

Pengukuran Evapotranspirasi

Evaporasi

- Penukaran penguapan air dari permukaan air, tanah dan bentuk permukaan bukan vegetasi lainnya oleh proses fisika
- **Dua unsur utama :**
 - Energi (radiasi matahari) → sebagian gelombang dirubah menjadi panas → menghangatkan udara sekitar → tenaga mekanik → perputaran udara dan uap air
 - Ketersediaan air → tidak hanya air yang ada akan tetapi persediaan air yang siap untuk evaporasi

Faktor-faktor penentu Evaporasi

- Panas → perubahan bentuk cair dan gas → shortwave radiation lebih berpengaruh (ketinggian tempat dan musim) → longwave hanya menambah panas yang dihasilkan oleh shortwave
- Suhu udara, permukaan bidang penguapan (air, vegetasi, dan tanah)

- Kapasitas kadar air → tinggi rendahnya suhu di tempat itu
 - Proses tergantung pada D_{pv} (*Saturated vapour pressure deficit*) di udara atau jumlah uap air yang dapat diserap oleh udara sebelum udara tersebut menjadi jenuh
 - Evaporasi banyak terjadi di pedalaman dibanding di Pantai karena udara sudah lembab
- Kecepatan angin diatas bidang penguapan
- Sifat bidang penguapan
 - Kasar → memperlambat gerak angin → turbulen → memperbesar evaporasi

Pengukuran Evaporasi

- Diukur dari permukaan badan air : membandingkan jumlah air yang diukur antara dua waktu yang berbeda
- Evaporasi waduk atau danau yang berurutan :

$$E_0 = I - O - \Delta S$$

I = masukan air ke waduk ditambah curah hujan yang langsung jatuh pada waduk

O = keluaran dari waduk ditambah bocoran air dalam tanah

ΔS = perubahan kapasitas tampung waduk

$$E_0 \text{ (mm/hari)} = C (e_o - e_a)$$

$$C = (0.44 + 0.073 u)^* (1.465 - 0,00073P)$$

U = kecepatan angin rata-rata (km/jam) diukur pada ketinggian 0,5 m di atas permukaan tanah

e_o = tekanan uap air pada permukaan air yang merupakan fungsi suhu

e_a = tekanan uap air di permukaan air

C = angka tetapan yang dihitung dengan persamaan (Rohwer, 1931)

P = tekanan atmosfer (mmHg)

Untuk angka evaporasi waduk maka E_0 dikalikan angka tetap 0,77

Nilai C :

$$\text{Kolam} \rightarrow C = 15 + 0,93 u$$

$$\text{Danau dan waduk kecil} \rightarrow C = 11 + 0,68 u$$

Evaporasi : pendekatan neraca energi

$$Q_s - Q_{TS} - Q_{lw} - Q_h - Q_e + Q_v - Q_{ve} = Q_c$$

Q_s	=	Radiasi matahari datang
Q_{TS}	=	Radiasi matahari terefleksi
Q_{lw}	=	Radiasi gelombang panjang bersih dari permukaan badan air ke udara bebas
Q_h	=	Pindahan energi dari badan air ke atmosfer dalam bentuk panas-tampak (sensible heat)
Q_e	=	Energi yang digunakan untuk proses evaporasi
Q_v	=	Energi adveksi bersih yang masuk ke badan air akibat aliran air
Q_{ve}	=	Energi adveksi keluar dari badan air karena proses evaporasi
Q_c	=	Energi tersimpan dalam badan air
Satuan dalam kalori/cm ² (<i>langleys</i>)		

Variabel pindah panas-tampak tidak diukur langsung tercakup dalam nisbah Bowen (*Bowen's ratio, R*)

$$R = Q_h / Q_e = 0,00061 P (T_s - T_a) / (e_s - e_a)$$

P	=	Tekanan udara (mb)
T _s	=	Suhu permukaan badan air (°C)
T _a	=	Suhu udara (°C)
e _s	=	Tek. Uap air permukaan badan air, e _s =f (T _a) (mb)
e _a	=	Tek. Uap air permukaan udara, e _a =e _s x R _h (mb)
R _h	=	Kelembaban relatif udara (%)
Besarnya tek.uap air tergantung suhu pada badan air		
Tek.uap air di udara dapat diukur dengan <i>sling psychrometer</i>		

Energi yang dipindahkan dari badan air proses evaporasi yang berlangsung di permukaan badan air dihitung :

$$Q_{ve} = Q_e c (T_s - T_b) / L$$

c	=	Angka panas air (kal/mg/°C)
T _b	=	Suhu dasar yang ditentukan (0°C)
L	=	Panas-tak tampak (590 kal/mg)

Persamaan sebelumnya dapat diturunkan sebagai berikut

$$Q_e = \frac{Q_s - Q_{rs} - Q_{lw} + Q_v - Q_c}{1 + R + c \frac{(T_s - T_b)}{L}}$$

Hubungan antara Q_e dengan kedalaman evaporasi dari badan air (E_o) dapat ditunjukkan pada persamaan :

$$E_o = \frac{Q_e}{L_p}$$

ρ = Kerapatan air (mg/cm^3)

Sehingga persamaan menjadi

$$E_o = \frac{Q_s - Q_{rs} - Q_{lw} + Q_v - Q_c}{\rho\{L(1 + R) + c(T_s - T_b)\}}$$

pengukuran

Q_v dan Q_c	=	Dievaluasi dengan cara mengukur suhu dan volume air yang keluar dan masuk kedalam waduk
T_s	=	Suhu permukaan waduk
T_a	=	Suhu udara, tekanan udara (p) dan tekanan uap air atmosfer (e_a)
Q_s	=	Radiasi matahari datang dapat diukur secara langsung dengan alat <i>pyrheliometer</i> → jarang ditemukan di stasiun meteorologi → Black dalam Chang (1986)

$$Q_s = I_0(0,803 - 0,340C - 0,458C^2)$$

Sinar gelombang panjang dari bumi ke atmosfer → sebag besar diserap oleh uap, awan dan CO_2 di atmosfer → dipantulkan kembali ke permukaan bumi sebagai radiasi atmosfer. H_2O dan CO_2 diradiasikan kembali dalam bentuk gel yg lbh panjang.

Faktor berpengaruh : profil suhu udara, kadar uap air, tutupan awan di atmosfer

Krn sulit dihitung maka didekati dengan Q_{lw}

Persamaan panjang gelombang bersih Brunt (Anderson, 1954)

$$Q_{lw} = \sigma \{ T_2^4 - [c + d(e_2)^{-2}] T_2^4 \} \{ 1 - aC \}$$

σ	=	Tetapan Stefan-Baltzman ($1,17 \times 10^{-1}$ kal/cm ² /°K ⁴ /hari)
T_s	=	Suhu permukaan (°K)
T_2	=	Suhu udara pada ketinggian 2m di atas bidang kajian (°K)
e_2	=	Tekanan uap air pada ketinggian 2m di atas bidang kajian (mb)
c,d	=	Angka tetapan epiris, ebrvariasi tergantung letak geografis
C	=	Angka tetapan awan
a	=	Angka tetapan, tergantung pada tipe awan. Awan rendah =0,9 ; awan sedang = 0,6 dan awan tinggi = 0,2

Jika data ketinggian awan tidak tersedia maka (1-aC) diganti dengan (0,10+0,90 n/N)

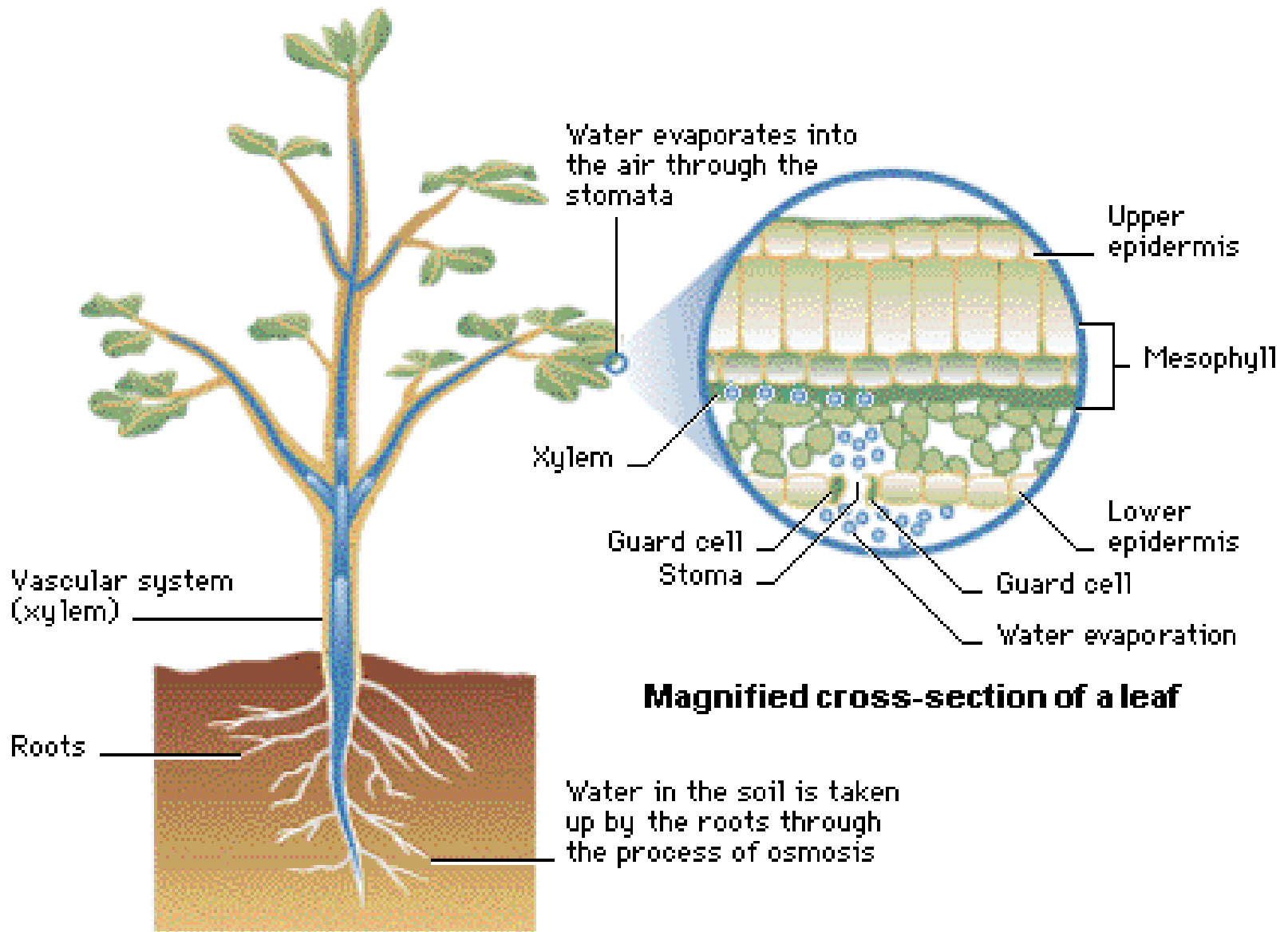
n = lama penyinaran matahari (jam) dan N lama penyinaran matahari maksimal (jam)

Radiasi panjang gelombang bersih yang tidak menjadi bagian dari radiasi matahari datang dan tidak diradiasikan kembali ke atmosfer :

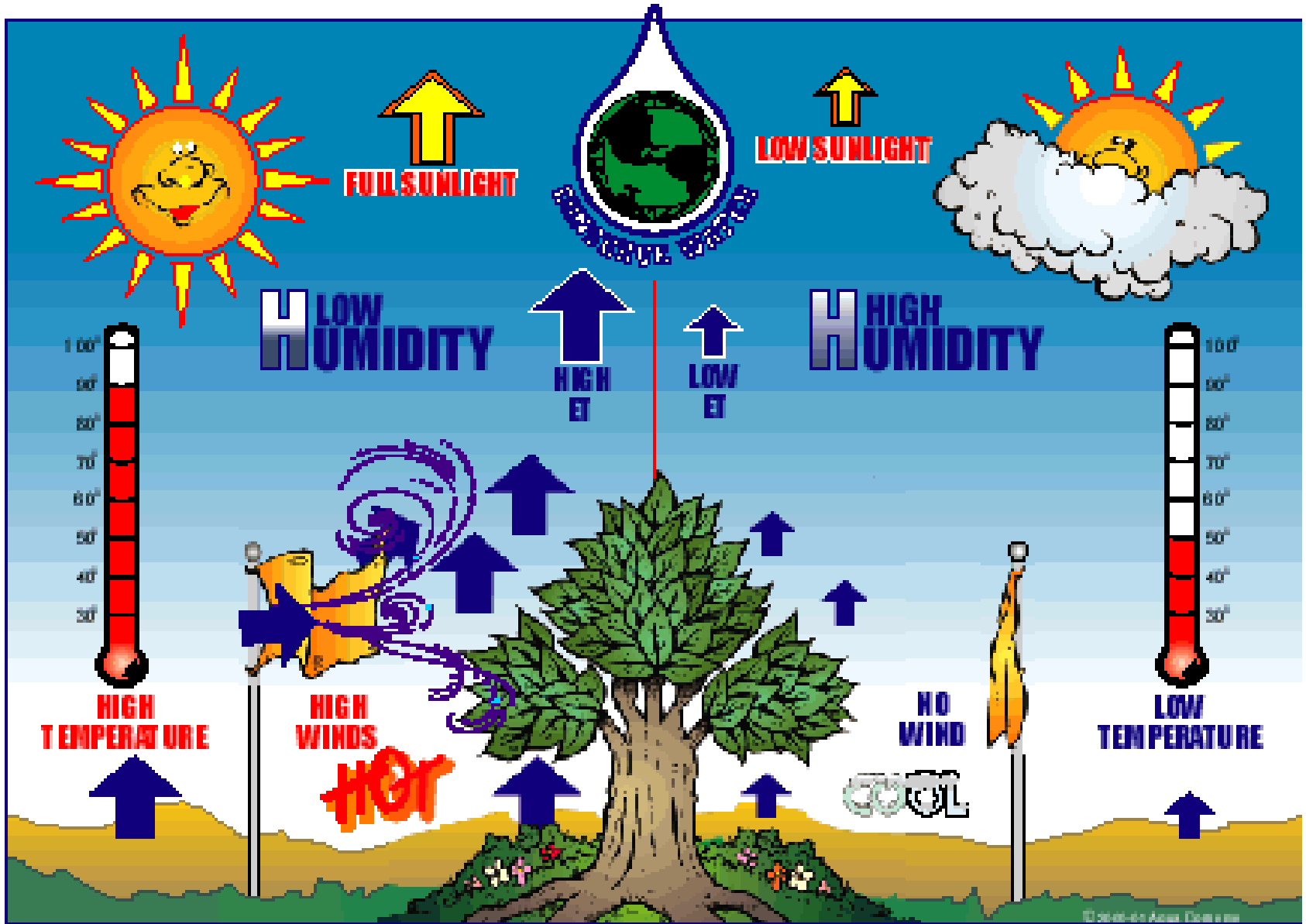
$$Q_n = Q_s(1 - \alpha) - Q_{lw}$$

Transpirasi

- Transpirasi adalah suatu proses ketika air diuapkan ke udara dari permukaan daun/tajuk vegetasi
- Laju transpirasi ditentukan:
 - Radiasi matahari
 - Membuka dan menutupnya pori-pori → kedudukan daun dan cabang, ketersediaan air, tanaman meranggas







Faktor-faktor penentu Transpirasi

- Faktornya hampir sama dengan evaporasi:
 - Radiasi matahari
 - Suhu
 - Kecepatan angin
 - Gradien tekanan udara
 - Karakteristik dan kerapatan vegetasi seperti struktur tajuk, perilaku pori-pori daun, kekasaran permukaan vegetasi
 - Transpirasi di hutan lebih besar dibanding di padang rumput
 - Keakaran vegetasi → akan berpengaruh jika cadangan air tanah menyusut

Pengukuran Transpirasi

$$T = P_g - R - I_t - \Delta S$$

T	=	Transpirasi (cm/th)
P _g	=	Curah hujan (cm/th)
R	=	Air larian (cm/th)
I _t	=	Total intersepsi (cm/th)
ΔS	=	Perubahan kapasitas tampung air tanah

ΔS = umumnya diabaikan, keseimbangan air tersebut dipengaruhi akan ditentukan

Evapotranspirasi

- Jumlah air total yang dikembalikan lagi ke atmosfer dari permukaan tanah, badan air, dan vegetasi oleh adanya pengaruh faktor-faktor iklim dan fisiologis vegetasi
- Gabungan antara evaporasi, intersepsi, dan transpirasi

$$ET = T + I_t + E_s + E_o$$

T	=	Transpirasi vegetasi
I_t	=	Intersepsi total
E_s	=	Evaporasi dari tanah, batuan dan jenis permukaan tanah lainnya
E_o	=	Evaporasi permukaan badan air seperti sungai, danau, dan waduk
ΔS	=	Perubahan kapasitas tampung air tanah

Untuk tegakan hutan, E_o dan E_s biasanya diabaikan

$ET = T + I_t$ untuk tegakan hutan, bila unsur vegetasi dihilangkan, $ET = E_s$

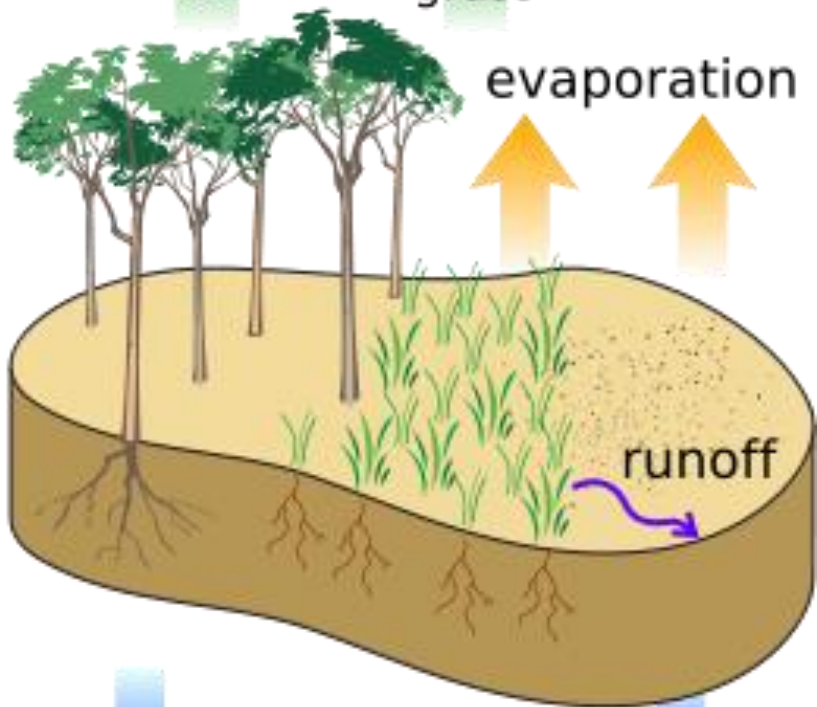
evapotranspiration =
transpiration + evaporation

transpiration

trees

grass

evaporation



groundwater
recharge



Faktor-faktor Evapotranspirasi

- **Evapotranspirasi/Evaporasi Total** = peristiwa evaporasi dan transpirasi yang terjadi bersama-sama
- **Evapotranspirasi potensial (potential evaporation, PET)** = evaporasi yang terjadi, apabila tersedia cukup air (dari presipitasi atau irigasi) untuk memenuhi pertumbuhan optimum → dipengaruhi faktor2 meteorologi → radiasi matahari dan suhu
- **Evapotranspirasi sesungguhnya (Actual evapotranspiration, AET)** = evapotranspirasi yang terjadi sesungguhnya, dengan kondisi pemberian air seadanya → dipengaruhi oleh faktor fisiologi tanaman dan unsur tanah
- **Consumptive use** = air yang diperlukan tumbuh-tumbuhan untuk pertumbuhan sel-selnya

Perkiraan Evaporasi

Perkiraan evaporasi berdasarkan *pan evaporasi*..... (1)

$$\text{Evaporasi}_{\text{perm. Air bebas}} = C_{\text{pan}} \times \text{Evaporasi}_{\text{pan}}$$

Penguapan dari evaporasi pan biasanya lebih besar dari evaporasi sebenarnya, karena:

- luas permukaan sempit → gel. dan turbulensi udara kecil
- kemampuan menyimpan panas berbeda antara pan dan danau
- terjadinya pertukaran panas antara pan dgn tanah, udara, air sekitar
- pengaruh panas, kelembaban, angin akan berbeda bagi perm. kecil dgn perm. besar → *atmometer, lysimeter, phytometer*

Evaporation pan

$\varnothing = 1.21 \text{ m} = 4''$



H = 25.4 cm = 10''



Lysimeter....1



2 type lysimeter

- Tipe drainage (*Drainage type*)
- Tipe timbang (*Spring-balance weighing type*)

Metode Thornthwaite

- Memanfaatkan suhu udara sebagai indeks ketersediaan energi panas

$$PET = 1,6[(10T_a)/I]^a$$

T_a	=	Suhu rata-rata bulanan (°C)
I	=	Indeks panas tahunan

$$I = \sum_{i=1}^{12} [(T_{ai}/5)]^{1.5}$$

$$a = 0,49 + 0,0179I - 0,0000771 I^2 + 0,000000675 I^3$$

Metoda Blaney-Criddle

- Memperkirakan besarnya evapotranspirasi potensial (PET) pada awalnya dikembangkan untuk memperkirakan besarnya konsumsi air irigasi di Amerika Serikat (Dunne dan Leopold, 1978)
- Besaran \rightarrow suhu dan sepanjang hari (lamanya waktu penyinaran matahari)

$$PET = (0,142T_a + 1,095)(T_a + 17,8)kd$$

PET	=	Evapotranspirasi potensial (cm/bln)
T _a	=	Suhu rata-rata (°C) apabila T _a < 3°C maka angka konstan 0,142 harus diganti dengan 1,38
k	=	Faktor pertanaman empiris, bervariasi menurut tipe pertanaman serta tahap pertumbuhan tanaman tahunan, angka koefisien disajikan secara bulanan, untuk angka koef tanaman musiman dinyatakan dalam persentase menurut musim pertumbuhan
d	=	Fraksi lama penyinaran matahari per bulan dalam waktu satu tahun

Angka faktor pertamanan meningkat sejalan dengan pertambahan ketinggian vegetasi, untuk memperkirakan besarnya air yang diperlukan suatu vegetasi selama pertumbuhannya (Blaney-Criddle)

$$PET (cm) = K \sum_{i=1}^n (1,8T_{ai} + 32)d_i$$

K	=	Koefisien pertanaman selama periode pertumbuhan
n	=	Jumlah bulan selama masa pertumbuhan
Tai	=	Suhu udara (°C)
di	=	Fraksi lama penyinaran matahari setiap bulan dalam waktu satu tahun,

Metoda Penman

- Dikembangkan untuk menentukan besarnya evaporasi dari permukaan air terbuka
- Digunakan untuk menentukan besarnya evapotranspirasi potensial (PET)
- Perhitungan besarnya evaporasi dari permukaan vegetasi jenuh air dapat ditentukan tanpa harus mengukur suhu pada permukaan bidang penguapan

$$\lambda E_c = \frac{[sA + \rho c_p \{e_s(T) - e_a\}/r_a]}{[s + \gamma\{1 + (r_s/r_a)\}]}$$

s	=	Laju perubahan tekanan uap jenuh dan merupakan fungsi dari suhu (Pa°C)
A	=	Energi yang tersedia (Rn-G≅Rn)
λE _c	=	Laju evaporasi tajuk dalam kondisi jenuh (PET) (mm/s)
ρ	=	Kerapatan udara (kg/m ³)
C _p	=	Specific heat of air pada tekanan udara konstan, (dalam hal ini adalah 1010 J/Kg/°C)
e _s (T)	=	Tekanan uap air jenuh pada suhu atmosfer suhu (Pa°C)
e _a	=	Tekanan uap air atmosfer (Pa°C)
λ	=	<i>Latent heat of vaporation</i> (J/Kg)
γ	=	Tahanan psikrometik (Pa/°C)
r _a	=	<i>Aerodynamic transfer resistance</i> (s/m)
r _s	=	Resistensi stomata (s/m)

Analisis Neraca Kelembaban Tanah (*soil moisture budget analysis*)

- Memanfaatkan perangkat komputer
- Teknik → membandingkan ET aktual (AET) dan ET potensial (PET) dikenal dengan istilah ETR (Evapotranspiration Ratio)

$$AET/PET = f AW / AWC$$

$$AET/PET = f AW / AWC$$

AET	=	Evapotranspirasi aktual (panjang/waktu)
PET	=	Evapotranspirasi potensial (panjang/waktu)
AW	=	Jumlah air dalam tanah yang diserap oleh akar tanaman (SM-PWP)
AWC	=	Kapasitas air yang tersedia (FC-PWP)
PWP	=	Tingkat kelembaban tanah ketika tanaman tidak mampu lagi menyerap air tanah (<i>wilting point</i>)
FC	=	Jumlah air yang masih dapat dithan oleh tanah dari gaya tarik bumi (<i>field capacity</i>)

Komponen ETR

- Indeks PET untuk kondisi tanah dan vegetasi setempat
- Kelembaban tanah → terkait dengan water table
- AET yang merupakan fraksi PET untuk tingkat kelembaban tanah tertentu

Perkiraan Evaporasi

Perkiraan evaporasi dengan menggunakan rumus empiris

- aerodynamic method/Dalton law..... (2)

$$E_a = K \cdot U_z (e_w - e_z)$$

E_a = evap perm bebas selama pengamatan

K = konstanta empiris

U_z = fungsi antara evap thd kec angin pada ketinggian z

e_w = tekanan uap jenuh di udara pada temperatur sama dengan air

e_z = tekanan uap sesungguhnya di udara pd ketinggian z

Perkiraan Evaporasi

- Persamaan Rohwer

$$E = a (e_w - e_a) (1 + b V)$$

$$E = 0.484 (1 + 0.6 V) (e_w - e_a)$$

E = evaporasi (mm/hari)

e_w = tekanan uap jenuh pada temperatur sama dengan temp air (millibar)

e_a = tekanan uap di udara sesungguhnya (millibar)

V = kecepatan angin rata-rata dalam sehari (m/detik)

Perkiraan Evaporasi

- Persamaan Orstom

$$E = 0.358 (1 + 0.588 V) (e_w - e_a)$$

- Persamaan Danau Hefner

$$E = 0.00177 V (e_w - e_a)$$

$$E = \text{inch/hari}$$

$$V = \text{meter/jam}$$

Perkiraan Evaporasi

3. Pengukuran Evaporasi secara langsung

Water-balance:

$$E_L = P + I_{\text{surf}} + I_{\text{gw}} - O_{\text{surf}} - O_{\text{gw}} - \Delta S$$

E_L = evaporasi muka air bebas per hari

P = presipitasi/hujan harian

I_{surf} = *surface inflow*/aliran perm masuk

I_{gw} = *ground water inflow*/air tanah masuk

O_{surf} = *surface outflow*/aliran perm keluar

O_{gw} = *ground water outflow*/air tanah keluar

ΔS = perubahan jumlah simpanan air selama pengamatan (1 hari)