

## Topik 3. Prediksi Pengurangan Produksi Akibat Stress Kekurangan Air



### Pendahuluan

TIK mahasiswa memahami tentang: (a) neraca lengas tanah daerah perakaran di lahan beririgasi; (b) perhitungan lama dan selang irigasi; (c) pendugaan pengurangan produksi akibat stress kekurangan air; (d) kemampuan dan kelemahan software CROPWAT

### Bahan Ajar

Bahan Ajar untuk Topik ini terdiri dari: (1) Sifat fisika tanah yang berkaitan dengan irigasi, (2) Manual dan Guidelines CROPWAT (5.7), (3) Respon hasil tanaman terhadap air. Program dan manual CROPWAT-win disimpan di File Tambahan Kuliah Topik 2.

**1. Sifat Fisika Tanah yang Berkaitan Dengan Irigasi**

Tanah adalah suatu sistem tiga fase yang terdiri dari: (a) bahan padat (*solid material*) yang terdiri dari mineral, bahan organik dan senyawa kimia, (b) fase cair (*liquid*) yang disebut sebagai lengas tanah (*soil moisture*); (c) fase gas yang disebut sebagai udara tanah (aerasi). Suatu diagram yang menggambarkan ke tiga fase ini dan proporsinya dalam bentuk massa dan volume terlihat pada Gambar 1 di bawah ini.

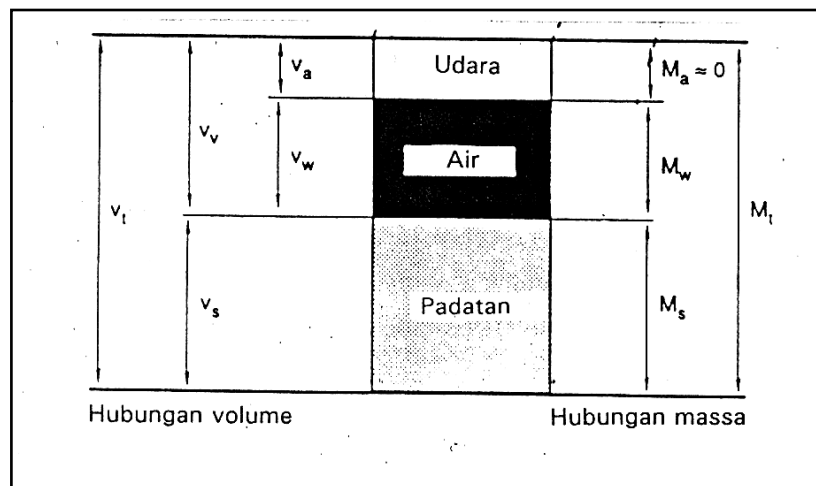
Densitas partikel tanah ( $\rho_s$ ) didefinisikan sebagai  $\rho_s = \frac{M_s}{V_s \rho_w}$  .../1/, disebut juga

sebagai *Real Spesific Gravity* (RSG);  $\rho_w$  = densitas air pada suhu 4<sup>0</sup> C. Densitas tanah adalah massa partikel tanah per unit volume tanah. Untuk tanah mineral densitas tanah sekitar 2,65 g/cc, maka RSG atau TSG (*True Specific Gravity*)  $\approx$  2,65. Untuk tanah organik densitas tanah umumnya antara 1,3 ~ 1,5 g/cc.

*Dry bulk density* (DBD) ( $\rho_b$ ) didefinisikan sebagai nisbah antara massa partikel kering dengan total volume tanah (termasuk padatan dan ruang pori):

$$\rho_b = \frac{M_s}{V_t} = \frac{M_s}{V_s + V_a + V_w} \quad \dots/2/; \text{DBD kadang-kadang disebut juga } \textit{Apparent specific}$$

*gravity* (ASG). Walaupun istilah *specific gravity* menunjukkan suatu unit yang tak bersatuan, angkanya sama dengan DBD karena 1 gram air mengisi volume 1 cc pada suhu normal. ASG dipengaruhi oleh struktur, tekstur dan kepadatan tanah. ASG merupakan sifat fisik tanah yang penting dalam hubungannya dengan kemampuan tanah menahan air dan hantaran hidrolis (konduktivitas hidrolis). Sebagai contoh ASG suatu tanah melebihi 1,7 maka hantaran hidrolisnya sedemikian rendahnya sehingga drainase menjadi sulit.



Gambar 1. Perbandingan massa dan volume masing-masing Fase di dalam tanah

$M_a$ : massa udara (diabaikan),  $M_w$ : massa airtanah,  $M_s$ : massa padatan (solid),  $M_t$ : total massa =  $M_a + M_w + M_s$ ,  $V_a$ : volume udara,  $V_w$ : volume air,  $V_f$ : volume pori =  $V_a + V_w$ ,  $V_s$ : volume padatan,  $V_t$ : total volume tanah =  $V_f + V_s$ .

$$\text{Total (wet) bulk density } (\rho_t): \rho_t = \frac{M_t}{V_t} = \frac{M_s + M_w}{V_s + V_a + V_w} \quad \dots/3/$$

$$\text{Porositas (n): } n = \frac{V_f}{V_t} = \frac{V_a + V_w}{V_s + V_a + V_w} \times 100\% . \quad \dots/4/$$

Porositas dipengaruhi oleh karakteristik tekstur dan struktur tanah. Tanah pasir umumnya mempunyai porositas antara 35% ~ 50%, tanah liat antara 40% ~ 60%.

$$\text{Void ratio (e): } e = \frac{V_f}{V_s} = \frac{V_a + V_w}{V_s} \quad \dots/5/$$

Pori kapiler dan pori non-kapiler

Terdapat dua kelas utama pori tanah yakni pori kapiler dan pori non-kapiler. Pori kapiler mengandung air yang masih tetap tertinggal di sana setelah drainase bebas selesai. Porositas kapiler adalah persentase pori yang diisi oleh air kapiler. Pori non-kapiler mempunyai ruang pori yang lebih besar sehingga air tidak dapat lagi berada di sana karena gaya kapiler. Suatu hubungan antara porositas, void ratio dengan ASG dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\rho_b = \rho_s \left( 1 - \frac{n}{100} \right) \quad /3.6a/; \quad \rho_s = \rho_b (1 + e) \quad \dots/6b/$$

Kebasahan tanah (*soil wetness*) menunjukkan kandungan air relatif dalam tanah yang dapat dinyatakan dalam:

- (a) kebasahan massa (*mass wetness*) ( $\theta_m$ ) =  $M_w/M_s$ ; biasa disebut sebagai lengas tanah dapat dinyatakan dalam desimal atau persen
- (b) kebasahan volume (*volume wetness*) ( $\theta_v$ );

$$\theta_v = \frac{V_w}{V_t} = \frac{V_w}{V_s + V_f} = \rho_b \frac{M_w}{M_s} \quad \dots/7/$$

umumnya disebut juga sebagai lengas tanah volumetrik.

Derajat kejenuhan (*degree of saturation, DS*) adalah volume air yang terdapat dalam

total volume pori tanah atau  $DS = \frac{V_w}{V_f} = \frac{V_w}{V_a + V_w} \quad \dots/8/$

**Komposisi ukuran butir tanah**

Terdapat dua klasifikasi yang diajukan oleh USDA (*United States Department of Agriculture*) dan ISSS (*Intenational Soil Science Society*), seperti pada Tabel 1.

**Tekstur tanah**

Perbandingan relatif antara pasir, debu dan liat menentukan kelas tekstur tanah. Untuk menentukan kelas tekstur tanah dapat digunakan Segi Tiga Tekstur seperti pada Gambar 2

**Lengas tanah**

Klasifikasi lengas tanah

Suatu tanah kering jika diberikan air melalui hujan atau irigasi, maka air akan disebar ke sekeliling partikel tanah yang ditahan oleh gaya adhesi dan kohesi. Air tersebut menggantikan ruangan yang semula ditempati oleh udara dalam ruang pori. Jika semua ruang pori baik kecil maupun besar sudah terisi oleh air, maka tanah tersebut dikatakan dalam keadaan jenuh air atau pada keadaan kapasitas retensi maksimum.

Tabel 1. Klasifikasi kelas ukuran butir berdasarkan USDA dan ISSS

Fraksi	Diameter partikel (mm)	
	USDA	ISSS
Kerikil	> 2	> 2
Pasir sangat kasar	1,0 – 2,0	-
Pasir kasar	0,5 – 1,0	0,2 – 2,0
Pasir medium	0,25 – 0,5	-
Pasir halus	0,10 – 0,25	0,02 – 0,20
Pasir sangat halus	0,05 – 0,10	-
Debu (silt)	0,002 – 0,05	0,002 – 0,02
Liat (clay)	< 0,002	< 0,002

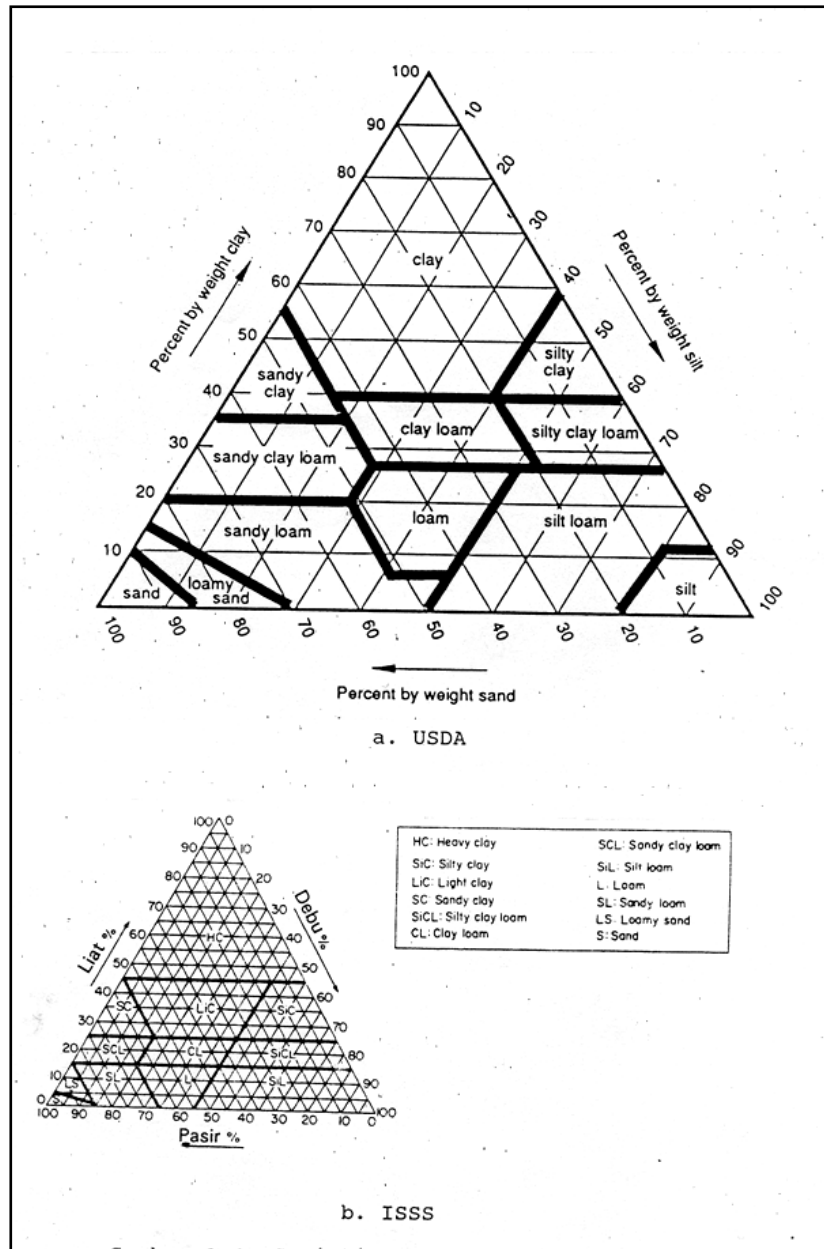
Terdapat 3 kelas utama lengas tanah yakni (a) air higroskopik: air yang diikat pada permukaan partikel tanah oleh gaya adsorpsi; (b) air kapiler: air yang diikat oleh gaya tegangan permukaan sehingga terjadi suatu lapisan tipis sekeliling partikel tanah di dalam ruang kapiler; (c) air gravitasi: air yang bergerak dengan bebas sebagai akibat dari gaya gravitasi.

Jika tanah mendekati keadaan jenuh, maka gerakan air sangat mudah. Tetapi jika lengas tanah makin berkurang, semakin besar gaya yang diperlukan untuk mengambil atau mengalirkan lengas tanah. Air kapiler ditahan antara tegangan 31 atm ~ 1/3 atm. Air tanah yang ditahan lebih kecil dari 1/3 atm akan merupakan air gravitasi dan bergerak ke bawah. Air gravitasi didrainasekan di daerah perakaran tanaman, kecuali kalau ada hambatan seperti adanya *hard-pan*<sup>1</sup> atau muka airtanah yang tinggi. Proses ini memerlukan waktu sekitar satu hari untuk tanah bertekstur pasir, dan sampai 3-4 hari untuk tanah bertekstur liat halus. Hal ini dapat digunakan sebagai pedoman lapangan untuk mengukur lengas tanah pada kapasitas lapang, yakni dengan mengambil contoh tanah satu hari setelah hujan pada tanah berpasir atau 3-4 hari sesudah hujan pada tanah liat, kemudian mengukurnya di laboratorium dengan cara gravimetri.

**Tegangan permukaan**

Salah satu fenomena tegangan permukaan adalah kapilaritas tanah, seperti pada Gambar 3.3 di bawah. Komponen vertikal tegangan permukaan ( $F_2$ ) =  $2\pi r \cdot \sigma \cdot \cos\theta$ ; dimana  $\sigma$ : tegangan permukaan ( $F_1$ ),  $\theta$ : sudut kontak. Berat kolom air pada tinggi h dengan diameter  $2r = n^2 h g \rho$ ;  $\rho$ : densitas air, g: gaya gravitasi.

<sup>1</sup> Lapisan hard pan disebut juga lapisan tapak bajak, relatif lebih kecil permeabilitasnya sulit dilalui air



Gambar 2. Segi tiga tekstur USDA dan ISSS

Berdasarkan keseimbangan maka:  $2\pi r \cdot \sigma \cdot \cos\theta = n r^2 h g \rho$ ; atau  $h = \frac{2\sigma \cos\theta}{g \rho r}$ ; jika

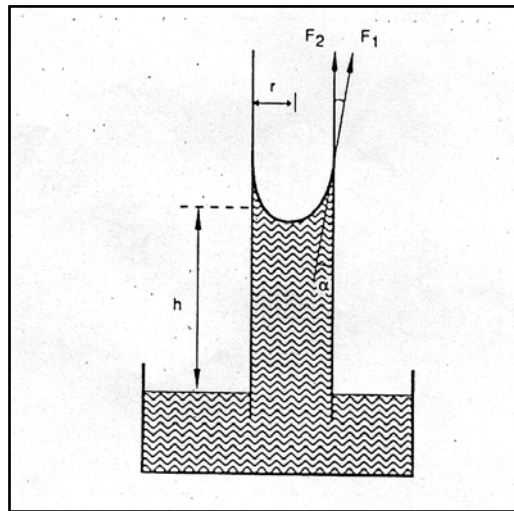
sudut  $\theta = 0$ ;  $\cos\theta = 1$ , maka  $h = \frac{2\sigma}{g \rho r}$ . Persamaan ini dapat digunakan untuk

menghitung tinggi kenaikan air kapiler jika ukuran pori efektif diketahui.

**Tegangan lengas tanah (soil moisture tension)**

Tegangan lengas tanah adalah suatu ukuran kekuatan dimana air ditahan dalam tanah dan menunjukkan gaya per satuan luas yang harus diberikan untuk mengambil airtanah. Biasanya dinyatakan dalam satuan atmosfer (rerata tekanan udara di permukaan laut), biasa pula dinyatakan dalam satuan cm kolom air atau mm air raksa. Konversi satuan adalah sebagai berikut: 1 atm = 1.036 cm kolom air = 76,39 cm Hg; 1 bar =  $10^6$  dn/cm<sup>2</sup> = 1.023 cm kolom air. Schofield (1935) menganjurkan penggunaan logaritma dari

kolom air dengan simbol  $pF = \log h$ , dimana  $h$ : tegangan airtanah dalam cm air.



Gambar 3. Kenaikan kapiler hubungannya dengan diameter tabung kapiler

### Konstanta lengas tanah

Konstanta lengas tanah yang biasa digunakan dalam bidang pertanian adalah:

- (a) Kapasitas jenuh (*saturation capacity*). Jika semua pori tanah diisi air, maka disebut sebagai kapasitas jenuh atau *maximum water holding capacity*. Tegangan airtanah mendekati 0 dan sama dengan permukaan air bebas
- (b) Kapasitas lapang (*field capacity*). Kapasitas lapang tanah adalah kandungan lengas tanah sesudah drainase air secara gravitasi, menjadi sangat lambat dan lengas tanah menjadi relatif stabil. Keadaan ini biasanya dicapai setelah 1 hari sampai 3 hari sesudah pembasahan dengan air hujan atau irigasi. Tegangan airtanah pada keadaan kapasitas lapang berbeda dari tanah yang satu dengan tanah lainnya, tetapi umumnya berkisar antara selang  $1/10 \sim 1/3$  atmosfer.
- (c) Layu permanen (*wilting permanent*) (TLP). Biasa juga disebut titik layu permanen yakni kondisi lengas tanah dimana tanaman tidak mampu lagi mengisap airtanah untuk memenuhi transpirasi, dan tanaman akan tetap layu walaupun air diberikan. Tegangan airtanah pada titik layu permanen berkisar antara  $7 \sim 32$  atm tergantung pada tekstur tanah dan jenis tanaman. Umumnya 15 atm digunakan untuk menentukan TLP.
- (d) *Ultimate wilting point* yakni kandungan lengas tanah dimana tanaman mati, biasanya tegangan airtanah sekitar 60 atm
- (e) Lengas tanah tersedia (*Available Soil Moisture = ASM*) adalah selang lengas tanah antara kapasitas lapang dengan TLP. ASM menggambarkan lengas tanah yang dapat disimpan di daerah perakaran untuk digunakan tanaman. Lengas tanah mendekati TLP adalah tidak segera tersedia untuk tanaman, sehingga istilah RAM (*Ready Available Moisture*) berhubungan dengan bagian ASM yang termudah diekstrak oleh tanaman. Jumlah total kedalaman air yang tersedia (d) di daerah perakaran (D) dalam kaitannya dengan ASG adalah sebagai berikut:

- (f) 
$$d = \frac{P_{fc} - P_{WP}}{100} \times \rho_b \times D$$

dimana  $d$ : total lengas tanah tersedia (cm),  $P_{fc}$ : lengas tanah basis berat pada kapasitas lapang (%),  $P_{WP}$ : lengas tanah (basis berat) pada titik layu permanen (%),  $\rho_b$ : ASG (tak bersatuan),  $D$ : kedalaman daerah perakaran

(cm).

Menurut Doorenbos dan Kassam (1979)<sup>2</sup>, RAM merupakan persentase dari total lengas tanah tersedia (TAM) di mana evapotranspirasi aktual (ETa) masih sama dengan evapotranspirasi potensial (ETm). Besarnya RAM (mm air/m kedalaman perakaran) sama dengan TAM (mm air/m kedalaman perakaran) dikalikan dengan faktor depleksi (p). Besarnya nilai “p” mencerminkan tingkat kepekaan tanaman terhadap kekurangan air. Semakin kecil nilai p nya semakin peka tanaman terhadap kekeringan, sebaliknya semakin besar nilai p maka semakin tahan terhadap kekeringan. Jika jumlah lengas tanah yang dievapotranspirasikan lebih besar dari RAM, sehingga jumlah lengas tanah di daerah perakaran lebih kecil dari (ASM-RAM), maka ETa < ETm dan akan terjadi pengurangan produksi dari nilai produksi maksimumnya. Besarnya nilai p tergantung pada jenis tanaman dan evapotranspirasi maksimum. Tanaman dibagi menjadi 4 kelompok (Tabel 2) dan nilai p yang dinyatakan dengan besarnya bagian dari TAM untuk masing-masing kelompok tanaman pada beberapa nilai ETm tercantum pada Tabel 3.

Tabel 2 Pengelompokan tanaman menurut besarnya RAM

Kelompok	Tanaman
1 (peka)	Bawang, cabe, kentang
2	Pisang, kubis, anggur, pea, tomat,
3	alfalfa, kacang-kacangan, jeruk, kacang tanah, nenas, bunga matahari, semangka, gandum
4 (tahan kering)	Kapas, jagung, olive (zaitun), safflower, sorghum (cintel), kedelai, kacang hijau, gula bit, tebu, tembakau

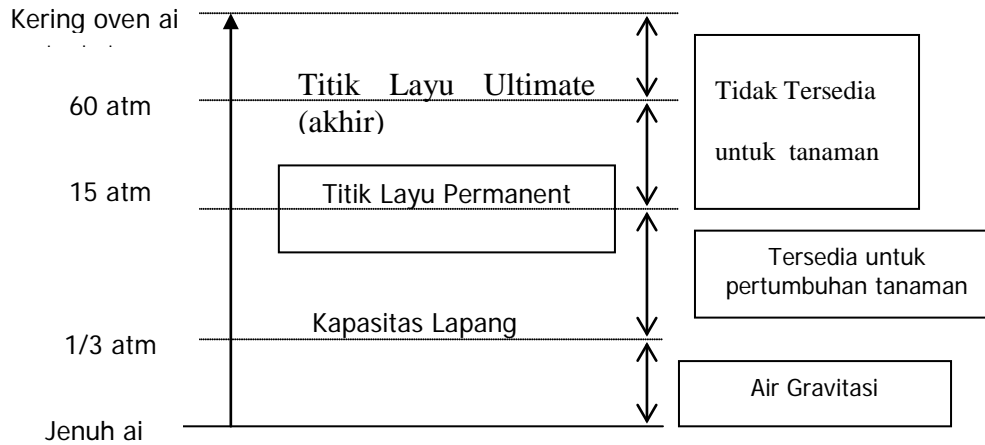
Tabel 3. Besarnya nilai p untuk berbagai kelompok tanaman pada berbagai nilai ETm<sup>3</sup>

Kelompok tanaman	ETm (mm/hari)									
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	0,50	0,42	0,35	0,30	0,25	0,22	0,20	0,20	0,17	
2	0,67	0,57	0,47	0,40	0,35	0,32	0,27	0,25	0,22	
3	0,80	0,70	0,60	0,50	0,45	0,42	0,37	0,35	0,30	
4	0,87	0,80	0,70	0,60	0,55	0,50	0,45	0,42	0,40	

Secara skhematis ketersediaan lengas tanah dapat digambarkan seperti pada Gambar 4. di bawah ini.

<sup>2</sup> Doorenbos, J.; A.H. Kassam, 1979. Yield Response to Water. FAO, Rome

<sup>3</sup> Sumber: Doorenbos, J.; A.H. Kassam, 1979. Yield Response to Water. FAO, Rome



Gambar 4. Skhema ketersediaan lengas tanah

Tabel di bawah ini menggambarkan selang kapasitas air tersedia untuk berbagai tekstur tanah.

Tabel 4. Selang ketersediaan airtanah untuk berbagai kelas tekstur tanah <sup>4</sup>

Tekstur tanah	% lengas tanah dari berat tanah kering		cm air per meter kedalaman tanah
	Kapasitas lapang	Titik Layu Permanen	
Pasir halus ( <i>fine sand</i> )	3 ~ 5	1 ~ 3	2 ~ 4
Lempung berpasir ( <i>sandy loam</i> )	5 ~ 15	3 ~ 8	4 ~ 11
Lempung berdebu ( <i>silt loam</i> )	12 ~ 18	6 ~ 10	6 ~ 13
Lempung berliat ( <i>clay loam</i> )	15 ~ 30	7 ~ 16	10 ~ 18
Liat ( <i>clay</i> )	25 ~ 40	12 ~ 20	16 ~ 30

**Daerah perakaran efektif**

Daerah perakaran efektif adalah kedalaman akar dimana akar tanaman cukup dewasa mampu mengisap lengas tanah. Perkembangan akar tanaman bervariasi tergantung pada jenis tanaman dan jenis tanah. Tabel di bawah ini menggambarkan rerata kedalaman perakaran efektif tanaman yang tumbuh di lahan subur, berdrainase baik, dan tidak ada hambatan lapisan kedap.

Pola ekstraksi lengas tanah di daerah perakaran tanaman yang tumbuh pada tanah yang seragam, umumnya dapat digambarkan seperti pada Gambar 5.

**Pengukuran karakteristik lengas tanah**

Terdapat dua metoda untuk menyatakan besarnya kandungan air dalam tanah, yakni (a) banyaknya air yang terdapat dalam volume tanah tertentu (berat/volume), (b) tegangan airtanah.

Lengas tanah basis berat dinyatakan =

$$\frac{\text{Berat contoh tanah basah} - \text{contoh kering}}{\text{berat contoh kering}} \times 100\%$$

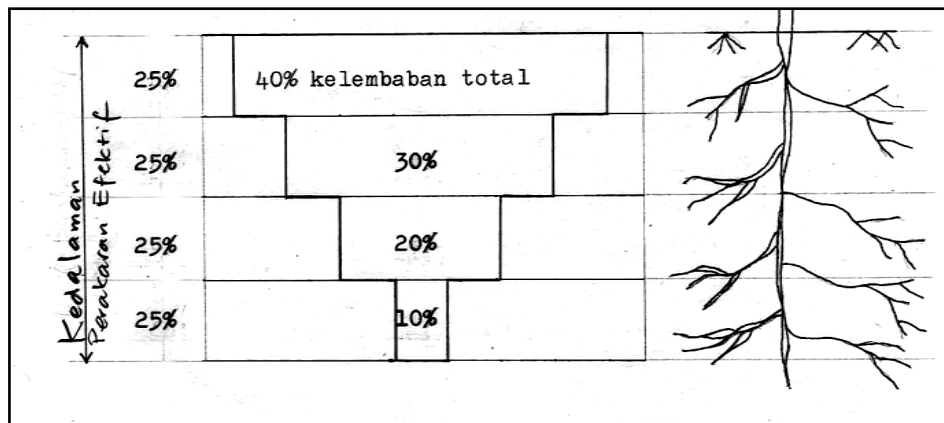
<sup>4</sup> Sumber: Booher (1967)



Tabel 5. Kedalaman daerah perakaran efektif untuk berbagai tanaman

Karakteristik perakaran			
Dangkal 60 cm	Sedang 90 cm	Dalam 120 cm	Sangat dalam 180 cm
Padi	Gandum	Jagung	Tebu
Kentang	Tembakau	Kapas	Jeruk
Kol bunga	Jarak	Cantel	Kopi
Kubis	Kacang tanah	<i>Pearl millet</i>	Apel
Lettuce <sup>a)</sup>	Melon	Kedelai	Anggur
Bawang <sup>a)</sup>	Wortel	Gula bit	Safflower
Brokoli	Kacang-kacangan	Tomat	Lucerne
	Cabe		Kapas
	Rumput pakan ternak		Semangka
	Kentang		Alfalfa
	Ubi manis		Asparagus
	Strawberi		

a) kadang-kadang hanya sampai 0,3 m



Gambar 5. Pola ekstraksi lengas tanah di daerah perakaan tanaman

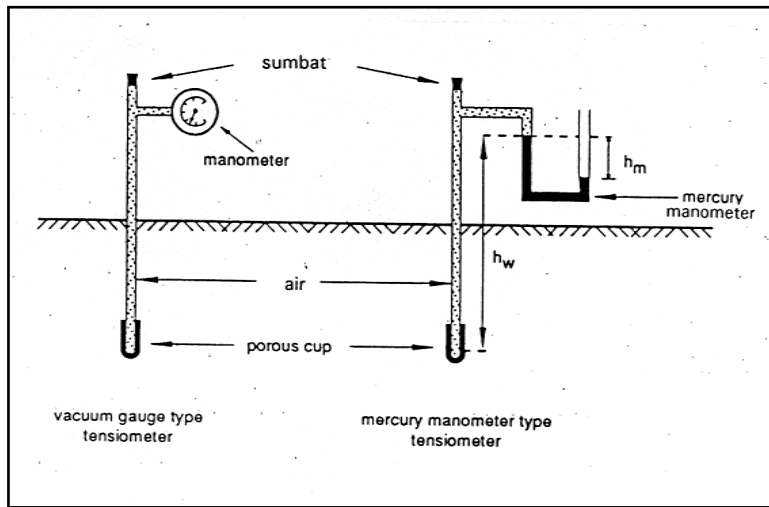
**Contoh 1:**

Contoh tanah dikeringkan dalam oven pada suhu 105<sup>0</sup> C selama 24 jam. Lengas tanah volumetrik : % volume = % berat x Bulk Density. Misalnya BD = 1,6 g/cc; % berat = 14%, maka % volume = 14/100 x 1,6 g/cc = 22,4 cm air per 100 cm kedalaman tanah atau 224 mm air per 1 meter kedalaman tanah.

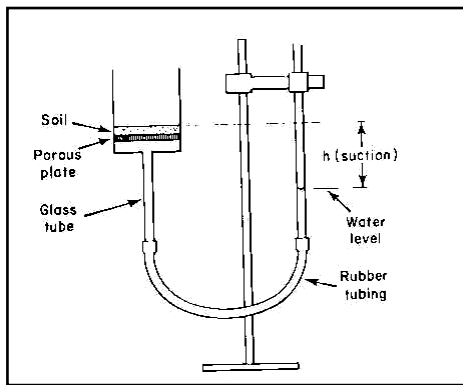
Tegangan airtanah dapat diukur secara langsung di lapangan dengan alat tensiometer (Gambar 9). Untuk pengukuran tegangan airtanah biasanya dilengkapi dengan manometer atau *vacuum gauge* yang skalanya telah dikalibrasi dengan tekanan dalam atmosfer atau cm kolom air. Alat ini hanya dapat digunakan untuk tegangan airtanah lebih kecil dari 1 atm. Batas pengukuran umumnya 0,85 atm, karena jika tegangannya terlalu rendah (daya isap tinggi) maka udara akan masuk ke dalam alat lewat pori-pori mangkuk keramik. Untuk konversi tegangan airtanah ke persen lengas tanah harus dibuat kurva karakteristik dari jenis tanah tersebut. Tensiometer pemakaiannya cocok untuk tanah berpasir dimana umumnya lengas tanah tersedia untuk tanaman terjadi pada tegangan kurang dari 1 atm.

Untuk selang tegangan lengas tanah dari 0 – 100 bar, digunakan alat *pressure-plate apparatus* (Gambar 9c). Contoh tanah jenuh ditempatkan dalam membran selulosa tipis yang dapat meloloskan air (tapi tak meloloskan udara), berada dalam suatu peralatan

seperti pada Gambar 9c. Tekanan udara pada ekstraktor dinaikkan dan air keluar dari contoh tanah lewat membran sampai suatu kesetimbangan dicapai. Pada kondisi ini tekanan udara ekuivalen dengan tegangan lengas tanah. Kemudian lengas tanahnya diukur secara gravimetri.

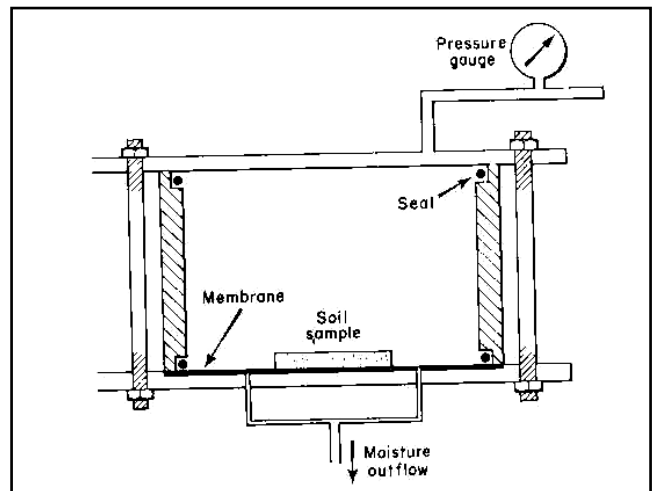


Gambar 9a. Tensiometer di lapangan



Gambar 9b. Tensiometer sederhana di laboratorium

Gambar 9c. Pressure-plate apparatus di laboratorium



## 2. Infiltrasi

### Proses dan persamaan infiltrasi

Proses masuknya air ke dalam tanah melalui permukaan tanah disebut infiltrasi. Karakteristik infiltrasi tanah adalah merupakan salah satu variabel yang penting dalam perencanaan irigasi. Laju infiltrasi adalah suatu karakteristik tanah yang menentukan laju maksimum masuknya air ke dalam tanah pada kondisi tertentu. Laju infiltrasi mempunyai satuan L/T. Laju aktual masuknya air ke dalam tanah pada saat waktu tertentu disebut sebagai kecepatan infiltrasi. Pada waktu awal laju infiltrasi akan besar karena tanah pada kondisi kering. Sesudah sekitar 20-30 menit, laju infiltrasi akan menurun karena ruang udara dalam tanah mulai terisi air. Selanjutnya setelah sekitar 1-2 jam laju infiltrasi relatif konstan. Laju infiltrasi yang konstan disebut laju infiltrasi dasar (*basic infiltration rate*) (Gambar 6a). Beberapa tipikal kurva laju infiltrasi tanah untuk berbagai tekstur tanah diperlihatkan seperti pada Gambar 6b.

Akumulasi infiltrasi adalah total jumlah air yang masuk ke dalam tanah pada selang waktu tertentu:

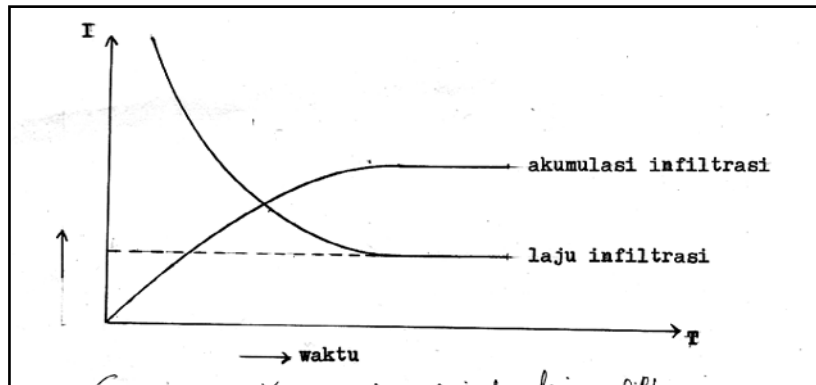
$$F = k t^n \quad \dots/9/$$

dimana F: akumulasi infiltrasi (L), t: waktu (T); k dan n adalah konstanta.

Laju infiltrasi pada t tertentu didapat dengan mendiferensialkan persamaan akumulasi infiltrasi terhadap t:

$$I = \frac{dF}{dt} = k n t^{n-1} \quad \dots/10/$$

Persamaan ini disebut sebagai persamaan infiltrasi dari **Kostiakov**.

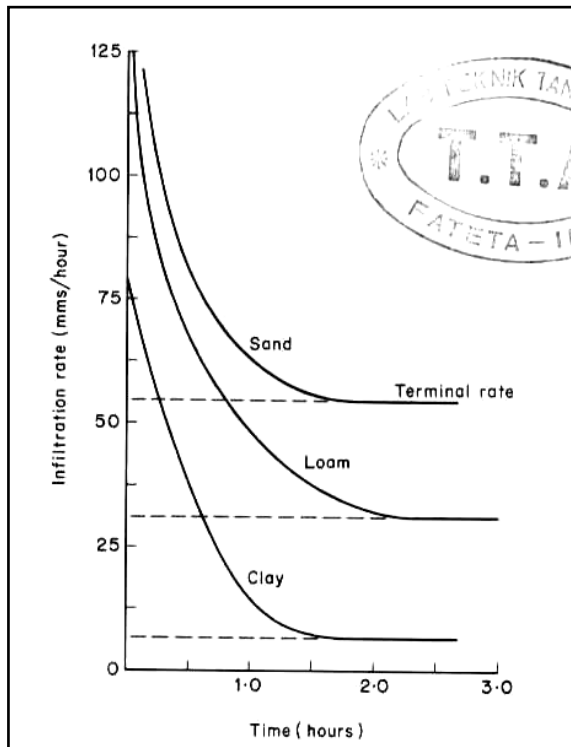


Gambar 6a. Kurva akumulasi dan laju infiltrasi

### Pengukuran dan Analisis Data Infiltrasi

Untuk keperluan perencanaan irigasi umumnya infiltrasi diukur dengan ring infiltrometer ganda. Dimensi alat tersebut terlihat pada Gambar 7a dan Gambar 7b. Ujung silinder dibuat tajam, sehingga kedua buah silinder mudah ditancapkan sedalam 10 cm dengan cara memukul dengan palu secara hati-hati. Biasanya dipasang balok kayu melintang silinder, kemudian balok tersebut dipukul dengan palu secara hati-hati, sehingga tanah tidak banyak terganggu. Kedua silinder diisi air sekitar 7~12 cm,

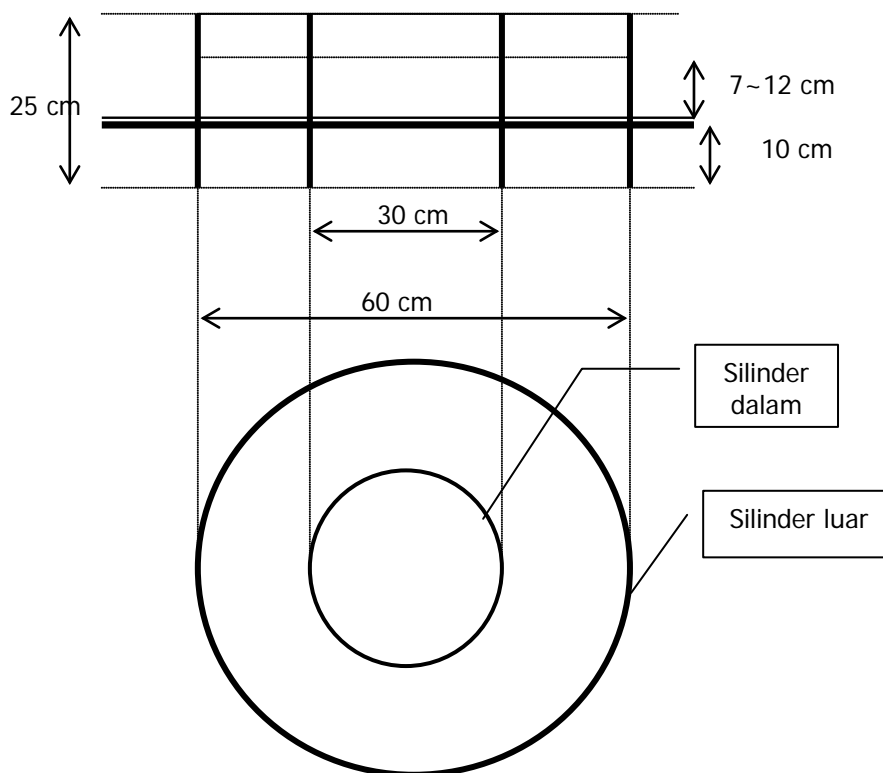
kemudian penurunan muka air di silinder bagian dalam dicatat dengan waktunya. Penurunan air di silinder luar tidak perlu dicatat, karena silinder luar digunakan sebagai penyangga (*buffer*) supaya air di silinder dalam akan berinfiltrasi vertikal. Contoh hasil pengamatan dengan ring infiltrometer adalah seperti pada Tabel 6.



Gambar 6b. Tipikal kurva laju infiltrasi pada berbagai tekstur tanah

Tabel 6. Contoh data pengamatan infiltrometer

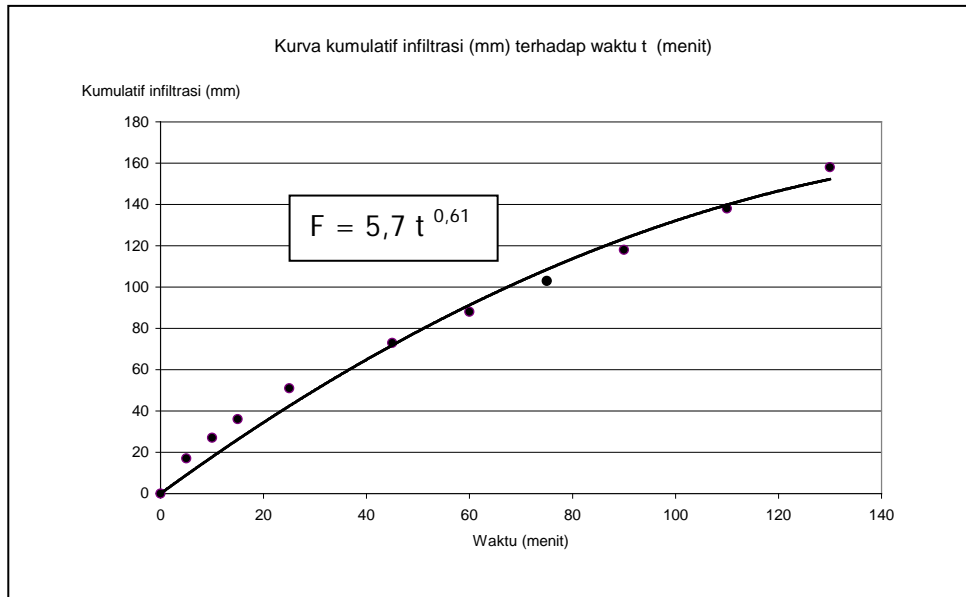
Waktu (menit)	Jarak permukaan air		Kedalaman air yang meresap untuk setiap interval waktu (cm)	Akumulasi infiltrasi (cm)
	Sebelum pengisian (cm)	Sesudah pengisian (cm)		
-	-	11,0	-	-
5	9,3	11,0	1,7	1,7
10	10,0	11,0	1,0	2,7
15	10,1	11,0	0,9	3,6
25	9,5	11,0	1,5	5,1
45	9,9	11,0	2,2	7,3
60	9,5	11,0	1,5	8,8
75	9,5	11,0	1,5	10,3
90	9,5	11,0	1,5	11,8
110	9,0	11,0	2,0	13,8
130	9,0	11,0	2,0	15,8



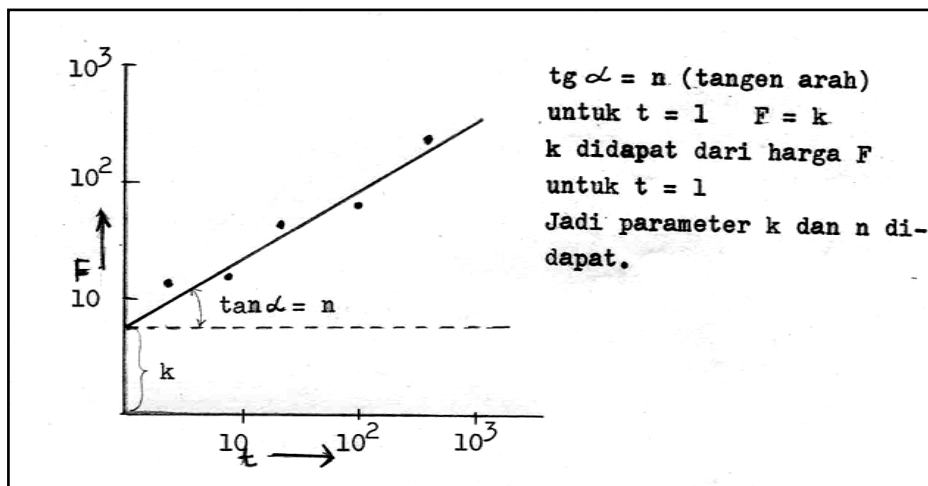
Gambar 7a. Ring infiltrometer ganda



Gambar 7b. Ring infiltrometer ganda



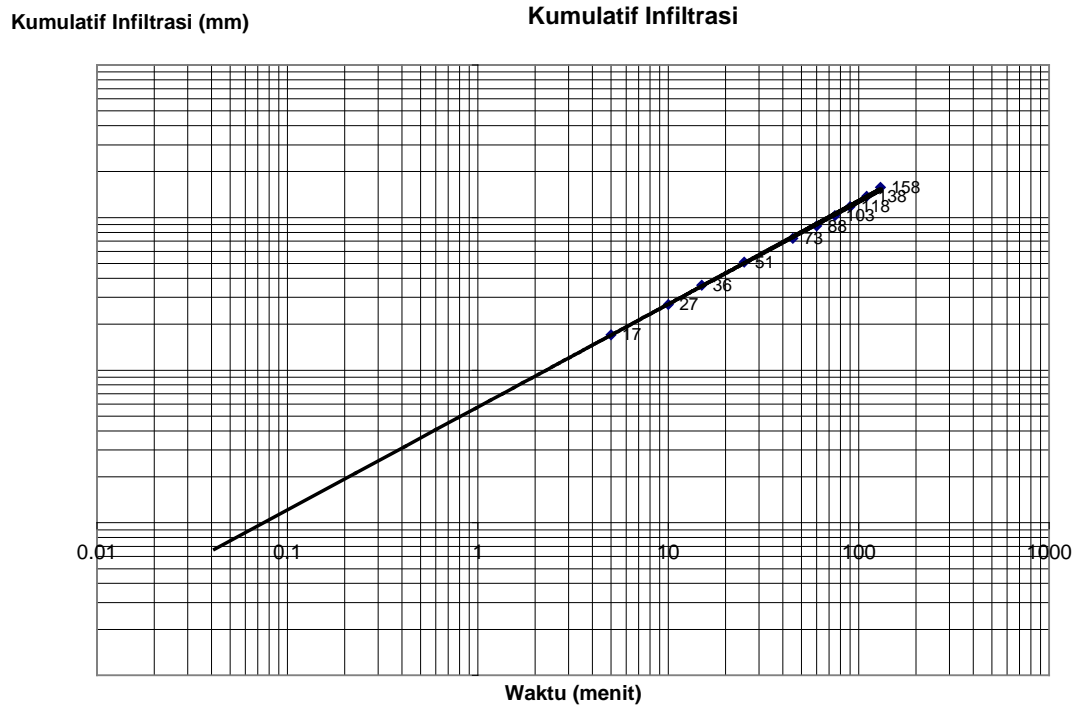
Gambar 8a. Kurva kumulatif Infiltrasi  $F = k t^n$



Gambar 8b. Kurva kumulatif Infiltrasi  $F = k t^n$  pada kertas grafik logaritmik ganda

Dari data pengamatan tersebut didapatkan data akumulasi infiltrasi (Gambar 8a). Untuk mendapatkan nilai parameter k dan n dalam persamaan infiltrasi, data akumulasi infiltrasi tersebut diplotkan pada kertas grafik logaritma ganda sehingga akan didapatkan garis lurus, karena  $\log F = \log k + n \log t$ , merupakan persamaan garis lurus,  $\text{tg } \alpha = n$  (tangens arah). Untuk  $t = 1$ , maka  $F = k$ . Nilai k didapat dari harga F untuk  $t = 1$ . Jadi konstanta k dan n didapat. Persamaan laju infiltrasi juga dapat diketahui.

Berdasarkan Gambar 8c, persamaan kumulatif infiltrasi dari  $F = k t^n$ , menjadi  $\log F = \log k + n \log t$ . Pada  $t = 1$ , maka  $\log F = \log k$  atau nilai F sama dengan nilai k. Terbaca dari Gambar 8c nilai k = 5,7. Nilai n dihitung dari lereng pada garis lurus, jika diambil nilai F pada selang satu siklus nilai t (nilai  $t = 100$ , dan nilai  $t = 10$ ). Maka nilai  $n = (\log 110 - \log 27) : (\log 100 - \log 10) = (2,041 - 1,431) : (2 - 1) = 0,61$ . Dengan demikian persamaan kumulatif infiltrasinya adalah  $F = 5,7 t^{0,61}$ ; dan persamaan laju infiltrasinya adalah  $I = k.n t^{n-1} = 3,48 t^{-0,39}$ , dimana I (mm/menit), t (menit), F (mm).



Gambar 8c. Plotting data akumulasi infiltrasi (data dari Tabel 6) pada kertas grafik logaritma ganda

### 3. CROPWAT (5.7): Manual and Guidelines

#### CROPWAT (5.7): Manual and Guidelines<sup>5</sup> (Martin Smith, 1991. FAO)

Disadur untuk kepentingan pendidikan di lingkungan IPB  
oleh Dedi Kusnadi Kalsim  
Bagian Teknik Tanah dan Air, FATETA IPB  
e-mail: [dedkus@telkom.net](mailto:dedkus@telkom.net)  
Februari 2000

---

Program Komputer untuk IBM-PC:

Untuk Menghitung:

- Evapotranspirasi Tanaman Acuan (Reference Crop Evapotranspiration)
- Kebutuhan Air Tanaman (Crop Water Requirement)
- Kebutuhan Air Irigasi (Irrigation Water Requirement)
- Skhema Pasok Air (Scheme Water Supply)

Untuk Mengembangkan:

- Jadwal Irigasi pada Berbagai Kondisi Manajemen Air

Untuk Menduga:

- Produksi Tanaman pada Tadah Hujan dan Pengaruh Kekeringan pada Irigasi Defisit

#### 1. STRUKTUR FILE:

Pada directory CLIMATE : A:\CLIMATE

- \*.PEN : file data iklim: suhu udara, RH, angin, penyinaran, juga evapotranspirasi yang dihitung berdasarkan Metoda Modifikasi Penman-Monteith
- \*.CLI : file data iklim dengan data rata-rata bulanan ET<sub>0</sub> dan Hujan juga dengan nilai Hujan Efektif yang dihitung berdasarkan 4 pilihan metoda

Pada directory CROPS : A:\CROPS

- \*.CRO : file data crop berisikan data lama waktu tahapan pertumbuhan, koefisien tanaman, kedalaman perakaran, tingkat deplesi (p) dan faktor respon hasil (K<sub>y</sub>).

Pada directory Field: A:\FIELDS

- \*.SOL : file data tanah berisikan lengas tanah tersedia
- \*.FLD : file data berisikan tanggal waktu tanam dan data kebutuhan air irigasi tanaman

#### 2. MENU UTAMA

PROGRAM OPTIONS:

1. ET<sub>0</sub> Penman-Monteith Calculations
2. Crop Water Requirements
3. Irrigation Scheduling

---

<sup>5</sup> Versi ini dalam operasi DOS. Manual CROPWAT –win versi 4.2 dapat dibaca dalam File Tambahan dalam bentuk fdp.



4. Scheme water supply
5. Printer setting
6. Drive & Path Setting
7. Exit CROPWAT

- 2.1. Menghitung ETo, dengan metoda Penman-Monteith. Data yang diperlukan: Nama stasiun, Altitude (elevasi mdpl), Koordinat Lintang, Bujur, Data iklim rata-rata harian setiap bulan (Januari-Desember): Suhu Udara ( $^{\circ}\text{C}$ ), RH (%), Kecepatan Angin (m/det atau km/hari), Penyinaran Matahari (% atau jam/hari).

Catatan: Dalam Data BMG, penyinaran matahari dinyatakan dalam %; angka 100% = 8 jam (dari jam 08.00 sampai 16.00)<sup>6</sup>. Konversi dari % ke jam/hari dianjurkan untuk tidak menggunakan konversi seperti BMG. Input data dalam % dihitung oleh CROPWAT sebagai nilai dari n/N (%). Menurut Berney & Partners (1985) untuk Indonesia digunakan konversi  $S = 0.60 Z + 0.12$ ; S: rasio dengan penyinaran 1 hari penuh, Z: rasio dengan penyinaran 8 jam per hari. Contoh jika data persen penyinaran matahari di suatu tempat (BMG) pada bulan Januari sebesar 50%, maka jam penyinaran per hari tidak berarti 4 jam. Nilai  $S = 0,6 \times 0,5 + 0,12 = 0,42$ . Jam penyinaran per hari sama dengan  $0,42 \times 12 \text{ jam} = 5,04 \text{ jam/hari}$ . Nilai koefisien Angstrom yang digunakan dalam program ini  $a = 0.25$ ,  $b = 0.50$ , harus dirubah untuk kondisi Indonesia menjadi  $a = 0.29$ ,  $b = 0.59$ .

## 2.2. Crop Water Requirement (CWR)

### 2.2.1. Perhitungan Hujan Efektif ada 5 pilihan:

- a. Nilai persentase tertentu dari hujan bulanan (Fixed Percentage):  $P_{\text{eff}} = a \cdot P_{\text{tot}}$ , biasanya nilai  $a = 0.7 - 0.9$
- b. Dependable rain (hujan andalan) didefinisikan sebagai hujan dengan peluang terlewati tertentu: Peluang terlewati 80% menggambarkan kondisi tahun kering, 50% kondisi tahun normal dan 20% kondisi tahun basah. Secara empirik menurut AGLW/FAO:
  - $P_{\text{ef}} = 0.6 * P_{\text{mean}} - 10$ ; untuk  $P_{\text{mean}} < 60 \text{ mm/bulan}$
  - $P_{\text{ef}} = 0.8 * P_{\text{mean}} - 25$ ; untuk  $P_{\text{mean}} > 60 \text{ mm/bulan}$
- c. Empirical formula (locally developed):  
Biasanya dikembangkan dengan rumus umum sebagai berikut:  

$$P_{\text{eff}} = a P_{\text{mean}} + b \text{ untuk } P_{\text{mean}} < Z \text{ mm}$$

$$P_{\text{eff}} = c P_{\text{mean}} + d \text{ untuk } P_{\text{mean}} > Z \text{ mm}$$
 Konstanta a, b, c dan d dikembangkan berdasarkan penelitian secara lokal. Hujan bulanan dengan peluang terlewati tertentu (misalnya 75%). Untuk beberapa daerah sudah mempunyai persamaan linier antara hujan bulanan rata-rata dengan hujan bulanan dengan peluang terlewati tertentu. Untuk Indonesia, Oldeman, L.R. (1980) menyatakan bahwa hujan peluang terlewati 75% (Y) dapat dinyatakan dengan persamaan:  $Y = 0.82 X - 30$ , dimana X = rata-rata hujan bulanan. Hujan efektif untuk tanaman padi adalah 100% dari Y, sedangkan untuk palawija 75% dari Y.
- d. USBR:
  - $P_{\text{ef}} = P_{\text{mean}} \times (125 - 0.2 P_{\text{mean}}) / 125$ ; untuk  $P_{\text{mean}} < 250 \text{ mm}$

<sup>6</sup> BMG mengukur penyinaran matahari dengan alat Campbel Stoke dimana kemiringan matahari optimum terjadi pada antara jam 08.00 – 16.00. Jika dilakukan pengukuran sebelum jam 08.00 atau setelah jam 16.00 kemiringan matahari belum optimum sehingga tidak dapat membakar kertas pias

- $P_{\text{ef}} = 125 + 0.1 \times P_{\text{mean}}$  ; untuk  $P_{\text{mean}} > 250 \text{ mm}$
- e. Hujan tidak diperhitungkan

Catatan: Dalam perhitungan neraca air harian dalam irrigation scheduling, pasok hujan ditentukan berdasarkan basis harian dan losses hujan karena perkolasi dan limpasan permukaan diduga berdasarkan kondisi aktual lengas tanah di daerah perakaran. Dengan demikian hujan total (bukan hujan efektif) digunakan dalam perhitungan neraca air, kemudian hujan efektif dihitung selama total periode pertumbuhan tanaman.

2.2.2. Input Crop Data. Data tanaman terdiri dari: nama tanaman; tahap pertumbuhan tanaman (4); pada setiap tahap pertumbuhan: umur tanaman (hari), koefisien tanaman (Kc), dalam perakaran (m), depletion level (p), response hasil (Ky)

2.2.3. Tanggal tanam (planting date)

2.2.4. Perhitungan CWR dilakukan setiap dasarian (10 harian).

$$ET_{\text{crop}} = Kc \times ET_0$$

$$IRR_{\text{eq}} = ET_{\text{crop}} - P_{\text{eff}}$$

$P_{\text{eff}}$  : Hujan efektif

Catatan: Perhitungan CWR untuk padi sawah berbeda dengan tanaman non-padi, karena memerlukan air tambahan untuk pesemaian, penyiapan lahan (pelumpuran) dan laju perkolasi. Pada CROPWAT versi ini sudah dilengkapi dengan perhitungan kebutuhan air untuk padi sawah akan tetapi belum dengan penjadwalan.

### 2.3. Perhitungan Kebutuhan Air Untuk Padi (Rice Water Requirements)

Perhitungan kebutuhan air untuk padi sawah berbeda dengan tanaman non-padi. Air irigasi diperlukan tidak hanya untuk evapotranspirasi tanaman tetapi juga untuk perkolasi selama kondisi sawah tergenang. Selanjutnya sebelum tanam (tandur), sejumlah air irigasi diperlukan untuk penyiapan lahan (pelumpuran) dan pesemaian. Oleh karena itu input data dan perhitungan kebutuhan airnya berbeda dari tanaman non-padi.

#### 2.3.1. Input Rice Data:

Tahapan Pertumbuhan. Umumnya non-padi terdiri dari 4 tahapan, sedangkan padi terdiri dari 6 tahapan:

- Tahap 1. Pesemaian: jumlah hari mulai dari penyiapan lahan sampai dengan tanam
- Tahap 2. Penyiapan lahan (pelumpuran): jumlah hari diperlukan untuk penyiapan lahan dan penggenangan sebelum tanam
- Tahap 3 sampai 6 terdiri dari: Tahap Awal (A), Vegetatif (B), Pembungaan (C), Pengisian biji dan pematangan (D).
- Koefisien Tanaman (Kc)
- Areal pesemaian: Luas untuk pesemaian hanya sebagian dari total areal (biasanya 10%), sehingga diperlukan sebagai input untuk reduksi CWR secara proporsional
- Jumlah air untuk penyiapan lahan (*Land preparation depth*): Sejumlah air diperlukan untuk penyiapan lahan umumnya dibagi menjadi dua bagian. Pertama

untuk penjemuran tanah (sekitar 100 - 150 mm) selanjutnya dilakukan pelumpuran dan perataan tanah. Sebelum tanam air irigasi sebesar 100 mm diperlukan untuk mendapatkan genangan macak-macam. Total keperluan air untuk pengolahan lahan sekitar 200 - 250 mm. Jumlah ini diperlukan selama periode waktu pengolahan lahan, sehingga semakin lama periode pengolahan lahan, maka semakin kecil air irigasi harian yang diperlukan.

- Laju perkolasi: besarnya tergantung dari jenis tanah dan kedalaman air tanah. Perkolasi akan berlangsung selama genangan dilakukan di petakan sawah. Proses perkolasi diperlukan tanaman untuk menyediakan oksigen bagi pertumbuhan tanaman. Normal laju perkolasi adalah sekitar 1 - 3 mm/hari, tetapi pada petakan dengan tekstur tanah kasar dan topografi berlereng perkolasi dapat mencapai 10 - 20 mm/hari.

#### 2.4. Perhitungan Keperluan Irigasi Padi

Perhitungan keperluan air irigasi untuk padi termasuk untuk evapotranspirasi, perkolasi, penyiapan lahan dan pesemaian. Evapotranspirasi dan perkolasi akan terjadi selama petakan sawah tergenang. Selama pesemaian ET<sub>c</sub> dan perkolasi terjadi hanya pada sebagian luasan pesemaian. Selama penyiapan lahan luasan ini bertambah setiap hari sampai seluruhnya ditanami. Faktor luasan (%) dalam hasil cetakan, menunjukkan rata-rata luasan yang tercover selama periode 10-harian.

### 3. PENJADWALAN IRIGASI (Irrigation Scheduling)

Option ini hanya dapat dilakukan apabila sudah selesai perhitungan CWR. Program penjadwalan irigasi memberikan kemungkinan untuk:

- Mengembangkan dan merancang penjadwalan irigasi yang sesuai dengan kondisi operasional di lapangan
- Evaluasi lapangan dari program irigasi dalam hal efisiensi penggunaan air irigasi dan hasil produksi
- Mensimulasikan program irigasi di lapangan pada kondisi kekurangan air, tadah hujan, irigasi suplemen dan lain-lain

#### 3.1. Input Data

Perhitungan penjadwalan irigasi didasarkan pada neraca air harian, aliran air yang masuk dan keluar (evapotranspirasi, hujan, irigasi) di daerah perakaran tanaman. Untuk itu diperlukan data evapotranspirasi tanaman, hujan, jenis tanaman dan tanah.

##### 3.1.1. CWR dihitung seperti diterangkan di atas

3.1.2. Hujan. Tergantung pada keperluan, data hujan dapat digunakan rata-rata bulanan, hujan bulanan dengan peluang terlewat 80% untuk menggambarkan kondisi kering, atau peluang terlewat 20% (kondisi basah), atau data aktual (data historis).

3.1.3. Data Tanaman: kedalaman perakaran, deplesi ijin (p) untuk menghitung RAM (Readily Available Moisture) dan Faktor response hasil (K<sub>y</sub>) untuk menduga hasil.

##### 3.1.4. Data Tanah (Soil Data)

- TAM (*Total Available Soil Moisture Content*). Total lengas tanah tersedia adalah perbedaan lengas tanah antara kapasitas lapang dan titik layu, dinyatakan dengan satuan mm/m (mm air per meter kedalaman tanah). Nilai indikatif untuk berbagai kelas tekstur tanah adalah sebagai berikut:

	Coarse (kasar)	Sandy (berpasir)	Loamy (berlempung)	Clayey (berliat)
TAM (mm/m)	60	100	140	180

- Initial Soil Moisture Depletion (% TAM), menunjukkan tingkat kekeringan tanah pada awal tanam. Lengas tanah awal dinyatakan dengan persentase depleksi dari kapasitas lapang. Nilai 0% menggambarkan pada kondisi kapasitas lapang, nilai 100% pada kondisi titik layu.
- Maximum Rooting Depth (Kedalaman akar maksimum). Kondisi genetik tanaman menentukan kedalaman perakaran maksimum, dalam beberapa kasus sangat ditentukan oleh kondisi profil tanah. Nilai default 900 cm, menunjukkan bahwa tidak ada pembatas kondisi tanah dalam menentukan kedalaman perakaran
- Maximum Rain Infiltration Rate (Laju infiltrasi maksimum, mm/hari). Diperlukan untuk menduga aliran permukaan dalam perhitungan hujan efektif. Nilai default 30 mm/hari.

### 3.2. Irrigation Scheduling Options

Terdapat dua katagori yakni:

1. Timing Option : Berkaitan dengan KAPAN irigasi dilaksanakan
2. Application Option : Berkaitan dengan BERAPA BANYAK AIR diberikan setiap kali irigasi

#### 3.2.1. Timing Option:

EVAL.&SIMUL.:

- Option 1: Selang irigasi ditentukan oleh pengguna

OPTIMAL IRRIGATION:

- Option 2: Irigasi diberikan jika 100% RAM sudah dipakai oleh tanaman
- Option 3: Irigasi diberikan jika persentase tertentu dari RAM sudah dipakai oleh tanaman (misal: 80% RAM untuk safety level atau 120% RAM untuk stress level)

PRACTICAL IRRIGATION:

- Option 4: Irigasi diberikan dengan selang interval (hari) tertentu pada setiap tahap pertumbuhan
- Option 5: Irigasi diberikan apabila depletion level tertentu dicapai, jumlah pemberian airnya konstan (tertentu).

DEFICIT IRRIGATION:

- Option 6. Irigasi diberikan apabila nilai kritis pengurangan evapotranspirasi telah dicapai yang besarnya ditentukan oleh pengguna.

$$\text{Defisit} = 100 \times (1 - ET_a/ET_{\max})$$

ET<sub>a</sub>: Evapotranspirasi aktual

$ET_{max} = ET_{crop} = \text{Evapotranspirasi potensial}$

- Option 7. Irigasi diberikan apabila suatu tingkat kritis penurunan hasil telah dicapai

$$(1 - Y_a/Y_{max}) = K_y \times (1 - ET_a/ET_{max})$$

$Y_a$ : Hasil aktual;  $Y_{max}$ : Hasil maksimum,  $K_y$ : Faktor Response Hasil

RAINFED (Tadah Hujan):

- Option 8: Tadah Hujan. Tidak ada irigasi, hanya hujan bulanan yang diperhitungkan dengan merubahnya menjadi 6 kali hujan harian dalam sebulan

### 3.2.2. Application Options

EVALUATION AND SIMULATION:

- Option 1: Jumlah air irigasi setiap aplikasi ditentukan oleh pengguna (lihat Option 1 pada Timing Option)

OPTIMAL IRRIGATION:

- Option 2: Jumlah air irigasi akan mengembalikan lengas tanah di daerah perakaran kembali ke kapasitas lapang. Karena depletion level berubah pada setiap pertumbuhan dengan bertambahnya kedalaman perakaran, maka jumlah air irigasi setiap aplikasi akan berubah selama pertumbuhan tanaman.
- Option 3: Jumlah air irigasi setiap aplikasi akan mengembalikan lengas tanah tertentu di atas atau di bawah kapasitas lapang. Hal ini berguna untuk tujuan pencucian (*leaching*) kontrol salinitas (aplikasi lebih besar dari kapasitas lapang) atau untuk mengakomodir hujan yang mungkin akan jatuh (aplikasi di bawah kapasitas lapang)

PRACTICAL IRRIGATION:

- Jumlah air irigasi setiap aplikasi konstan ditentukan oleh *pengguna (Fixed Irrigation Depth)* yang biasanya dikaitkan dengan metoda irigasinya. Sebagai nilai indikatif yang biasa digunakan adalah sebagai berikut: basin irrigation : 50 - 150 mm; furrow irrigation : 30 - 60 mm; border irrigation : 40 - 80 mm; sprinkler irrigation: 30 - 80 mm; drip irrigation : 10 - 30 mm.

### 3.3. Field Irrigation Efficiency

Jumlah air irigasi setiap aplikasi adalah merupakan air irigasi neto, yakni air irigasi yang berinfiltrasi mengisi lengas tanah di daerah perakaran. Ketidak-tepatan dalam sistem irigasi khususnya dalam petakan lahan (ketidak-rataan dalam leveling) akan menyebabkan kehilangan air irigasi. Oleh karena itu angka efisiensi irigasi perlu diberikan. Nilai efisiensi 70% merupakan angka efisiensi yang cukup baik untuk sistem irigasi permukaan.

### 3.4. Perhitungan Penjadwalan Irigasi (Irrigation Scheduling)

Perhitungan program penjadwalan didasarkan pada neraca lengas tanah di daerah perakaran dimana status lengas tanah setiap hari dihitung berdasarkan air yang masuk dan yang keluar di daerah perakaran tanaman.

$$SM_i = SM_{i-1} + P_{tot} + Irr_{apl} - ET_a - RO - DP$$

karena,  $SM_i = FC - SMD_i$  ; dan  $SM_{i-1} = FC - SMD_{i-1}$ , maka

$$SMD_i = SMD_{i-1} + ETa - P_{tot} - Irr_{apl} + RO + DP$$

$SM_i$  : lengas tanah di daerah perakaran pada hari ke  $i$ ;  $FC$ : lengas tanah di daerah perakaran pada kondisi kapasitas lapang;  $SMD_i$  : deplesi lengas tanah pada hari ke  $i$ ;  $ETa$  : Evapotranspirasi tanaman aktual;  $P_{tot}$  : Hujan total;  $Irr_{apl}$  : Jumlah air irigasi;  $RO$  : run-off;  $DP$  : Deep Percolation

Rasio  $ETa/ETmax$  pada berbagai level deplesi dinyatakan seperti pada Gambar 1. Secara grafik ilustrasi neraca lengas tanah di daerah perakaran selama masa pertumbuhan digambarkan seperti pada Gambar 2.  $ETa$  akan sama dengan  $ETmax$  selama lengas tanah di daerah perakaran belum mencapai nilai kritis yang ditentukan oleh besarnya depletion level ( $p$ ). Di atas itu, maka  $ETa/ETmax$  ditentukan secara linier seperti pada Gambar 1,

Data hujan yang diberikan adalah hujan bulanan, program CROPWAT mengkonversikannya ke hujan 10 harian. Untuk perhitungan neraca lengas tanah harian, maka data hujan bulanan dikonversikan ke hujan harian, 2 hari yakni hari ke 3 dan ke 7 setiap dekade (10 harian). Untuk setiap hujan yang jatuh, maka bagian hujan yang hilang menjadi  $RO$  ditentukan berdasarkan laju maksimum infiltrasi tanah dan Deep Percolation ditentukan berdasarkan deplesi lengas tanah di daerah perakaran.

Nilai  $TAM$  (*Total Available Moisture*) dan juga  $RAM$  (*Ready Available Moisture*) ditentukan oleh kedalaman perakaran, level deplesi yang diijinkan yang dihitung dengan basis harian. Selanjutnya dengan menjumlahkan nilai harian, jumlah evapotranspirasi aktual dan potensial dicatat untuk setiap tahapan pertumbuhan dan total periode pertumbuhan. Waktu kapan irigasi dan jumlahnya dihitung sesuai dengan angka yang diberikan oleh pengguna. Sebagai output akhir dinyatakan berapa kali irigasi dilakukan, selang waktunya, kehilangan air dan perkiraan pengurangan produksi karena adanya stress kekurangan air. Gross irrigation application depth dihitung berdasarkan nilai efisiensi irigasi yang diberikan dan dikonversikan ke pasok air kontinyu Liter/detik/ha selama periode irigasi (1 liter/detik/ha = 8.64 mm/hari).

### 3.5. Output Jadwal Irigasi

Hasil perhitungan jadwal irigasi disajikan pada layar dan dapat dicetak ke printer atau ke disk file. Outputnya berupa informasi mengenai irrigation calendar, total air yang digunakan dan dugaan produksi, serta evaluasi terhadap efisiensi penjadwalan (*scheduling efficiency*).

#### 3.5.1. Irrigation Calendar

Informasi mencakup: jenis tanaman, tanggal tanam, data tanah, kriteria timing dan aplikasi yang digunakan.

Untuk setiap kali irigasi:

- nomor urut irigasi,
- selang waktu irigasi,
- tanggal irigasi,
- tahap pertumbuhan tanaman (4 tahapan: A: initial phase; B: development stage; C: mid-season; D: late season),
- Depletion level sebagai persentase dari  $TAM$ ,

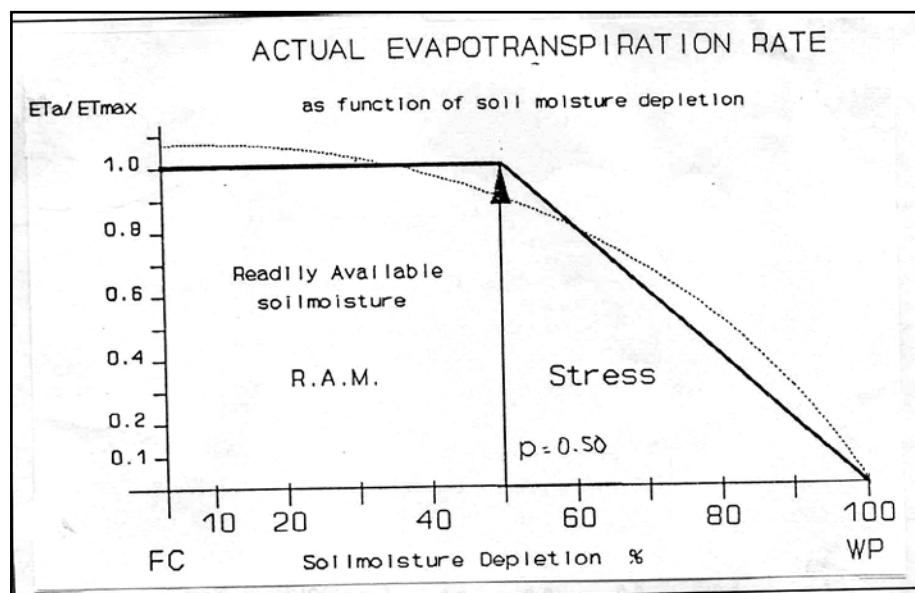
- ET aktual (TX) pada sehari sebelum irigasi, dinyatakan sebagai persentase dari ET tanaman potensial,
- Rerata ETa (aktual) selama interval irigasi dinyatakan sebagai persentase dari ETcrop potensial.
- Defisit, menunjukkan tingkat deplesi lengas tanah sesudah irigasi: nilai nol berarti pengisian sampai kapasitas lapang; nilai positif menggambarkan kondisi under-irrigation sama dengan jumlah air yang diperlukan untuk mengisi daerah perakaran sampai ke kapasitas lapang
- Loss menggambarkan kehilangan air irigasi dalam bentuk perkolasi atau hujan yang jatuh mengisi lengas tanah di daerah perakaran melewati kapasitas lapang
- Net dan Gross Irrigation depth, seperti didefinisikan dalam Application Option
- Gross depth dikonversikan ke debit kontinyu, menggambarkan debit kontinyu untuk memenuhi keperluan irigasi selama periode interval irigasi.

3.5.2. Total Water Use and Yield Reduction

Hasil cetakan seperti terlihat di bawah ini:

Efisiensi pasok irigasi dapat dievaluasi dari:

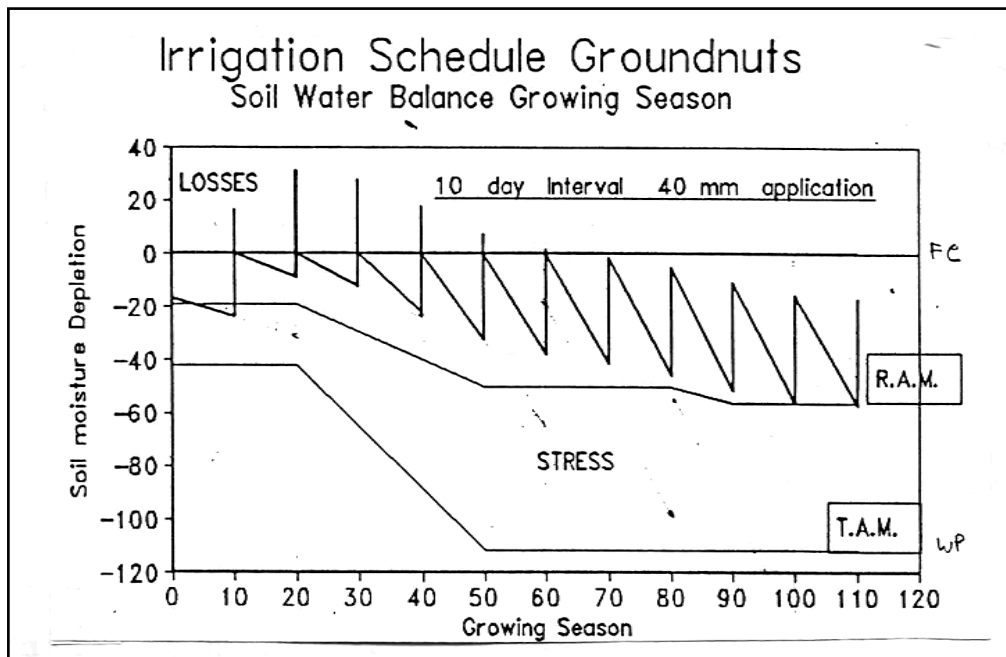
- Total net and gross irrigation supply
- Total net irrigation losses adalah jumlah dari aplikasi irigasi yang berlebih, tidak termasuk efisiensi irigasi yang didefinisikan sebagai input.
- Soil moisture deficit at harvest, menggambarkan deplesi lengas tanah pada akhir musim, suatu alat uji apakah irigasi terakhir sebenarnya diperlukan atau dapat ditekan (dikurangi)?
- Potential water use by Crop adalah sama dengan total crop water requirement dikurangi dengan hujan efektif
- Efficiency Irrigation Schedule adalah rasio water use crop dengan net supply (Total net irrigation - Total Irr.losses) : Total net Irr. Deficiency Irr. Schedule adalah pengukur stress air dihitung sebagai:  $(1 - \text{Actual water use by crop} / \text{Potential water use by crop})$



Gambar 1. Konsep Evapotranspirasi Aktual

Prediksi pengurangan hasil karena stress kekurangan air dinyatakan per musim dan setiap tahap pertumbuhan.

- Reduction in ETC =  $(1 - \text{ETA}/\text{ETM})$ , dinyatakan dalam persen dan dihitung setiap tahap pertumbuhan
- Reduction in Yield dinyatakan dengan 2 cara:
  - Setiap tahapan pertumbuhan berdasarkan:  
 $(1 - \text{Ya}/\text{Ymax}) = \text{Ky} \times (1 - \text{ETA}/\text{ETM})$
  - Cumulative yield reduction:  
 $(1 - \text{Ya}/\text{Ym})_i = 1 - (\text{Ya}/\text{Ym})_1 \times (\text{Ya}/\text{Ym})_2 \times (\text{Ya}/\text{Ym})_3 \times \dots \times (\text{Ya}/\text{Ym})_i$



Gambar 2. Neraca Lengas tanah di daerah perakaran selama masa pertumbuhan tanaman

Efisiensi Hujan dapat dievaluasi dari informasi:

- Total hujan
- Total Rain loss dihitung dari hujan yang melebihi pengisian tanah sampai ke kapasitas lapang (deep pecolation) dan hujan yang melebihi maksimum laju infiltrasi harian (runoff losses)
- Effective Rain = Total Rain - Losses
- Efficiency Rain = Effective Rain/Total Rain

### 3.5.3. Evaluasi Skhedul Irigasi

Efektivitas Penjadwalan Irrigasi dapat dievaluasi dari:

1. Efisiensi pasok air irigasi
2. Pengurangan hasil karena stress air



Total Gross Irrigation	628.6 mm	Total Rainfall	13.3 mm
Total Net Irrigation	440.0 mm	Effective Rain	13.3 mm (-)
Total Irrigation Losses	64.1 mm	Total Rain Loss	0.0 mm
Moist Deficit at harvest	16.7 mm		
Actual Water Use by Crop	361.1 mm	Actual Irrig. Req.	348.6 mm
Potential Water Use by Crop	362.0 mm		
Efficiency Irr. Schedule	85.4 %	Efficiency Rain	100.0 % $(\frac{13.3}{13.3} \times 100)$
Deficiency Irr. Schedule	0.2 % $(1 - \frac{361.1}{362.0})$		

YIELD REDUCTIONS	Stage	A	B	C	D	Season
Reductions in ETC $(1 - \frac{ET_c}{ET_m})$		3.1	0.0	0.0	0.0	0.2 %
Yield Response factor $(K_y)$		0.40	0.60	1.00	0.80	0.80
Reductions in Yield $(1 - \frac{Y_c}{Y_m})$		1.2	0.0	0.0	0.0	0.2 %
Cumulative Yield reduct.		1.2	1.2	1.2	1.2	

Gambar 3. Contoh Tampilan Hasil Analisis

#### 4. SCHEME WATER SUPPLY

Tujuan program ini untuk menentukan pasok air irigasi bulanan pada suatu jaringan irigasi, pada areal yang berbeda dan untuk tanggal tanam berbeda, berbagai tanaman.

##### 4.1. Data Input

##### 4.1.1. Crop Irrigation Requirements

Dalam sesi program terdahulu CWR telah dihitung dan jika akan digunakan dalam pasok air jaringan irigasi, maka telah disimpan (saved) pada file \*.FIELDS, dengan acuan yang jelas pada tanaman, iklim dan tanggal tanam. Contoh : Kr-kd042 artinya Karawang, tanaman kedele, awal tanam bulan April, dekade ke 2.

##### 4.1.2. Cropped Area

Luasan areal yang ditanami masing-masing tanaman diberikan dalam nilai persentase dari luas total jaringan irigasi. Suatu overview cropping pattern dengan luas tanam dan jenis tanam dan tanggal tanam yang berbeda ditayangkan di layar. Harus diperhatikan bahwa pada setiap saat jumlah luas tanam dari berbagai tanaman tidak melebihi total luas areal jaringan irigasi

##### 4.2. Perhitungan

CIR 10 harian yang diambil dari field file yang berbeda, dikonversikan ke nilai bulanan. Perkalian masing-masing CIR dengan persentase luas menghasilkan Relative Irrigation Requirement dinyatakan dalam mm/hari. Penjumlahan nilai ini untuk semua tanaman menghasilkan Scheme Water Requirement dan Scheme Water Supply yang dapat dikonversikan ke l/det/ha dan l/det.

Dengan mempertimbangkan efisiensi irigasi dan kriteria rotasi, maka Gross Water Supply Requirement dihitung dengan:

$$Q_{\text{gross}} = \frac{1}{e_p} \times \frac{1}{t_i} \times A_{\text{scheme}} \times 0.116 \times \sum (ET_{\text{crop}} - P_{\text{eff}}) \times \frac{A_{\text{crop}}}{A_{\text{scheme}}}$$

$Q_{\text{gross}}$  : Gross Scheme Water Supply (lt/det);  $e_p$  : Efisiensi irigasi jaringan (scheme irrigation efficiency) ( $\leq 1$ );  $t_i$  : Operational time factor ( $\leq 1$ );  $A_{\text{crop}}$  : Luas areal masing-masing tanaman (ha);  $A_{\text{scheme}}$  : Luas total jaringan irigasi (ha);  $ET_{\text{crop}} - P_{\text{eff}}$  = Keperluan air irigasi tanaman neto (mm/hari)

#### 4. Response Hasil Tanaman Terhadap Air

##### Response Hasil Tanaman Terhadap Air

Sumber: Doorenbos, J.; A.H. Kassam. 1979. Yield Response to Water, FAO, Rome.  
 Disadur untuk kepentingan pendidikan di lingkungan IPB oleh Dedi Kusnadi Kalsim

##### 1. Response Hasil Tanaman Terhadap Air

Hubungan antara tanaman, iklim, air dan tanah adalah sangat kompleks dan umumnya berkaitan dengan proses biologi, fisiologi tanaman, fisika dan kimia. Untuk aplikasi dalam perencanaan dan operasional irigasi diperlukan suatu analisis pengaruh pasok air terhadap hasil tanaman. Hubungan tersebut dapat ditentukan apabila keperluan air tanaman dan defisit air di satu pihak dan hasil maksimum serta hasil aktual di lain pihak dapat dikuantifikasikan.

Defisit air untuk tanaman dan stress yang diakibatkannya berpengaruh terhadap evapotranspirasi tanaman dan hasil. Apabila keperluan air tanaman dipenuhi oleh lengas tanah maka  $ET_a = ET_m$ , dimana  $ET_a$  : evapotranspirasi aktual;  $ET_m$  : evapotranspirasi maksimum. Apabila lengas tanah tidak mencukupi maka  $ET_a < ET_m$ , selanjutnya  $Y_a < Y_m$ . Secara empirik hubungan tersebut dapat dituliskan:

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_m}\right) = K_y \times \left(1 - \frac{ET_a}{ET_m}\right)$$

$K_y$  : faktor respon hasil (yield response factor);  $1 - Y_a/Y_m = (Y_m - Y_a)/Y_m$  adalah nisbah pengurangan produksi;  $1 - ET_a/ET_m = (ET_m - ET_a)/ET_m$  adalah nisbah pengurangan evapotranspirasi.

$$K_y = \frac{\text{Nisbah pengurangan produksi}}{\text{Nisbah pengurangan evapotranspirasi}}$$

Karena yang mempengaruhi produksi (hasil) banyak faktor selain air, seperti varietas, pemupukan, salinitas tanah, hama dan penyakit serta kultur teknis, maka hubungan produksi dalam hal ini mengacu pada varietas unggul, beradaptasi baik terhadap lingkungan, tumbuh di lahan yang luas dimana praktek kultur teknis sudah optimum kecuali ketersediaan air.

##### 2. Maksimum Evapotranspirasi ( $ET_m$ )

$$ET_m = kc \times ETo$$

- (1) Perhitungan  $ETo$ : evapotranspirasi rumput-rumputan, tinggi 8 - 15 cm menutupi tanah dengan sempurna, tidak kekurangan air. Beberapa metoda dapat digunakan: (a) Penman, (b) Radiasi, (c) Panci evaporasi, (d) Blaney Criddle
- (2) Koefisien tanaman  $kc$  (tergantung pada jenis tanaman dan tahap pertumbuhan)

Informasi yang diperlukan:

- tanggal tanam
- total waktu pertumbuhan pada:
  - (a) tahap awal (initial stage): dari perkecambahan sampai 10% penutupan tanah

- (b) tahap perkembangan (development stage) : yakni dari penutupan lahan 10% sampai 80%
- (c) mid season stage: dari penutupan lahan 80% sampai pembungaan
- (d) late season stage: awal pembuahan sampai panen

**3. Evapotranspirasi Aktual (ETa)**

ETa = ETm jika lengas tanah cukup tersedia, ETa < ETm jika lengas tanah tidak mencukupi. Total lengas tanah tersedia (Sa) didefinisikan sebagai kolom air per meter kedalaman tanah (mm/m) dimana lengas tanah pada selang antara kapasitas lapang dan titik layu (Swp). Secara umum untuk tekstur tanah halus, medium dan kasar nilai Sa (mm/m) berturut-turut 200, 140, 80.

Apabila lengas tanah mencapai kapasitas lapang maka ETa = ETm, jika lengas tanah berkurang maka sampai pada kondisi tertentu, maka ETa < ETm. Bagian dari total lengas tanah yang tersedia yang dipakai oleh tanaman (didepleksikan) sampai pada suatu kondisi tertentu dimana ETa < ETm didefinisikan sebagai fraksi (p) dari total lengas tanah tersedia (Sa). Nilai fraksi p (faktor depleksi) ini tergantung pada jenis tanaman dan besarnya ETm (Lihat Tabel). Nilai p x Sa x D disebut sebagai RAM (Ready Available Moisture) atau Lengas Tanah Segera Tersedia. Sedangkan nilai Sa x D adalah Total Lengas Tanah Tersedia (TAM, Total Available Moisture)

**3.1. Lengas Tanah Cukup ETa = ETm**

Prosedur perhitungan:

- a. Total lengas tanah tersedia (TAM) = D x Sa; D: kedalaman perakaran (m)
- b. RAM = p x D x Sa, dimana ETa = ETm
- c. Selang irigasi dimana ETa = ETm adalah p.Sa.D/ETm

Contoh: tanaman jagung, bulan Juli ETm = 10,1 mm/hari, tekstur tanah medium Sa = 140 mm/m, Kedalaman perakaran D = 1,2 m.

Perhitungan:

p	(Tabel 1, 2)	0,40
Sa.D	140 x 1,2	170 mm
RAM	p.Sa.D	68 mm
Selang Irigasi	p.Sa.D/ETm	7 hari

Tabel 1. Grup Tanaman berdasarkan depleksi lengas tanah

Grup	Tanaman
1	Bawang, lada, kentang
2	Pisang, kubis, anggur, pea, tomat
3	Alfalfa, kacang (bean), jeruk, kacang tanah, nenas, bunga matahari, semangka, gandum
4	Kapas, jagung, olive, safflower, sorghum (canel), kedelai, gula bit, tebu, tembakau

Tabel 2. Fraksi deplesi lengas tanah (p) untuk Grup Tanaman dan Maksimum Evaptranspirasi (ETm)

Grup Tanaman	ETm (mm/hari)								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.50	0.425	0.35	0.30	0.25	0.225	0.20	0.20	0.175
2	0.675	0.575	0.475	0.40	0.35	0.325	0.275	0.25	0.225
3	0.80	0.70	0.60	0.50	0.45	0.425	0.375	0.35	0.30
4	0.875	0.80	0.70	0.60	0.55	0.50	0.45	0.425	0.40

3.2. Lengas Tanah Terbatas, ETa < ETm

Apabila bagian dari lengas tanah yang didepleksikan lebih besar dari p, maka ETa < ETm. Besarnya ETa tergantung pada sisa lengas tanah yang ada (1-p) Sa. D dan nilai ETm.

$$ETa = ETm = -\frac{dSt.D}{dt} \dots/1/ \text{ dimana } St.D \geq (1-p) Sa.D$$

$$ETa = \frac{St.D}{(1-p)Sa.D} \times ETm = -\frac{dSt.D}{dt} \dots/2/ \text{ dimana } St.D < (1-p) Sa.D$$

Sa.D : total lengas tanah tersedia di daerah perakaran; St.D : lengas tanah yang ada di daerah perakaran pada waktu t; p : fraksi dari total lengas tanah tersedia dimana ETa = ETm.

Dengan integrasi dan substitusi kedua persamaan tersebut di atas, maka didapat:

$$ETa = \frac{Sa.D}{t} \left[ 1 - (1-p)e^{-\frac{ETm.t}{(1-p)Sa.D} + \frac{p}{1-p}} \right] \dots/3/$$

untuk  $t \geq t'$ , dimana  $t'$  adalah waktu (hari) selama ETa = ETm atau  $t' = p. Sa.D/ETm$  (Lihat Tabel 3).

3.2.1. ETa Sepanjang Interval Irigasi

Contoh :

Tanaman jagung, Juli, ETm = 10.1 mm/hari, tekstur tanah medium Sa = 140 mm/hari, Kedalaman perakaran D pada bulan Juli = 1.2 m

Perhitungan :

Total lengas tanah tersedia	D. Sa	170 mm
Fraksi p	Tabel 20	0.40
ETa dengan interpolasi dari Tabel 21???:		

Interval Irigasi (hari)	8	10	12	16	20	24	30
Rerata ETa (mm/hari)	9.8	9.4	9.0	8.0	7.1	6.2	5.3

### 3.2.2. ETa Selama Periode Bulanan

Untuk tujuan reconnaissance dan perencanaan awal suatu dugaan Aktual Evapotranspirasi Bulanan untuk suatu jenis tanaman dapat dihitung dengan menggunakan Available Soil Water Index (ASI). ASI mencirikan bagian dari bulanan dimana lengas tanah cukup memenuhi keperluan air tanaman (ETa = ETm). Suatu kombinasi dari nilai ASI, ETm dan lengas tanah yang tertinggal (1-p)Sa.D, memberikan pendugaan rata-rata ETa bulanan.

$$ASI = \frac{In + Pe + Wb - [(1 - p)Sa.D]}{ETm_{bulanan}}$$

dimana: In: aplikasi irigasi bulanan netto (mm/bulan); Pe: hujan efektif (mm/bulan); Wb: kedalaman lengas tanah aktual pada awal bulan (mm/kedalaman perakaran); (1-p)Sa.D: kedalaman lengas tanah yang tertinggal apabila ETa < ETm (mm/kedalaman perakaran); ETm: maksimum evapotranspirasi (mm/bulan).

Jika  $ASI \geq 1$ , maka  $ETa = ETm$ , Jika  $ASI < 0$  maka  $ETa/ETm$  begitu kecil sehingga sulit tumbuh kecuali jika ETm rendah dan lengas tanah yang tertinggal tinggi.

Contoh:

Jagung; bulan Juli; ETm = 10.1 mm/hari;  
 Tektur tanah medium dengan Sa = 140 mm/m; dalam akar D = 1.2 m  
 Net Irrigation Application (In) = 145 mm/bulan  
 Hujan efektif (Re) = 20 mm/bulan  
 Lengas tanah aktual pada awal bulan (Wb) = 40 mm  
 In + Pe + Wb = 205 mm/bulan  
 Perhitungan:  
 Fraksi p (Tabel 1, 2) = 0.40  
 Lengas tanah dimana ETa < ETm (1-p)Sa.D = 100 mm  
 ASI (205-100)/(31 x 10.0) = 0.33  
 Eta (Tabel 4) = 6.2 mm/hari

## 4. Hasil Aktual (Ya)

Apabila pasok air tidak dapat memenuhi keperluan tanaman, maka evapotranspirasi aktual (ETa) akan lebih kecil daripada ETm. Pada kondisi ini akan terjadi *stress* air yang mempengaruhi pertumbuhan tanaman dan akhirnya juga mempengaruhi hasil tanaman. Pengaruh *stress* air terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman tergantung pada spesies dan varietas tanaman di satu pihak dan besarnya serta waktu terjadinya defisit air tersebut di pihak lainnya. Setiap tanaman mempunyai karakteristik respons yang berbeda terhadap defisit air. Pada kondisi ETa = ETm, jumlah total bahan kering dan hasil yang diproduksi per unit air yang dikonsumsi (kg/m<sup>3</sup>) juga berbeda untuk setiap jenis tanaman. Hal ini dapat dinyatakan dengan Efisiensi Pemanfaatan Air Tanaman (Water Use Efficiency), yang dapat dinyatakan dengan total bahan kering tanaman per m<sup>3</sup> air (Em) dan total hasil panen per m<sup>3</sup> air (Ey).

Tabel 4. Rerata ET aktual bulanan (mm/hari) untuk berbagai nilai ASI, Lengan tanah tertinggal dan Evapotranspirasi Maksimum

(1-p) Sa.D	ASI = 0.83					ASI = 0.67					ASI = 0.50				
mm/dalam akar	ETm, mm/hari					ETm, mm/hari					ETm, mm/hari				
	2	4	6	8	10	2	4	6	8	10	2	4	6	8	10
25	1.9	3.8	5.6	7.3	9.1	1.8	3.3	4.8	6.1	7.5	1.6	2.8	3.8	4.8	5.8
50	2.0	3.9	5.7	7.6	9.4	1.9	3.6	5.2	6.7	8.1	1.7	3.2	4.4	5.5	6.5
100	2.0	3.9	5.9	7.8	9.6	1.9	3.8	5.5	7.2	8.8	1.9	3.5	5.0	6.3	7.6
150	2.0	4.0	5.9	7.8	9.7	2.0	3.8	5.7	7.4	9.1	1.9	3.7	5.3	6.7	8.1
200	2.0	4.0	5.9	7.9	9.8	2.0	3.9	5.7	7.5	9.3	1.9	3.7	5.4	7.0	8.5

(1-p) Sa.D	ASI = 0.33					ASI = 0.17					ASI = 0				
mm/dalam akar	ETm, mm/hari					ETm, mm/hari					ETm, mm/hari				
	2	4	6	8	10	2	4	6	8	10	2	4	6	8	10
25	1.3	2.1	2.8	3.5	4.2	1.1	1.5	1.8	2.2	2.5	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
50	1.6	2.7	3.5	4.3	5.0	1.4	2.1	2.8	3.0	3.3	1.2	1.5	1.6	1.7	1.7
100	1.8	3.2	4.3	5.3	6.2	1.7	2.8	3.6	4.2	4.7	1.5	2.3	2.8	3.0	3.2
150	1.8	3.4	4.7	5.9	7.0	1.7	3.1	4.2	5.0	5.7	1.7	2.7	3.5	4.0	4.3
200	1.9	3.5	5.0	6.3	7.5	1.8	3.3	4.5	5.5	6.4	1.7	3.0	4.0	4.7	5.1

Sebagai contoh Em kacang tanah = 1.6 ; Em jagung = 2.5. Indeks panen (cH) kacang tanah (polong) = 0.35, cH jagung = 0.40. Dengan mempertimbangkan kadar air hasil panen, maka Ey kacang tanah (polong, k.a. 15%) = 0.65; Ey jagung (biji, k.a. 10-13%) = 1.15.

Apabila defisit air terjadi pada tahapan periode pertumbuhan tertentu, maka respons tanaman juga akan berbeda tergantung pada kepekaan (*sensitivity*) tanaman pada tahapan pertumbuhan tersebut. Secara umum tanaman lebih peka terhadap defisit air pada periode perkecambahan, pembungaan dan awal pembentukan hasil (*yield formation*) daripada awal vegetatif dan pematangan (Lihat Tabel 23).

Respons tanaman terhadap defisit air untuk suatu jenis tanaman juga akan berbeda untuk setiap varietas dari jenis tanaman tersebut. Umumnya HYV (varietas unggul) peka terhadap air, pupuk dan input agronomi lainnya. LYV (Low Yielding Variety) kurang peka terhadap defisit air sehingga umumnya lebih cocok untuk daerah tadah hujan. Sebagai contoh jagung varietas lokal mempunyai tingkat produktivitas 2 - 3 ton/ha di daerah tadah hujan dan 4- 5 ton/ha di daerah beririgasi, akan tetapi untuk varietas unggul dapat mencapai 8-10 ton/ha di daerah beririgasi, kemungkinan hanya 1 ton/ha di daerah tadah hujan. Oleh karena itu suatu program peningkatan produksi dengan cara perbaikan sistem irigasi harus diikuti dengan penggunaan varietas unggul. Respons tanaman terhadap air tidak dapat diperlakukan secara terpisah dari faktor agronomis lainnya yakni pemupukan, kerapatan tanaman dan perlindungan tanaman, sebab faktor-faktor tersebut juga menentukan hasil aktual (Ya) dan juga hasil maksimum (Ym) yang dapat dicapai.

### 5. Faktor Respons Hasil (ky)

Defisit sejumlah air tertentu dapat terjadi secara kontinyu sepanjang periode tumbuh atau hanya terjadi pada tahapan pertumbuhan tertentu saja (misalnya perkecambahan

(0), vegetatif (1), pembungaan (2), pembentukan hasil (3) atau pematangan (4). Pada Tabel 24 tercantum nilai  $ky$  berbagai jenis tanaman untuk defisit air yang terjadi selama periode tumbuh dan yang terjadi secara individu pada setiap tahap pertumbuhan tanaman.

Nilai  $ky$  untuk sebagian besar tanaman diturunkan berdasarkan asumsi hubungan linier antara hasil relatif ( $Y_a/Y_m$ ) dengan evapotranspirasi relatif ( $ET_a/ET_m$ ) dan hanya berlaku untuk tingkat defisit air sekitar 50% (atau  $1-ET_a/ET_m = 0.5$ ). Nilai  $ky$  ini disusun dari data hasil percobaan lapangan untuk varietas unggul, pada kondisi lingkungan dan tingkat manajemen optimum.

Aplikasi faktor respons hasil ( $ky$ ) dalam perencanaan, design dan operasional proyek irigasi memungkinkan untuk mengkuantifikasikan pasok dan pemanfaatan air dalam bentuk hasil tanaman dan total produksi dari areal proyek. Pada kondisi air terbatas menyebar secara seragam selama periode tumbuh pada berbagai tanaman dengan nilai  $ky$  yang berbeda, maka tanaman dengan nilai  $ky$  yang lebih besar akan menderita pengurangan hasil yang lebih besar daripada tanaman dengan  $ky$  rendah.

Contoh : Jagung dengan periode tumbuh 1 Mei s/d 31 Agustus (123 hari) :

		Mei	Juni	Juli	Agustus	Total
	Periode tumbuh (hari)	Awal (25)	Veget. (30)	Bunga (30)	Biji (38)	(123)
	ET m (mm)	90	192	285	273	840
	Mm/hari	3.6	6.4	9.5	7.2	
(1)	Pasok air 10% (85 mm) lebih kecil dari total yang dibutuhkan (840 mm)					
	$1-E_t/ET_m$	$1-755/840=0.1$				
	$1-Y_a/Y_m$	$1.25 \times 0.1 = 0.125$ ; $Y_a/Y_m = 87.5\%$				
(2)	Pasok air pada bulan Juli 30% (85 mm) lebih kecil dari yang diperlukan pada bulan tsb (pembungaan 285 mm)					
	$1-E_t/ET_m$	$1-200/285$ =		0.3		
	$1-Y_a/Y_m$	$1.5 \times 0.3$		0.45		$Y_a/Y_m = 55\%$



Tabel 3. Rerata evapotranspirasi aktual (ETa) dalam (mm/hari) sepanjang Interval Irigasi untuk Hasil yang berbeda dari ETm (mm/hari), D.Sa (mm) dan p (fraksi)

ETm = 2.0 mm/hari																		
D.Sa	p	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	35	40
25	0.	2.	2.	1.	1.	1.	10	1.	1.	1.	1.	1.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
	2	0	0	8	7	6	4	3	2	2	1	0	9	9	8	8	7	6
	0.	2.	2.	2.	1.	1.	1.6	1.	1.	1.	1.	1.	1.	0.	0.	0.	0.	0.
	4	0	0	0	9	7	1.7	5	4	2	2	1	0	9	9	8	7	6
	0.	2.		2.	2.	1.	1.9	1.	1.	1.	1.	1.	1.	1.	0.	0.	0.	0.
	6	0		0	0	9		6	5	3	2	1	0	0	9	8	7	6
	0.	2.			2.	2.		1.	1.	1.	1.	1.	1.	1.	0.	0.	0.	0.
	8	0			0	0		7	5	4	3	1	0	0	9	8	7	6
50	0.	2.	2.	2.	2.	1.	1.8	1.										
	2	0	0	0	0	9	2.0	8										
	0.	2.			2.	2.	2.0	1.										
	4	0			0	0		9										
	0.	2.						2.										
	6	0						0										
	0.	2.																
	8	0																
100	0.	2.	2.	2.	2.	2.	2.0	2.										
	2	0	0	0	0	0		0										
	0.	2.																
	4	0																
	0.	2.																
	6	0																
	0.	2.																
	8	0																
150	0.	2.	2.	2.	2.	2.	2.0	2.										
	2	0	0	0	0	0		0										
	0.	2.																
	4	0																
	0.	2.																
	6	0																
	0.	2.																
	8	0																
200	0.	2.	2.	2.	2.	2.	2.0	2.										
	2	0	0	0	0	0		0										
	0.	2.																
	4	0																
	0.	2.																
	6	0																
	0.	2.																
	8	0																
300	0.	2.	2.	2.	2.	2.	2.0	2.										
	2	0	0	0	0	0		0										
	0.	2.																
	4	0																
	0.	2.																
	6	0																
	0.	2.																
	8	0																

Beberapa data nilai  $K_y$  berdasarkan hasil percobaan lapangan (Agricultural Water Management, 47(2001) 1-8:

Nomor	Tanaman	Nilai $K_y$
1	Gandum (wheat)	0.57
2	Jagung (maize)	1.11
3	Bunga matahari (sunflower)	1.31
4	Sugarbeet	1.48
5	Kentang (potato)	1.54
6	Kedele (soybean)	2.08
7	Broadbean	2.29
8	Tomat (tomato)	2.47

## Penutup

### Pertanyaan:

- (1) Hasil analisis fraksi tanah sebagai berikut: liat (clay) 30%, debu (silt) 40%, pasir (sand) 30%. Berdasarkan segi-tiga kelas tekstur, termasuk tekstur apa?
- (2) Hasil analisis fraksi tanah sebagai berikut: liat (clay) 20%, debu (silt) 40%, pasir (sand) 40%. Berdasarkan segi-tiga kelas tekstur, termasuk tekstur apa?
- (3) Hasil analisis fraksi tanah sebagai berikut: liat (clay) 20%, debu (silt) 60%, pasir (sand) 20%. Berdasarkan segi-tiga kelas tekstur, termasuk tekstur apa?
- (4) Hasil analisis fraksi tanah sebagai berikut: liat (clay) 15%, debu (silt) 10%, pasir (sand) 75%. Berdasarkan segi-tiga kelas tekstur, termasuk tekstur apa?
- (5) Hasil analisis fisika tanah: Kapasitas lapang ( $pF\ 2$ ) = 40% volume, Titik Layu ( $pF\ 4,2$ ) = 25%, kedalaman perakaran tanaman = 40 cm. Berapa besarnya Total lengas tanah tersedia?
- (6) Pada soal no 5, Jika tanamannya bawang dan  $ET_m = 5\ \text{mm/hari}$ . Berapa besarnya RAM?
- (7) Data karakteristik tanah adalah sebagai berikut: Kapasitas lapang = 60% (volume); Titik layu = 30% (volume). Kalau jenis tanaman yang akan ditanam mempunyai nilai faktor depleksi ( $p$ ) = 0,25, dengan kedalaman perakaran = 50 cm. Asumsikan hujan efektif sama dengan nol. Ditanyakan: (a). Berapa besarnya TRAM (Total Ready Available Moisture)? (b) Apabila evapotranspirasi tanaman maksimum = 5 mm/hari. Berapa hari interval (selang) irigasi yang sdr rancang?
- (8) Pada perencanaan irigasi di Gorontalo diketahui data lapangan sebagai berikut: Tekstur tanah: Lempung berpasir. Jenis tanaman yang akan ditanam: jagung. Asumsikan hujan efektif sama dengan nol. Ditanyakan: (a). Berapa besarnya TRAM (Total Ready Available Moisture)? (b) Apabila evapotranspirasi tanaman maksimum = 6 mm/hari. Berapa hari interval (selang) irigasi yang sdr rancang?

- (9) Data pengukuran infiltrasi dengan ring infiltrometer seperti pada Tabel di bawah ini. Hitung persamaan laju infiltrasi (cm/jam) dengan Kostiakov? Petunjuk: (a) Gunakan Excell untuk menduga persamaan Kumulatif Infiltrasi, (b) Gunakan plotting pada kertas grafik logaritma ganda untuk menduga persamaan Kumulatif Infiltrasi.

Waktu (menit)	Kumulatif Infiltrasi (cm)
0.50	0.00
1.50	0.50
2.00	1.00
3.00	1.30
5.00	1.50
10.00	2.00
15.00	3.00
20.00	4.00

- (10) Dalam penggunaan CROPWAT untuk menghitung ETo dengan metoda Penman-Monteith, data iklim apa saja yang diperlukan?
- (11) Bagaimana koreksi data lama penyinaran BMG (jam/hari) dari 8 jam pencatatan ke data lama penyinaran (jam/hari) penuh dalam 12 jam yang akan digunakan pada CROPWAT
- (12) Bagaimana koreksi nilai Angstrom sesuai dengan kondisi Indonesia?
- (13) Apa kemampuan dan kelemahan CROPWAT
- (14) Siapa dan tahun berapa yang pertama mengembangkan software CROPWAT
- (15) Gambarkan grafik neraca lengas tanah di daerah perakaran tanaman di lahan beririgasi
- (16) Bagaimana konsep ET aktual dalam CROPWAT
- (17) Bagaimana prediksi penurunan hasil jika  $ET_a < ET_c$ .
- (18) Apa yang dimaksud dengan koefisien hasil  $k_y$ ?
- (19) Perhitungan penjadwalan irigasi dalam CROPWAT dilakukan dengan perhitungan Neraca Lengas Tanah harian di daerah perakaran. Tuliskan dan terangkan persamaannya? Gambarkan skemanya? (Jawab:  $SMD_i = SMD_{i-1} + ET_a - P_{tot} - Irr_{apl} + RO + DP$ ; Lihat Gambar 2 pada Manual Cropwat)
- (20) Dalam CROPWAT, Data apa saja yang dimasukkan dalam : (a) karakteristik Tanaman (CROPS); (b) karakteristik tanah (SOILS)
- (21) Hasil Analisis dengan menggunakan CROPWAT untuk stasiun iklim Karawang pada tahun kering adalah seperti tabel berikut:

Month	ETo (mm/day)	Rainfall (mm/month)	Eff. Rain (mm/month)
January	3.0	279.0	152.9
February	3.4	295.0	154.5
March	3.8	114.0	93.2
April	3.9	57.0	51.8
May	4.0	11.0	10.8
June	3.8	0.0	0.0
July	4.0	1.0	1.0
August	4.4	0.0	0.0
September	4.5	0.0	0.0
October	4.4	2.0	2.0
November	3.8	89.0	76.3
December	3.5	158.0	118.1
YEAR Total	1418.0	1006.0	660.6
Effective Rainfall with USBR method			

Jika kita menanam kedelai pada tanggal 21 Mei di daerah ini, maka Keperluan air irigasi dapat dilihat pada Tabel di bawah ini. Isilah tabel tersebut sehingga lengkap?

Crop Evapotranspiration and Irrigation Requirements								
Climate File : krw-dry				Climate Station: Karawang				
Crop : SOYBEAN				Planting date : 21 May				
Month	Dec	Stage	Coeff Kc	ETcrop (mm/day)	ETcrop (mm/dec)	Eff.Rain (mm/day)	IRReq. (mm/day)	IRReq. (l/sec/ha)
May	3	init	0.40					
Jun	1	init	0.40					
Jun	2	in/de	0.53					
Jun	3	deve	0.79					
Jul	1	de/mi	1.02					
Jul	2	mid	1.10					
Jul	3	mid	1.10					
Aug	1	mi/lt	1.05					
Aug	2	late	0.85					
Aug	3	late	0.58					
TOTAL								

- (22) Dalam CROPWAT pendugaan penurunan produksi tanaman karena adanya stress kekurangan air dihitung dengan factor respons hasil ky. Bagaimana cara menghitungnya?
- (23) Input data hujan dalam CROPWAT adalah hujan bulanan, sedangkan analisis neraca air dilakukan harian. Bagaimana caranya mengkonversikan hujan bulanan ke hujan harian dalam CROPWAT?

**Kunci Jawaban:**

- (1) USDA Clay loam atau lempung berliat
- (2) USDA Loam atau lempung
- (3) USDA Silt Loam atau pasir berdebu
- (4) USDA Loamy sand atau pasir berlempung

- (5) TAM = 6 cm
- (6) Tabel 2: kelompok tanaman 1. Tabel 3:  $p = 0,30$ ; RAM = 1,8 cm
- (7) (a) TRAM = 3,75 cm; (b) Interval irigasi = 7 hari
- (8) Tabel 4: (a) TAM = 7 cm/m; Tabel 5: kedalaman akar 120 cm; TAM = 8,4 cm; Tabel 2: Jagung termasuk kelompok tanaman 4. Tabel 3: faktor deplesi  $p = 0,55$ . TRAM = 4.62 cm. (b) Interval irigasi = 7 hari
- (9) (a) Dengan Excell:  $k = 7.92$ ,  $n = 0.58$  ; F (mm), t (menit); (b) Dengan grafik logaritma ganda:  $k = 8,0$ ;  $n = 0.57$ ; F (mm), t (menit)
- (10) (a) Letak lintang geografi, (b) Elevasi lahan (m dpl), (c) Suhu udara rerata harian ( $^{\circ}\text{C}$ ), (d) Kelembaban nisbi udara (%), (e) Lama penyinaran harian (jam/hari), (f) Kecepatan angin (km/jam)
- (11)  $S = 0.60 Z + 0.12$ ; S: rasio dengan penyinaran 1 hari penuh, Z: rasio dengan penyinaran 8 jam per hari
- (12) Nilai koefisien Angstrom yang digunakan dalam program ini  $a = 0.25$ ,  $b = 0.50$ , harus dirubah untuk kondisi Indonesia menjadi  **$a = 0.29$ ,  $b = 0.59$** .
- (13) Kemampuan: (a) menghitung ETo, (b) menghitung keperluan air tanaman, (c) menghitung hujan efektif, (d) menghitung keperluan air irigasi, (e) Penjadwalan irigasi. Kelemahan: Input data hujan bulanan dikonversikan ke harian dengan cara seperti yang tertulis pada Manual Cropwat.
- (14) Cropwat ver 5.7 dikembangkan oleh Martin Smith tahun 1991. Versi terbaru adalah Cropwat –window ver 4.2, dikembangkan oleh Martin Smith (FAO), Derek Clarke (Univ. Of Southampton), Khaled El-Ashari (NWRC, Cairo, Egypt).
- (15) Lihat Gambar 2 pada Manual Cropwat
- (16) Lihat Gambar 1 pada Manual Cropwat
- (17)  $(1 - Y_a/Y_{max}) = K_y \times (1 - E_{Ta}/E_{Tm})$  dimana  $E_{Tm} = E_{Tc}$
- (18) Lihat Bahan Ajar
- (19)  $SMD_i = SMD_{i-1} + E_{Ta} - P_{tot} - Irr_{apl} + RO + DP$ ; Lihat Gambar 2 pada Manual Cropwat
- (20) (a) CROPS: jenis tanaman, tahap pertumbuhan dan umur tanaman, kedalaman akar, nilai kc setiap tahap pertumbuhan, nilai  $k_y$ . (b) SOILS: tekstur tanah, lengas tanah pada pF 2 (kapasitas lapang), lengas tanah pada pF 4.2 (titik layu), kedalaman lapisan kedap
- (21) Isi kolom yang kosong dalam daftar tersebut
- (22) Pelajari dengan seksama Manual Cropwat
- (23) Pelajari dengan seksama Manual Cropwat

### Daftar Pustaka

1. Doorenbos, J. and W.O. Pruitt. 1984. Crop Water Requirements. FAO. Irrigation and Drainage Paper no.24, Rome.
2. Doorenbos J.; A.H. Kassam. 1974. Yield Response to Water. FAO, Rome.
3. Dastane, N.G., 1974. Effective Rainfall in Irrigated Agriculture. FAO, Irrigation and Drainage Paper No 25. Rome
4. Smith, M. 1991. CROPWAT: Manual and Guidelines. FAO, Rome.