indeks luas daun di bawah 5;

ETa : Transpirasi aktual yang ditentukan pada LAI ≥ 5

Aspek yang juga diperhatikan dalam pengembangan sistem irigasi pada suatu wilayah adalah aspek agronomis. Aspek agronomis yang dilibatkan dalam program irigasi berhubungan dengan 4 hal yaitu (1) penentuan jumlah air yang harus ditambahkan ke pertanaman (irigasi neto, In) sehingga tanaman dapat tumbuh dengan optimal, (2) penentuan jumlah air yang harus dipasok sistem irigasi secara keseluruhan (V), (3) Frekuensi pemberian air (i), dan (4) penentuan saat atau waktu yang tepat untuk melaksanakan pemberian air. Determinasi ke-4 hal tersebut mengikuti Doorenbos dan Pruitt (5), yang secara ringkas dipaparkan pada persamaan (9).

Kebutuhan air irigasi neto (In, mm bulan⁻¹) merupakan air irigasi yang harus ditambahkan ke sistem pertanaman apabila jumlah air pada sistem peratanaman sudah tidak mencukupi untuk memenuhi kebutuhan ETc.

$$In = ETc + (P - GW - SW) \dots\dots\dots (9)$$

ETc : Evapotranspirasi tanaman (mm bulan⁻¹);

P : Curah hujan (mm bulan⁻¹);

GW : Ground water (mm bulan⁻¹);

SW : Cadangan air tanah (mm bulan⁻¹)

Kebutuhan air untuk sistem irigasi (V, m³ha⁻¹ bulan⁻¹) memperhitungkan kebutuhan air untuk mencukupi air irigasi neto (In) dan air yang hilang di sepanjang jaringan distribusi, sehingga dalam menghitung nilai V ini, maka faktor efisiensi irigasi telah dimasukkan.

$$V = (10/ Ep) (A In/ 0.70) \dots\dots\dots (10)$$

Ep : Efisiensi irigasi;

A : Luas areal irigasi (ha);

In : Kebutuhan air irigasi (mm bulan⁻¹)

Frekuensi pemberian air (i) merupakan Jarak pemberian air pada suatu waktu ke waktu pemberian berikutnya dalam suatu periode waktu.

$$i = (p. Sa). D/ ETc \dots\dots\dots (11)$$

p : fraksi air tanah yang dapat digunakan tanaman (%);

Sa : Tebal kadar air tanah pada kapasitas lapang (mm);

D : Jeluk perakaran aktif (m);

ETc : Evapotranspirasi tanaman harian (mm hari⁻¹).

Saat pemberian air merupakan penentuan awal pemberian air melalui sistem irigasi pada suatu musim pertumbuhan. Penentuan saat pemberian air yang optimal dilakukan dengan memperhatikan cadangan air tanah, curah hujan dan Laju ETc bulanan.

Penelitian lapang

Penelitian lapang dilakukan di kebun Bah Jambi, PTPN IV, Kabupaten Simalungun, Sumatera Utara, (2°59' lintang utara, 99°13' bujur timur, 369 m di atas permukaan laut), selama satu tahun (Maret 1996 - Maret 1997). Lokasi penelitian memiliki tipe iklim Af (klasifikasi Koppen), dengan curah hujan 2800 mm tahun⁻¹, radiasi surya 5900 MJ m⁻² tahun⁻¹, dan suhu harian 27,4°C (1972 - 1994). Jenis tanahnya termasuk ordo ultisol dengan tekstur lempung berpasir (11).

Bahan tanaman yang digunakan adalah klon MK 60, tahun tanam 1990 dengan jumlah populasi 130 pohon ha⁻¹. Alat penelitian yang digunakan dalam

penelitian meliputi alat yang digunakan untuk mengukur laju transpirasi tajuk tanaman, laju evaporasi tanah di bawah tajuk, dan luas tajuk tanaman (LAI). Pengukuran laju transpirasi mengikuti metode yang dilakukan Dufrene *et al.* (6), menggunakan seperangkat alat porometer tipe Licor-1600. Pengukuran dilakukan pada pelepah daun ke- 9, 17 dan 25 pada 12 pohon contoh yang sehat. Pengukuran dilakukan setiap 2 minggu sekali. Pengukuran evaporasi tanah dilakukan setiap hari pada pukul 07.00 WIB, menggunakan mikrolisimeter. Pengukuran luas daun mengikuti metode non-destruktif (3) dilakukan setiap 2 minggu, menggunakan alat pengukur panjang (meteran). Pengukuran luas daun juga dilakukan di luar plot penelitian untuk mendapatkan nilai LAI pada berbagai umur tanaman. Di samping itu untuk mengetahui koefisien pemadaman (k), maka dilakukan pengukuran penerusan radiasi surya yang melewati tajuk pada tanaman kelapa sawit muda dengan LAI yang relatif kecil (sekitar 2) dan pada tanaman kelapa sawit dewasa dengan penutupan tajuk yang penuh (LAI sekitar 5). Pengukuran koefisien k , dilakukan dengan menggunakan solarimeter tabung. Solarimeter diletakan di bawah tajuk dalam susunan segitiga sama sisi mengikuti susunan pola pertanaman dengan 9 titik pengamatan. Sedangkan pengukuran di puncak tajuk dilakukan pada wilayah yang terbuka.

Untuk menghitung evapotranspirasi potensial (ETp) yang menggunakan metode Penman (1948) diperlukan data cuaca yang dicatat di Stasiun Meteorologi Khusus pertanian Balai Penelitian Marihat, yang terletak sekitar 2,5 km dari lokasi penelitian. Data yang dicatat tersebut antara lain curah hujan (mm hari⁻¹), suhu udara rerata (°C hari⁻¹), lama penyinaran

(jam hari⁻¹), kelembaban udara (%hari⁻¹), dan kecepatan angin (km hari⁻¹). Untuk mengaplikasikan pendugaan kebutuhan air untuk tanaman kelapa sawit di lapang maka disusun skenario pengembangan sistem irigasi di wilayah Lampung, sehingga diperlukan data-data pendukung terutama data cuaca wilayah Lampung pada umumnya yang diperoleh dari stasiun cuaca di Pelabuhan Udara Beranti selama 10 tahun terakhir (1987 - 1996).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Evaporasi tanah (Ea)

Hasil pengukuran laju evaporasi tanah di bawah tajuk berindeks luas daun 4,9 - 5,1 disajikan pada Gambar 1a. Hasil pengukuran menunjukkan laju evaporasi tanah aktual berkisar antara 0,1 mm - 1,5 mm hari⁻¹ yang merupakan 2 - 20 % (rerata 18 %) dari nilai evapotranspirasi referensi (ETo) (Gambar 1b). Evaporasi tanah tergantung transmisi energi radiasi surya melalui tajuk tanaman, sehingga diperlukan informasi penutupan tajuk (koefisien pemadaman). Penentuan koefisien pemadaman (extinction coefficient, k) didasarkan hukum Beer mengenai transmisi radiasi surya melalui tajuk tanaman, yang diformulasikan sebagai berikut :

$$I_t = I_o e^{(-k LAI)} \dots \dots \dots (12)$$

- I_t : Radiasi surya yang sampai ke permukaan tanah;
 I_o : Radiasi di puncak tajuk.

Nilai I_t dan I_o diukur dalam waktu bersamaan menggunakan solarimeter tabung dalam satuan energi mikro volt (mV). Hasil pengukuran transmisi energi surya disajikan pada Gambar 2. Hasil

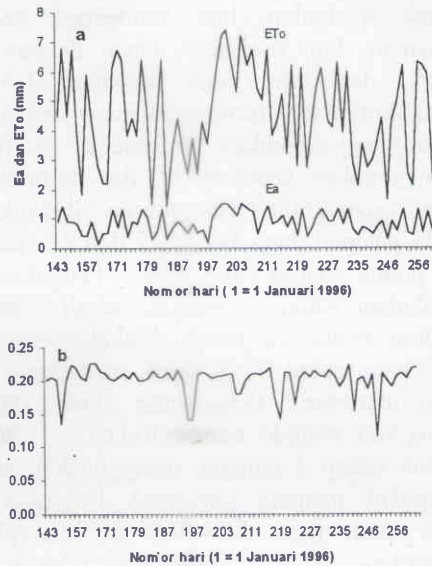
penghitungan koefisien pepadaman (k), menunjukkan bahwa tajuk kelapa sawit memiliki koefisien pepadaman 0.32. Radiasi surya yang ditransmisikan oleh tanaman dewasa (LAI 5-6) relatif kecil (18 - 20 %) dibandingkan dengan tanaman muda (LAI 2) (45 - 55 %) (Gambar 2), hal ini menyebabkan evaporasi atau pengeringan tanah di bawah tajuk tanaman muda relatif cepat.

Transpirasi tanaman (T_a)

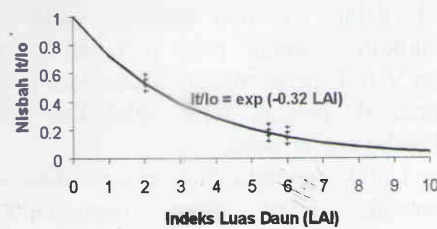
Hasil pengukuran menunjukkan bahwa laju transpirasi tajuk tanaman berkisar antara 1,7 - 5,7 mm hari⁻¹ (Gambar 3a) dan merupakan 60 - 80 % (rerata 75 %) dari nilai evapotranspirasi referensi (ETo) (Gambar 3b). Dufrene *et al.* (1992) melaporkan hasil yang tidak jauh berbeda dengan hasil pengukuran tersebut, yaitu sekitar 72 % dari ETo pada lokasi yang tidak mengalami defisit air tanah di wilayah Afrika Barat. Sedangkan pada musim kering laju transpirasi menurun hingga hanya mencapai 35 - 36 % dari ETo.

Evapotranspirasi aktual (ETa)

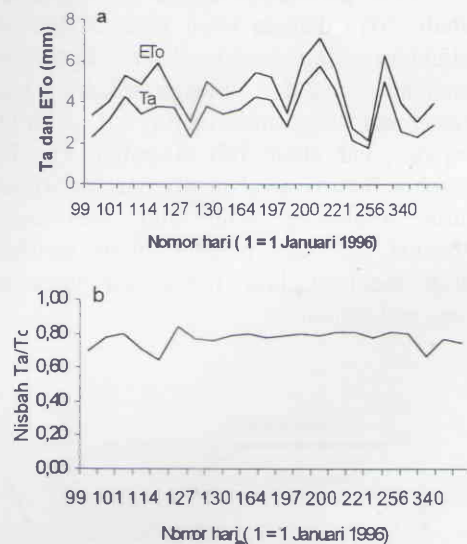
Hasil perhitungan evapotranspirasi aktual (ETa) yang merupakan penjumlahan evaporasi dan transpirasi menunjukkan bahwa nilai ETa di bawah kondisi penutupan tajuk antara 4,9 - 5,1 adalah 93 % (18 % Ea dan 75 % Ta) dari ETo, sehingga nilai koefisien tanaman (k_c) pada kondisi tersebut adalah 0.93. Sedang nilai koefisien pada kondisi penutupan lainnya akan ditentukan oleh derajat penutupan tajuknya (nilai LAI).



Gambar 1. Hasil pengukuran laju evaporasi tanah aktual harian (Ea) dan laju evaporasi referensi ETo (a) dan nisbah laju evaporasi tanah aktual terhadap evapotranspirasi referensi (b)



Gambar 2. Kurva transmisi radiasi surya pada berbagai penutupan tajuk



Gambar 3. Hasil pengukuran laju transpirasi tanaman aktual harian (Ta) dan laju evaporasi referensi ETo (a) dan nisbah laju transpirasi tanaman aktual terhadap evapotranspirasi referensi (b)

Kebutuhan air untuk pertumbuhan tanaman

Kebutuhan air untuk pertumbuhan tanaman diduga dari nilai evapotranspirasi referensi (ETo) dan nilai koefisien tanaman (kc), yang didapat dari hasil pengukuran (untuk tanaman yang tajuknya relatif telah menutupi permukaan tanah, $LAI \geq 5$) dan hasil perhitungan menggunakan Persamaan (8) (untuk $LAI < 5$). Dengan asumsi pertumbuhan tanaman berlangsung optimal dan tanpa defisit air, pengamatan kebutuhan air telah dilakukan di Kebun Bah Jambi, Sumatera Utara.

Kebutuhan air yang optimum untuk pertumbuhan kelapa sawit berkisar antara 120 - 140 mm setiap bulan (Tabel 1). Hal

ini berarti pertanaman kelapa sawit pada wilayah yang memiliki curah hujan bulanan < 120 mm akan mendapatkan cekaman air, sehingga pertumbuhannya kurang optimal.

Aplikasi pendugaan kebutuhan air dalam pengembangan sistem

Untuk contoh aplikasi, dimisalkan akan dikembangkan sistem irigasi di wilayah Lampung untuk mengairi pertanaman kelapa sawit dewasa dengan umur > 7 tahun. Pengembangan sistem irigasi tersebut memerlukan informasi aspek agronomis meliputi : (1) penentuan jumlah air yang harus ditambahkan ke pertanaman (irigasi neto, In) sehingga tanaman dapat tumbuh dengan optimal, (2) penentuan jumlah air yang harus dipasok sistem irigasi secara keseluruhan (V), (3) frekuensi pemberian air (i), dan (4) penentuan saat atau waktu yang tepat untuk melaksanakan pemberian air.

Kebutuhan air irigasi neto (In, mm bulan⁻¹)

Kebutuhan irigasi dihitung berdasar Persamaan (9). Dengan asumsi bahwa sumber pasokan air alami hanya diperoleh dari curah hujan, sedangkan pasokan air dari ground water (GE) dan cadangan air tanah (SW) dapat diabaikan. Data curah hujan dan perhitungan ETo merupakan data rerata pengamatan selama 10 tahun (1987 - 1996). Hasil perhitungan kebutuhan air irigasi neto (In) disajikan pada Tabel 2.

Kebutuhan air untuk memasok sistem irigasi (V, m³ ha⁻¹ bulan⁻¹)

Perhitungan kebutuhan air untuk sistem irigasi berdasarkan Persamaan (10). Perhitungan dilakukan atas 2 metode pemberian air yaitu saluran terbuka

(Furrow and Flatbed system) dan saluran tertutup (Sprinkler dan Drip system).

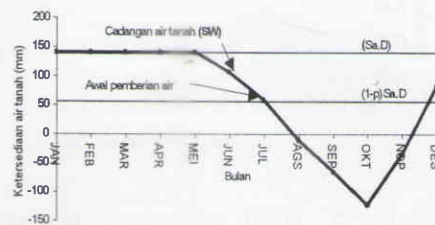
Frekuensi pemberian air (i)

Pada perhitungan I_s diasumsikan bahwa fraksi air tersedia yang dapat digunakan untuk proses transpirasi tanaman (p) adalah 60 %. Sedangkan kapasitas air yang tersedia pada kapasitas lapang sampai kedalaman 1 m (S_a) adalah 140 mm (tekstur tanah adalah medium). Perakaran yang aktif diperkirakan sampai jeluk 1 m (D), dan ET_c harian rerata adalah 4,3 mm. Hasil perhitungan jarak waktu pemberian air tersebut adalah 19 hari.

Saat pemberian air

Pemberian air dilakukan secara grafis. Awal pemberian air terjadi apabila cadangan air tanah (SW) yang berasal dari curah hujan pada suatu bulan telah turun hingga menyamai nilai batas terendah tebal air tanah yang masih bisa digunakan untuk transpirasi tanaman ($(1 - p) \cdot S_a \cdot D$). Untuk selanjutnya penetapan awal pemberian air tersebut dapat ditentukan berdasar grafis pada Gambar 4.

Titik pertemuan antara cadangan air tanah (SW) dengan tebal ketersediaan air minimum yang masih dapat digunakan tanaman untuk menghasilkan laju transpirasi yang maksimum ($(1 - p) \cdot S_a \cdot D$) terjadi pada akhir Juli (Gambar 4). Hal tersebut berarti awal pemberian air irigasi harus dilakukan akhir Juli atau awal Agustus, sehingga pemberian air tersebut tetap menjaga laju transpirasi tanaman yang maksimum.



Gambar 4. Fluktuasi cadangan air tanah (SW) tahunan di wilayah Lampung (1987 - 1996)

Tabel 1. Kebutuhan air untuk pertumbuhan pada berbagai umur tanaman kelapa sawit

Umur (Tahun)	Indeks Luas Daun (LAI)	Koefisien Tanaman (kc)	$ET_o^{*)}$ (mm hari ⁻¹)	Kebutuhan Air (ETc)	
				mm hari ⁻¹	mm bulan ¹
< 2	1,8	0,82	5	4,10	123,0
2 - 2,9	3,1	0,83	5	4,15	124,5
3 - 4,9	4,0	0,86	5	4,30	129,0
5 - 6,9	4,9	0,92	5	4,60	138,0
7 - 8,9	5,1	0,93	5	4,65	139,5
≥ 9	6,4	0,93	5	4,65	139,5

^{*)} Nilai rerata harian selama setahun, yang dihitung menggunakan metode Penman

Tabel 2. Hasil perhitungan kebutuhan air irigasi neto (In) untuk kelapa sawit berumur > 7 tahun di wilayah Lampung

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Curah hujan (mm)	425	340	300	170	140	90	80	60	70	75	210	250
ET _o (mm)	142	127	140	135	138	134	138	139	135	142	133	142
kc	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
ET _c (mm bulan ⁻¹)	132	118	138	125	128	124	128	129	125	132	123	132
ET _c (mm hari ⁻¹)	4,4	3,9	4,6	4,2	4,3	4,1	4,3	4,3	4,2	4,4	4,1	4,4
In (mm)	0	0	0	0	0	34	48	69	55	57	0	0

Tabel 3. Hasil perhitungan kebutuhan air untuk memasok sistem irigasi (V, m³ ha⁻¹ bulan⁻¹) untuk kelapa sawit berumur > 7 tahun di wilayah Lampung

	BULAN											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Saluran terbuka (Furrow and Flatbed System)	0	0	0	0	0	1210	1710	2460	1960	2030	0	0
Saluran tertutup (Sprinkler and Drip system)	0	0	0	0	0	970	1370	1970	1570	1630	0	0

KESIMPULAN

Hasil pengukuran dan perhitungan koefisien tanaman (kc) kelapa sawit di lapang menunjukkan bahwa nilai kc berkisar antara 0,82 (tanaman muda, LAI <2) sampai 0,93 (tanaman dewasa, LAI > 5). Tebal kebutuhan air untuk pertumbuhan kelapa sawit di lapang berkisar antara 4,00 – 4,65 mm hari⁻¹ atau sekitar 120 – 140 mm bulan⁻¹. Pada wilayah yang diasumsikan tidak memiliki faktor pembatas (lahan kelas 1), sehingga dapat diasumsikan bahwa penetapan kebutuhan air tersebut merupakan kebutuhan air yang optimal untuk pertumbuhan kelapa sawit di lapang.

Dari skenario pengembangan irigasi di wilayah Lampung, maka diketahui bahwa pemberian air melalui sistem irigasi

harus dilakukan pada akhir Juli atau awal Agustus sampai akhir Oktober. Air yang dibutuhkan sistem irigasi yang menggunakan metode saluran terbuka berkisar antara 1.960 – 2.460 m³ ha⁻¹ bulan⁻¹ dengan puncaknya pada Agustus (2.460 m³ ha⁻¹ bulan⁻¹). Sedang air yang dibutuhkan sistem irigasi yang menggunakan saluran tertutup (sprinkler dan drip) berkisar antara 1.570 – 1.970 m³ ha⁻¹ bulan⁻¹, dengan puncaknya pada Agustus (1.970 m³ ha⁻¹ bulan⁻¹). Jarak waktu antar pemberian air (frekuensi) adalah 19 hari.

Penentuan koefisien tanaman (kc) untuk tanaman yang memiliki kerapatan tajuk <5 pada penelitian ini dilakukan dengan perhitungan, sehingga memerlukan klarifikasi dengan cara membandingkannya dengan pengukuran langsung.

DAFTAR PUSTAKA

1. BRISSON, N.B. SEGUIN, and P. BERTUZI. 1992. Agronomical soil water balance for crop simulation models. *Agric. For. Meteorol.* 59 : 267 - 287
2. CHARLES-EDWARDS, D.A., D. DOLEY, and G.M. REMINGTON. 1986. *Modelling Plant Growth and Development*. Academic Press, Sydney. 235 p
3. CORLEY, R.H.V., J.J. HARDON, and G.Y. TAN. 1970. Analysis of growth of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq) I. Estimation of growth parameter and application in breeding. *Euphytica* 20 : 307 - 315.
4. DENMEAD, O.T. and B.D. MILLER. 1976. Water transport in wheat plants in field. *Agronomy Journal*. 68 :297 - 303.
5. DOORENBOS, J., and W.O. PRUITT. Guidelines for predicting crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper*. 144 p
6. DUFRENE, E., B. DUBOS, H. REY, P. QUENCEZ, and B. SAUGIER. 1992. Changes in evapotranspiration from an oil palm stand (*Elaeis guineensis* Jacq) exposed to seasonal soil water deficit. *Acta Ecologica* 13 (3): 299 - 314.
7. HANDOKO. 1992. *Analysis and simulation of water-nitrogen interactions of wheat crop*. The University of Melbourne. Ph.D thesis. 210 p.
8. HENSON, I.E. and K.C. CHANG. 1990. Evidence for water as a factor limiting performance of field palms in West Malaysia, *Proc. of 1989 Int. P.O. Dev. Conference, Modul II-Agriculture*: 487-498
9. IMPRON, P. dan HANDOKO. 1994. Evapotranspirasi, p 123 - 131. In Handoko (Ed) *Klimatologi Dasar Landasan Pemahaman Fisika Atmosfir dan Unsur-unsur Iklim*. Jurusan Geofisika dan Meteorologi, FMIPA-IPB.
10. PENMAN, H.C.1948. Natural evaporation for open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc. London* 193 : 120 - 146.
11. SUTEDJO, K.,E.L. TOBING, dan P. PURBA. 1979, *Laporan Pemetaan Tanah Perkebunan PNP VII, MRS, Pematang Siantar*.
12. TURNER, P.D. 1977. Effects of drought on oil palm yields in South East Asia and the South Pasific Region, p. 673-694. *In* D.A. Earp and W. Newall (Ed.) *International development in oil palm*. Incorporated Society of Planters, Kuala Lumpur.
13. VAN KRAALINGEN, D.W.G., C.J. BREURE, and T. SPITTERS. 1989. Simulation of oil palm growth and yield. *Agric. and Forest Meteorol.* 46: 227 - 244.

Estimation of water requirement for oil palm growth in the field and its application to the development of irrigation system

Iman Yani Harahap and Witjaksana Darmosarkoro

Abstract

A study was carried out to determine coefficient at different stages of growth on oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq). The coefficient was then used to calculate water requirement for growth which in turn could be used as the basis for developing irrigation system of oil palm plantation. The study covered (1) measurement of water losses both through the canopy (transpiration) and soil surface (evaporation), (2) measurement of leaf area index (LAI) on different stages of growth, and (3) calculating evapotranspiration reference. The water losses was measured in an estate containing mature palms (6 to 7 years old) with LAI of 4.9 to 5.1. The study was carried out at Bah Jambi Estate, Simalungun, North Sumatera, which has Af type of climate (based on Koppen classification) and no water deficit. The results were then used to estimate water requirement for an irrigation system proposed for an estate in Lampung. It was found that the k_c for the palm varied from 0.82 (LAI < 2) to 0.93 (LAI > 5). Using these information the estimated amount of water required for growth was 4.00 to 4.65 mm per day or 120 to 140 mm per month. The scenario of irrigation developed for Lampung indicated that the estate should be irrigated in late July or early August and ended in late October. The irrigation with open channel system required 1960 to 2460 m³ of water per ha per month (peaked in August) while the closed system (sprinkler and drip) consumed only 1570 to 1970 m³ (peaked also in August). Water should be applied every 19 days.

Key words : oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq), plant coefficient (k_c), water requirement for growth, transpiration, evaporation, irrigation system, scenario

Introduction

Oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq) development becomes more important in Indonesia since downstream industries using palm oil continue to grow. The objectives of development programs of increasing palm oil production are to meet local industrial demand and export. One of strategies to increase the production is to improve the productivity of the palms.

Solar radiation will determine the production of biomass, known as potential of productivity, given an optimal environment. Actual productivity, however, depends not only on the radiation, but also on other factors including water availability. When all environmental factors are

optimum, actual productivity will rely on the efficiency of the palms to convert solar energy into dry matter which is known as the efficiency of solar radiation utilization (8). Therefore, one of the major objectives in agronomic practices is to increase the efficiency.

Many factors affect are the efficiency including genotype, soil nutrition, and water supply. Assuming that oil palms were well maintained as they are commonly fertilized, the efficiency then will change depending on water availability in the soil. Dry and rainy seasons which determine water availability in the soil are the main factor affecting oil palm production (12). The aim of the study was to calculate the optimal amount of water

required for oil palm growing in the field and to apply the results to rationalize an irrigation system in oil palm estate.

Materials and Methods

Theoretical base

It is assumed that the function of a plant is basically to convert solar energy through photosynthesis into chemical energy which is more stable and available for plant growth (2). This assumption is then expressed in the following simple equation:

$$dW = e Ri - Rs \quad (1)$$

- dW : biomass production for growth;
 Ri : the amount of radiation intercepted by the canopy;
 Rs : losses during respiration;
 e : efficiency of solar radiation utilization.

The efficiency (e) is the function of plant maintenance (agronomic practices), fertilization, planting material, and water availability. In the present study all factors except water were assumed at optimal levels, then the e depended only on water availability.

The e was calculated using the following equation based on the maximum value of e in oil palm (13):

$$e = 12.9 \min (f\Gamma) 10^{-9} \text{ kg CO}_2 \text{ J}^{-1} \quad (2)$$

$f\Gamma$: conductivity of stomata

The value for $f\Gamma$ was derived from the ratio of actual conductivity (Γ_a) to the maximum conductivity (Γ_m) (7).

$$f\Gamma = \Gamma_a / \Gamma_m \quad (3)$$

Γ_a (mm s^{-1}) was obtained from actual transpiration (T_a), while Γ_m (mm s^{-1}) was derived from solar radiation (Q_s). They were calculated using empirical functions developed by Denmead and Miller (4) which were simplified as:

$$\Gamma_a = f(T_a) \quad (4a)$$

$$\Gamma_m = f(Q_s) \quad (4b)$$

Deductions elaborated above indicates that plant growth is controlled by the utilization efficiency of solar radiation which is determined by stomatal conductivity. Moreover, the conductivity is the function of the actual transpiration rate (T_a) and the climates (radiation, Q_s). It is therefore not surprising that Doorenbos and Pruitt (5) has first considered that transpiration is the main factor in determining water requirement for plant growth, besides the amount of water evaporated through the soil surface. The amount of water used to assimilate carbon in photosynthesis can be neglected since it is relatively very small (less than 2% of evapotranspiration).

Water requirement is defined as the amount (expressed as thickness) of water needed to meet water losses through evapotranspiration (ET_c) on healthy crop which grows in an environment without limiting factors for achieving potential productivity (5). Therefore, they recommended that when estimating the ET_c one should consider climate and plant characteristics, which can be expressed in the following equation:

$$ET_c = k_c \cdot E_{to} \quad (5)$$

where

k_c : plant coefficient;
 E_{To} : reference of evapotranspiration.

The value of k_c varies depending upon the age and developmental stage of the plant. According to Al-Kaisi et al. in Brisson et al. (1) E_{Tc} depends on LAI.

Practically, E_{To} is derived from potential evapotranspiration, E_{Tp} (9) which indicates atmospheric demand for vapor as well as the limit of actual evapotranspiration (E_{Ta}). E_{Tp} is commonly estimated from climate components. Penman (10) introduced the best and widely used method of calculating the E_{Tp} because it produces the least bias compared to those of other methods (5).

E_{Tc} is actually the sum of water transpired by the canopy (T_a) and evaporation from the soil surface (E_a) (5), therefore the E_{Tc} of oil palm depends on (LAI) and in turn k_c varies accordingly to the LAI. This relation is expressed as:

$$E_{Tc} = T_a + E_a \dots\dots\dots (6)$$

Substitute equation (5) into (6) to result:

$$T_a + E_a = k_c E_{To} \dots\dots\dots (7a)$$

Therefore,

$$k_c = (T_a + E_a) / E_{To} \dots\dots\dots (7b)$$

$$= E_{Ta} / E_{To},$$

where

E_{Ta} : the rate of actual evapotranspiration;
 E_{To} : evapotranspiration reference.

According to Al-Kaisi et al. cited in Brisson et al. (1) the equation can only be applied for plantation with full canopy coverage (LAI > 5). Therefore, calculation

for k_c with LAI < 5 needs to be adjusted as follow:

$$k_c = f(LAI) \cdot E_{Ta} / E_{To} \dots\dots\dots (8a)$$

$$= \exp(-k \text{ LAI}(i)) + ((\text{LAI}(i) / 5) \cdot E_{Ta} / E_{To}) \dots\dots\dots (8b)$$

where

k : extinction coefficient of oil palm;
 $\text{LAI}(i)$: leaf area index < 5;
 E_{Ta} : actual transpiration under condition of LAI ≥ 5;
 E_{To} : evapotranspiration reference.

The agronomical aspect of a region should be considered if an irrigation system would be developed. The aspect covers (1) the amount of water to be applied to the crop (net irrigation, I_n) for an optimal growth, (2) the amount of water supply for the whole irrigation system (V), (3) frequency of watering (i), and (4) time of watering. Doorenbos and Pruitt (5) introduced method to determine those four points which can be simplified.

Water required for net irrigation (I_n , mm per month) is the amount of water to be applied to the crop system when the amount of water available is insufficient to meet E_{Tc} .

$$I_n = E_{Tc} - (P + GW + SW) \dots\dots\dots (9)$$

where

E_{Tc} : evapotranspiration (mm month⁻¹);
 P : rain fall (mm month⁻¹);
 GW : ground water (mm month⁻¹);
 SW : reserve of soil water (mm month⁻¹)

The amount of water required for the whole irrigation system (V , m³ ha⁻¹ month⁻¹) must include water for net irrigation (I_n) and loses in the distribution network, therefore, efficiency should be included in determining V :

$$V = (10 / E_p) (A \ln / 0.70) \dots \dots \dots (10)$$

where

E_p : efficiency of irrigation;

A : irrigated area (ha);

$\ln$: water required for irrigation (mm month⁻¹)

Frequency of watering (i) is the time between subsequent waterings.

$$i = (p \cdot S_a) \cdot D / E_{tc} \dots \dots \dots (11)$$

where,

p : proportion of soil water available for the crop (%);

S_a : the amount of water at field capacity (mm);

D : depth of active roots (m);

E_{tc} : daily evapotranspiration (mm day⁻¹).

Time of watering is the start of irrigating within a growth system. The optimal watering can be predicted by observing the reserve of soil water, rain fall and monthly E_{tc} .

Field study

The study was carried out in Bah Jambi Estate, PTPN IV, Simalungun, North Sumatra, (2°59' N, 99°13' E, 369 m above sea level) for one year (March 1996 to March 1997). The area is Af (according to Koppen classification) with rain fall of 2800 mm year⁻¹, radiation 5900 MJ m⁻² year⁻¹, and daily temperature of 27.4°C (average of 1972 to 1994). The soil is ultisol with sandy loam texture (11).

The palms used in the study were MK 60 clone planted in 1990 with population of 130 palms per ha. Transpiration rate was measured according to Dufrene et al. (6) using porometer (Licor-1600). Measure-

ment was taken fortnightly on frond number 9, 17 and 25 for 12 healthy palms. Evaporation was measured daily at 7.00 am using microlisimeter. The LAI was determined nondestructively (3) every other week. Leaf area was also measured outside the experimental plots to determine LAIs of palms with different age. In order to determine the extinction coefficient (k), measurement was taken to see the amount of radiation penetrated the canopy of young palms with relatively small LAI (ca. 2) and of mature palms with complete canopy coverage (LAI of ca. 5). The coefficient was determined using solarimeter. The equipment was placed under the canopy with triangle configuration to match planting system with nine points of observations. Similar measurement was also undertaken at open ground to match that on the top of the canopy.

Potential evapotranspiration (E_{tp}) was calculated according to Penman (10) using data from Meteorology Station of Marihat Research Station located ca. 2.5 km from experiment site. The data used included rain fall, air temperature, photoperiod, humidity and wind velocity.

The results were then used to estimate water required for an irrigation of oil palm plantation in Lampung. A scenario was developed for the irrigation using climate data (1987 to 1996) obtained from the station at Beranti Airport.

Results and Discussion

Evaporation (E_a)

The evaporation of soil under the canopy with LAI 4.9 to 5.1 is shown in Fig. 1a. The rate of evaporation varied from 0.1 to - 1.5 mm day⁻¹ and this was only 2 to 20 % (average 18 %) of the

reference of evapotranspiration (ET_o) (Fig. 1b).

Since evaporation depends on the transmission of solar energy through the canopy, it is necessary to determine the extinction coefficient (k), which is according to Beer's Law, can be expressed as:

$$I_t = I_o e^{(-k \text{ LAI})} \quad (12)$$

where

I_t : radiation intercepted on the ground;

I_o : radiation on the canopy;

LAI : leaf area index.

The I_t and I_o were measured at the same time using solarimeter. Ratio of I_t to I_o is shown in Fig. 2. It was then calculated that the extinction coefficient (k) was 0.32. The amount of radiation transmitted by the mature palms (LAI 5 to 6) was relatively small (18 to 20%) as compared to 45 to 55% on young palms (LAI 2) (Fig. 2). This fact indicates that evaporation or soil drying was greater in young palms.

Transpiration (Ta)

The transpiration rate varied from 1.7 to 5.7 mm day⁻¹ (Fig. 3a) which was 60 to 80 % (average 75 %) of evapotranspiration reference (ET_o) (Fig. 3b). Similar results (average 72 %) as in an area which was free from water deficit in West Africa (Dufrene et al 1992). The rate of transpiration in the present study was halved (35 to 36 % of ET_o) during dry season.

Actual evapotranspiration (ETa)

The ETa (the sum of evaporation and transpiration) was 93 % (18 % Ea and 75

% Ta) of ET_o if the LAI was 4.9 to 5.1. Under such condition the plant coefficient (kc) was 0.93. The coefficient of palms with different canopy coverage varied depending on LAI.

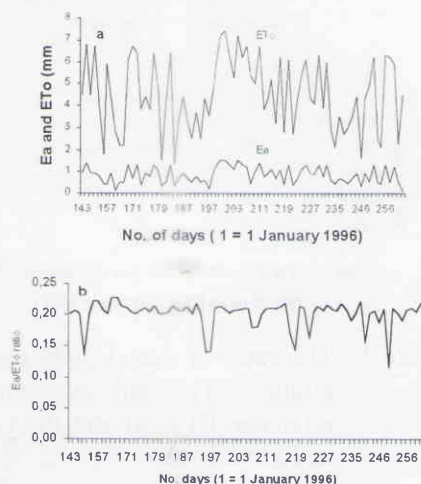


Figure 1. Actual daily evaporation (Ea) and evaporation rate of reference ET_o (a) and the ratio of Ea to ET_o (b).

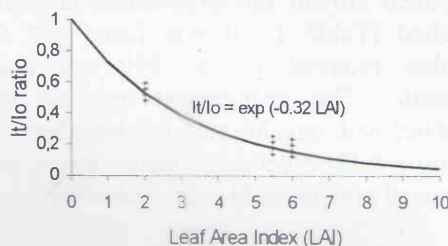


Figure 2. Radiation transmission on various LAI

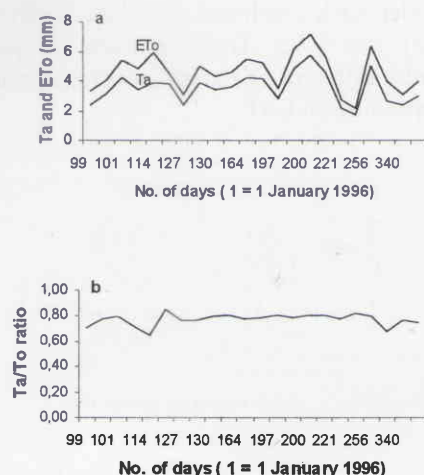


Figure 3. The rates of actual daily transpiration (Ta) and evaporation reference ETo (a) and the ratio of Ta to ETo (b)

Water required for oil palm growth

The amount of water required for the growth of oil palms with LAI ≥ 5 was calculated using the equation 8 with the assumption that the palms performed optimal growth and experienced no water deficit (Table 1). It was found that the palms required 120 to 140 mm water month⁻¹. This requirement indicates that estates with monthly rain fall less than 120 mm would experience water stress and optimal growth could not be achieved.

Estimation of water required for an irrigation system proposed for Lampung

It was assumed that the irrigation system was to supply water for mature oil palms (> 7 years old). The system should cover the following agronomical aspects.

Water required for net irrigation (In, mm month⁻¹)

The amount of water required for net irrigation was estimated (Table 2) using the equation 9 with the assumption that the water supply for the palms was rain only, whereas ground water and soil water reserve were.

Water required to supply the need of the whole irrigation system

The amount of water required for the whole irrigation system was calculated using the equation 10, which was done for 2 methods of watering, i.e. open channel (furrow and flatbed system) and closed channel (sprinkler dan drip system). The result of the calculation was presented in Table 3.

Frequency of watering

It was assumed that only 60% of the water available was used by the palms for transpiration. Considering the soil was medium in texture, at field capacity the amount of water was only 140 mm available within the first 1 m of soil profile. The active roots were only up to 1 m of soil profile, while daily Etc was 4.3 mm. Under such conditions it was found that watering should be applied every 19 days.

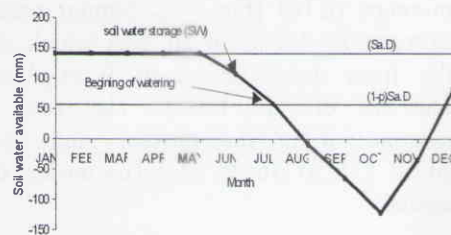


Figure 4. Yearly changes of soil water reserve (SW) in Lampung (1987-1996)

Time of watering

Watering can be started when the reserve of soil water (SW) coming from rain fall has decreased to such level which was equivalent to the minimum amount of

soil water available for transpiration (1 - p). Sa. D) and this happened in late July (Fig. 4). It was then recommended to start watering the palms in late July or early August.

Table 1. Water requirement for optimal growth of oil palm at different age

Age (Year)	Leaf Area Index (LAI)	Plant Coefficient (kc)	ETo [*] (mm day ⁻¹)	Required water (ETc)	
				mm day ⁻¹	mm month ⁻¹
< 2	1.8	0.82	5	4.10	123.0
2 - 2.9	3.1	0.83	5	4.15	124.5
3 - 4.9	4.0	0.86	5	4.30	129.0
5 - 6.9	4.9	0.92	5	4.60	138.0
7 - 8.9	5.1	0.93	5	4.65	139.5
≥ 9	6.4	0.93	5	4.65	139.5

* Average of one year which was calculated according to Penman

Table 2. Water required for net irrigation (In) for oil palms (more than 7 years old) in Lampung

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Rainfall (mm)	425	340	300	170	140	90	80	60	70	75	210	250
ETo (mm)	142	127	140	135	138	134	138	139	135	142	133	142
kc	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
ETc (mm bulan ⁻¹)	132	118	138	125	128	124	128	129	125	132	123	132
ETc (mm hari ⁻¹)	4.4	3.9	4.6	4.2	4.3	4.1	4.3	4.3	4.2	4.4	4.1	4.4
In (mm)	0	0	0	0	0	34	48	69	55	57	0	0

Table 3. Water required for the whole irrigation system in oil palms (more than 7 years old) in Lampung

	Month											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Open Channel (Furrow and Flatbed System)	0	0	0	0	0	1210	1710	2460	1960	2030	0	0
Closed Channel (Sprinkler and Drip system)	0	0	0	0	0	970	1370	1970	1570	1630	0	0

Conclusions

It was found that plant coefficient (kc) of oil palms growing in the field varied from 0.82 (LAI < 2) to 0.93 (LAI > 5). The amount of water required by the palms to grow, calculated using the kc, was 4.00 to 4.65 mm day⁻¹ or 120 to 140 mm month⁻¹ for oil palms growth on land without limiting factors (prime land).

The scenario developed for the oil palms growing in Lampung showed that irrigation should be started in late July or early August and ended in late October. The amount of water required were 1,960 to 2,460 m³ ha⁻¹ month⁻¹ (peaked in August) and 1,570 to 1,970 m³ ha⁻¹ month⁻¹ (peaked in August) for an open and closed irrigation systems, respectively. It was also known that the interval of watering was 19 days.

Crop coefficient (kc) of palms with LAI < 5 in the present study was derived from calculation, therefore further study on obtaining kc through direct measurement is needed to clarify the results.

References

1. BRISSON, N.B. SEGUIN, and P. BERTUZI. 1992. Agronomical soil water balance for crop simulation models. *Agric. For. Meteorol.* 59 : 267 - 287
2. CHARLES-EDWARDS, D.A., D. DOLEY, and G.M. REMINGTON. 1986. *Modelling Plant Growth and Development*. Academic Press, Sydney. 235 p
3. CORLEY, R.H.V., J.J. HARDON, and G.Y. TAN. 1970. Analysis of growth of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq) I. Estimation of growth parameter and application in breeding. *Euphytica* 20 : 307 - 315.
4. DENMEAD, O.T. and B.D. MILLER. 1976. Water transport in wheat plants in field. *Agronomy Journal*. 68 : 297 - 303.
5. DOORENBOS, J., and W.O. PRUITT. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper. 144 p
6. DUFRENE, E., B. DUBOS, H. REY, P. QUENCEZ, and B. SAUGIER. 1992. Changes in evapotranspiration from an oil palm stand (*Elaeis guineensis* Jacq) exposed to seasonal soil water deficit. *Acta Ecologica* 13 (3): 299 - 314.
7. HANDOKO. 1992. Analysis and simulation of water-nitrogen interactions of wheat crop. The University of Melbourne. Ph.D thesis. 210 p.
8. HENSON, I.E. and K.C. CHANG. 1990. Evidence for water as a factor limiting performance of field palms in West Malaysia. *Proc. of 1989 Int. P.O. Dev. Conference, Modul II-Agriculture*: 487-498
9. IMPRON, P. dan HANDOKO. 1994. Evapotranspirasi, p 123 - 131. In Handoko (Ed) *Klimatologi Dasar Landasan Pemahaman Fisika Atmosfir dan Unsur-unsur Iklim*. Jurusan Geofisika dan Meteorologi, FMIPA-IPB.
10. PENMAN, H.C. 1948. Natural evaporation for open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc. London* 193 : 120 - 146.
11. SUTEDJO, K., E.L. TOBING, dan P. PURBA. 1979. *Laporan Pemetaan Tanah Perkebunan PNP VII, MRS, Pematang Siantar*.
12. TURNER, P.D. 1977. Effects of drought on oil palm yields in South East Asia and the South Pasific Region, p. 673-694. In D.A. Earp and W. Newall (Ed.) *International development in oil palm*. Incorporated Society of Planters, Kuala Lumpur.
13. VAN KRAALINGEN, D.W.G., C.J. BREURE, and T. SPITTERS. 1989. Simulation of oil palm growth and yield. *Agric. and Forest Meteorol.* 46: 227 - 244.

ooOoo