

Analisa Model Evaporasi dan Evapotranspirasi Menggunakan Pemodelan Matematika pada *Visual Basic* di Kabupaten Maros

(Analysis of Evaporation and Evapotranspiration Model Using Mathematical Modeling on Visual Basic in Maros Regency)

Ahmad Fausan^{1*}, Budi Indra Setiawan¹, Chusnul Arif¹, Satyanto Krido Saptomo¹

¹ Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor
Kampus IPB Dramaga, PO BOX 220, Bogor, Jawa Barat, Indonesia

* Penulis Korespondensi: ahmad_fausan@apps.ipb.ac.id

Diterima: 26 Desember 2020

Disetujui: 30 Desember 2020

ABSTRACT

The approach to calculating evaporation and evapotranspiration, both potential and actual, varies widely. The models used to estimate the amount of evapotranspiration, particularly at the Maros Climatology Station, Maros Regency, South Sulawesi. Evaporation models use the Penman, Priestley, Bruin, and Valiantzas models while evapotranspiration models use the Penman, Hargreaves, Jensen-Haise, Penman-Monteith, Radiation, Turc, and Makkink models, where all of these methods use climate data, such as are the minimum temperature (T_n), maximum temperature (T_x), air temperature (T_a), average humidity (RH), rainfall (R), duration of sun exposure (SS), and maximum wind speed (U) in calculations using Visual basic program in Microsoft Excel in the form of code. Thus, it is necessary to conduct an analysis of the suitability of the model to the results of the observations in order to find out which model is suitable according to the results of the largest coefficient of determination (R^2). Based on the results of the model suitability analysis, a selected model was obtained, namely the Valiantzas model with a value of 0.980 in the evaporation calculation and the Jensen-Haise model, namely 0.889.

Keywords: evaporation, evapotranspiration, visual basic

PENDAHULUAN

Perubahan iklim global membawa konsekuensi besar terhadap ketersediaan air dalam bidang pertanian. Pertumbuhan tanaman akan baik jika kebutuhan tanaman akan unsur hara, udara dan air dapat terpenuhi secara optimal. Seperti halnya tanaman yang kehilangan air karena evaporasi. Proses evaporasi telah dikenal sejak dahulu, yaitu untuk membuat garam dengan cara menguapkan air dengan bantuan energi matahari dan angin dengan mempertimbangkan estimasi.

Estimasi Evaporasi diperlukan dalam berbagai macam masalah dalam hidrologi, agronomi, kehutanan dan perencanaan sumber daya lahan, seperti

neraca air komputasi, pengelolaan irigasi, prakiraan aliran sungai, investigasi kimia danau, pemodelan ekosistem, dll. Dari semua komponen siklus hidrologi, evaporasi mungkin yang paling sulit diperkirakan karena hingga interaksi yang kompleks antara komponen-komponen sistem daratan, tumbuhan, dan atmosfer (Singh 1997). Model Evaporasi yang mencakup istilah energi dan aerodinamis yang tersedia (model kombinasi) memberikan perbandingan terbaik dengan evaporasi standar deviasi diukur di Kabupaten Maros.

Berbagai model evaporasi yang dikaji dalam penelitian ini adalah Model Penman, Priestley, Bruin, dan

Valiantzas. Selain Evaporasi, data evapotranspirasi suatu wilayah merupakan data yang penting untuk perencanaan pengembangan sumberdaya air dan pengaturan waktu irigasi pada wilayah tersebut. Evapotranspirasi dapat menggambarkan jumlah air yang hilang dari badan air karena adanya vegetasi. Jenis vegetasi mempengaruhi jumlah evapotranspirasi secara signifikan. Karena air ditranspirasikan melalui daun yang mengalir dari akar, tumbuhan yang akarnya menancap dalam ke bawah tanah mentranspirasikan air lebih banyak. Evapotranspirasi merupakan jumlah air yang dikembalikan lagi ke atmosfer dari permukaan tanah, badan air, dan vegetasi oleh adanya pengaruh faktor-faktor iklim dan fisiologis vegetasi (Rokhma 2008). Dalam menentukan nilai evapotranspirasi perlu diperhatikan dua istilah yaitu evapotranspirasi aktual (ETa) dan evapotranspirasi potensial (ETp). Evapotranspirasi potensial menggambarkan kebutuhan lingkungan, sekumpulan vegetasi, atau kawasan pertanian untuk melakukan evapotranspirasi yang ditentukan oleh beberapa faktor, seperti intensitas penyinaran matahari, kecepatan angin, luas daun, temperatur udara, dan tekanan udara. Evapotranspirasi potensial juga menggambarkan energi yang didapatkan oleh kawasan tersebut dari matahari. Di sisi lain, transpirasi sebanding dengan seberapa banyak karbon yang diserap oleh kawasan vegetasi karena transpirasi juga berperan perpindahan CO₂ dari udara ke daun.

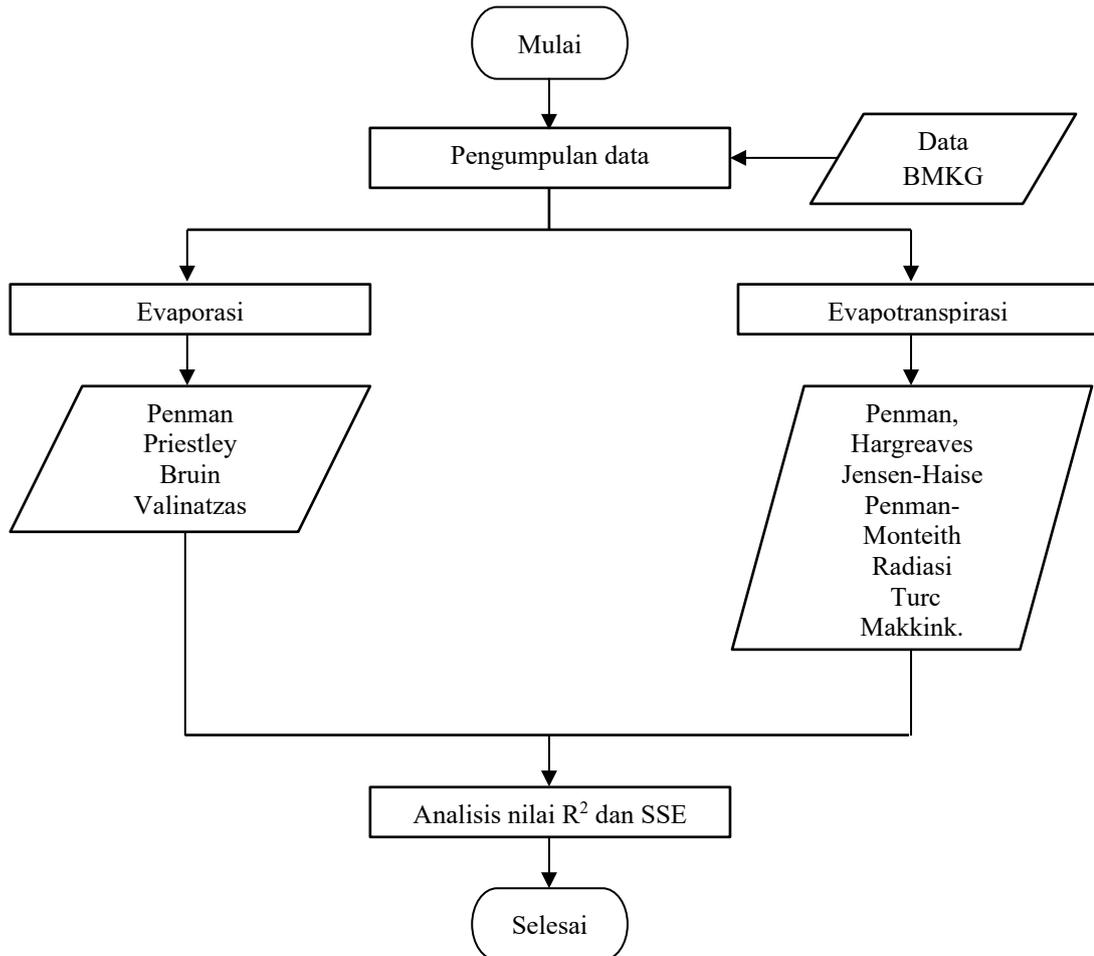
Berbagai model evapotranspirasi yang dikaji dalam penelitian ini adalah Model Penman, Hargreaves, Jensen-Haise, Penman-Monteith, Radiasi, Turc,

dan model Makkink. Model Penman dan Penman-Monteith relatif rumit, karena membutuhkan parameter iklim yang banyak dan konversi satuan yang kompleks. Model Penman membutuhkan lima parameter iklim yaitu: suhu, kelembaban relatif (*relative humidity*), kecepatan angin, tekanan uap jenuh (*saturation vapor pressure*), dan radiasi netto (Doorenbos 1977). Pada model Hargreaves, Jensen-Haise, Radiasi, Turc dan model Makkink merupakan model evapotranspirasi yang sederhana, dengan data yang dibutuhkan hanya dua parameter iklim yaitu suhu dan radiasi matahari (Capece 2002).

Tujuan penelitian adalah menguji tiga model evaporasi dan sembilan model evapotranspirasi untuk mendapatkan model yang efisien yaitu perhitungan sederhana dan mempunyai ketelitian yang tinggi.

METODOLOGI

Penelitian ini dilakukan pada tanggal 25 September 2020 (Evaporasi) dan 2 Oktober 2020 (Evapotranspirasi). Penelitian ini (Evaporasi dan Evapotranspirasi) dibutuhkan data sekunder yang dihasilkan dari Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG). Data sekunder yang dibutuhkan adalah temperatur minimum (Tn), temperatur maksimum (Tx), temperatur udara (Ta), kelembaban rata-rata (RH), curah hujan (R), lamanya penyinaran matahari (SS), dan kecepatan angin maksimum (U). Penelitian ini menggunakan program *visual basic* pada *Microsoft Excel* berupa kodingan. Secara umum, diagram alir pelaksanaan penelitian disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1 Diagram Alir Pelaksanaan Penelitian

Evaporasi

Berdasarkan data-data yang dihasilkan dari BMKG, selanjutnya akan didapatkan nilai parameter *extraterrestrial radiation* (R_a) dan *global radiation* (R_s). Nilai *global radiation* dapat mewakili keseimbangan antara radiasi matahari yang masuk dan dipantulkan. *Extraterrestrial radiation* ini di bagian atas atmosphere ini dapat dihitung sebagai fungsi dari garis lintang situs dan hari dalam setahun. Data iklim yang dibutuhkan sebanyak satu tahun (365 hari) yaitu 1 Januari 2019 – 31 Desember 2019. Model Evaporasi yang digunakan adalah model Penman, Priestley, Bruin, dan Valiantzas. Persamaan umum yang digunakan

keempat model tersebut dapat dilihat pada Persamaan berikut.

(Penman, 1948)

$$E_o = \frac{1}{\Delta + \gamma} \left(\frac{R_n \Delta}{\rho \lambda} + \gamma \delta e f_U \right) \dots \dots \dots (1)$$

Keterangan:

- E_o = Evaporasi (m/hari)
- R_n = *net radiation* ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
- Δ = kemiringan tekanan uap ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$)
- ρ = densitas udara (1000 kg m^{-3})
- λ = panas penguapan laten ($= 2.45 \text{ MJ kg}^{-1}$)
- γ = konstanta psikometrik uap ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$)
- δe = defisit tekanan uap (kPa)

f_U = konduktansi aerodinamis
($m \text{ hari}^{-1} \text{ kPa}^{-1}$)
 U = kecepatan angin ($m/detik$)

(Priestley, 1972)

$$E_o = \frac{\alpha A \Delta}{\rho \lambda (\Delta + \gamma)} \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan:

E_o = Evaporasi ($m/hari$)
 α = *net radiation* ($MJ \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)
 Δ = kemiringan tekanan uap
($kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$)
 ρ = densitas udara (1000 kg m^{-3})
 λ = panas penguapan laten
($= 2.45 \text{ MJ kg}^{-1}$)
 γ = konstanta psikometrik uap
($kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$)
 δe = defisit tekanan uap (kPa)

(Valiantzas, 2006)

$$E_o = 0.047 \sqrt{T_a + 9.5} - 2.4 \left(\frac{R_s}{R_a}\right)^2 + 0.09(T_a + 20) \left(1 - \frac{RH}{100}\right) \dots\dots\dots (4)$$

Keterangan:

E_o = Evaporasi ($m/hari$)
 R_s = radiasi global ($MJ \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)
 R_a = radiasi luar angkasa ($MJ \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)
 T_a = suhu rata-rata ($^\circ C$)
 RH_a = kelembaban rata-rata harian (%)

Evapotranspirasi

Sama halnya dengan evaporasi, data-data yang dihasilkan dari BMKG akan didapatkan nilai parameter *extraterrestrial radiation* (R_a) dan *global radiation* (R_s). Nilai R_a dan R_s didapatkan berdasarkan kodingan pada *visual basic* di *Microsoft Excel*. Nilai R_a dan R_s akan digunakan pada model Penman-Monteith (Penman Modifikasi).

(Bruin, 1979)

$$E_o = \frac{A \Delta}{\rho \lambda (a \Delta + b \gamma)} \dots\dots\dots (3)$$

Keterangan:

E_o = Evaporasi ($m/hari$)
 A = energi *available* ($MJ \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)
 a = konstanta ($= 0.85$)
 B = konstanta ($= 0.63$)
 Δ = kemiringan tekanan uap
($kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$)
 ρ = densitas udara (1000 kg m^{-3})
 λ = panas penguapan laten
($= 2.45 \text{ MJ kg}^{-1}$)
 γ = konstanta psikometrik uap
($kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$)

Penelitian ini akan dibandingkan antara model Penman-Monteith dengan sembilan metode lainnya (Tabel 1). Sembilan model Evapotranspirasi yang digunakan adalah model Blaney-Cridlle, Linacre, Kharrufa, Remanenکو, Hagreaves, Makkink, Turc, Jensen-Haise, dan Penman. Evaluasi efisiensi model dengan cara membandingkan hasil perhitungan model. Evapotranspirasi dikaji berdasarkan data parameter iklim dengan durasi sepuluh tahun terakhir yaitu tahun 2000 – 2009. Hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa hubungan antara evapotranspirasi harian hasil pengukuran langsung dengan model kurang baik yakni nilai R^2 sekitar 0,64. Persamaan umum yang digunakan kesembilan model tersebut dapat dilihat pada Persamaan berikut.

Tabel 1 Perbandingan Beberapa Model Evapotranspirasi

No	Model	T	Rs	RH	u	Panjang Hari	Faktor Tanaman
1	Blaney-Cridlle	X					
2	Linacre	X					
3	Kharrufa	X					
4	Remanencko	X		X			
5	Hargreaves	X	X				
6	Makkink	X	X				
7	Turc	X	X				
8	Jensen-Haise	X	X				
9	Penman	X	X	X	X	X	
10	Penman-Monteith	X	X	X	X	X	X

Tabel 2 Konversi Beberapa Unit Satuan Radiasi Matahari

Unit	Unit				Ekivalen evaporasi
	MJ/m ² hari	J/cm ² hari	W/m ²	cal/m ² hari	mm/hari
MJ/m ² hari	1.000	100.000	11.600	23.900	0.408
cal/cm ² hari	0.042	4.187	0.485	1.000	0.017
W/m ²	0.086	8.640	1.000	2.060	0.035
mm/hari	2.450	245.000	28.400	58.500	1.000

Model Blaney-Cridlle

Model ini merupakan model yang paling sederhana hanya membutuhkan satu parameter lingkungan yaitu suhu udara dengan menggunakan persamaan (5).

$$ET_p = p (0.4T_{mean} + 8) \dots \dots \dots (5)$$

Keterangan:

ET_p = evapotranspirasi potensial (mm/hari)

p = persentase rata-rata harian penyinaran matahari
 T_{mean} = suhu udara rata-rata harian (°C)

Nilai p tergantung dari posisi lintang tempat pengukuran dan waktu pengukuran. Nilai p masing-masing lokasi dapat dilihat pada Tabel 3. Apabila posisi lintang tempat pengukuran tidak tercantum dalam daftar tersebut maka perlu dilakukan interpolasi.

Tabel 3 Nilai p Pada Masing-masing Garis Lintang

Garis Lintang	U	Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Juni	Juli	Agt	Sep	Okt	Nov	Des
	S	Juli	Agt	Sep	Okt	Nov	Des	Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Juni
60		0.15	0.20	0.26	0.32	0.38	0.41	0.40	0.34	0.28	0.22	0.17	0.13
55		0.17	0.21	0.26	0.32	0.36	0.39	0.38	0.33	0.28	0.23	0.18	0.16
50		0.19	0.23	0.27	0.31	0.34	0.36	0.35	0.32	0.28	0.24	0.20	0.18
45		0.20	0.23	0.27	0.30	0.34	0.35	0.34	0.32	0.28	0.24	0.21	0.20
40		0.22	0.24	0.27	0.30	0.32	0.34	0.33	0.31	0.28	0.25	0.22	0.21
35		0.23	0.25	0.27	0.29	0.31	0.32	0.32	0.30	0.28	0.25	0.23	0.22
30		0.24	0.25	0.27	0.29	0.31	0.32	0.31	0.30	0.28	0.26	0.24	0.23
25		0.24	0.26	0.27	0.29	0.30	0.31	0.31	0.29	0.28	0.26	0.25	0.24
20		0.25	0.26	0.27	0.28	0.29	0.30	0.30	0.29	0.28	0.26	0.25	0.25
15		0.26	0.26	0.27	0.28	0.29	0.29	0.29	0.28	0.28	0.27	0.26	0.25
10		0.26	0.27	0.27	0.28	0.28	0.29	0.29	0.28	0.28	0.27	0.26	0.26
5		0.27	0.27	0.27	0.28	0.28	0.28	0.29	0.28	0.28	0.27	0.27	0.27
0		0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27

Ket : U : Lintang Utara, S : Lintang Selatan

Model Linacre

Metode ini hanya membutuhkan informasi parameter suhu. Model ini dapat dibuat berdasarkan Persamaan (6).

$$ET_p = \frac{(500T_m / (100 - A)) + 15(T_{mean} - T_d)}{80 - T_{mean}} \quad (6)$$

$$T_m = T_{mean} + 0.006h \dots \dots \dots (7)$$

Keterangan:

- ET_p = evapotranspirasi potensial (mm/hari)
- A = lintang (*degree*)
- h = elevasi (m)
- T_{mean} = suhu udara rata-rata (°C)
- T_d = suhu udara pada titik embun (°C)

Model Kharrufa

Model ini mirip dengan model Blaney-Cridlle yang hanya membutuhkan satu data cuaca dan parameter. Nilai evapotranspirasi model ini diberikan persamaan (8) berikut:

$$ET_p = 0.34p(T_{mean})^{1.3} \dots \dots \dots (8)$$

Keterangan:

- ET_p = evapotranspirasi potensial (mm/hari)
- p = persentase rata-rata harian penyinaran matahari (Tabel 2)
- T_{mean} = suhu udara rata-rata harian (°C)

Model Remanencko

Model ini membutuhkan dua data cuaca, yaitu suhu rata-rata harian dan kelembaban relatif. Adapun persamaan (9) model remanencko sebagai berikut:

$$ET_p = 0.00018(25 + T_{mean})^2(100 - RH) \dots \dots \dots (9)$$

Keterangan:

- ET_p = evapotranspirasi potensial (mm/hari)
- T_{mean} = suhu udara rata-rata harian (°C)
- RH = kelembaban relatif (%)

Apabila RH tidak diketahui, maka bisa diprediksi dengan menggunakan data suhu udara rata-rata (T_{mean}) dan suhu udara pada titik embun (T_d) dengan persamaan sebagai berikut:

$$RH = \frac{e^\circ(T_d)}{e^\circ(T_{mean})} \dots\dots\dots (10)$$

Keterangan:

$e^\circ(T)$ = tekanan uap jenuh

Nilai $e^\circ(T)$ dapat dihitung dengan persamaan 11 atau 12 dengan mengganti nilai T dengan suhu masing-masing.

$$e_2 = 33.8639[(0.00738T_{maks} + 0.8072)^8 - 0.000019|1.8T_{maks} + 48| + 0.001316] \dots\dots\dots (11)$$

$$e_1 = 33.8639[(0.00738T_{min} + 0.8072)^8 - 0.000019|1.8T_{min} + 48| + 0.001316] \dots\dots\dots (12)$$

Model Hargreaves

Hargreaves ini cukup beragam, dapat menggunakan satu parameter dan dua parameter. Model Hargreaves ini membutuhkan suhu udara rata-rata harian seperti persamaan (13) berikut:
 Data cuaca dua parameter

$$ET_p = 0.0023Ra(\sqrt{T_{max} - T_{min}})(T_{max} + 17.8) \dots\dots\dots (13)$$

Keterangan:

- ET_p = evapotranspirasi potensial (mm/hari)
- T_{max} = suhu udara maksimum harian (°C)
- T_{min} = suhu udara minimum harian (°C)
- T_{mean} = suhu udara rata-rata harian (°C)
- Ra = radiasi matahari *extraterrestrial* ($MJ\ m^{-2}\ hari^{-1}$)

Nilai Ra biasanya diprediksi dari posisi lintang tempat dan waktu pengukuran. Adapun persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$d_r = 1 + 0.33 \cos(0.0172J) \dots\dots\dots (14)$$

$$\varphi = \frac{\pi L}{180} \dots\dots\dots (15)$$

$$\delta = 0.409 \sin(0.0172J - 1.39) \dots\dots (16)$$

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) \tan(\delta)] \dots\dots (17)$$

$$R_a = 37.6d_r[\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \dots\dots\dots (18)$$

Keterangan:

- d_r = jarak relatif bumi dan matahari
- J = julian day (hari)
- φ = posisi lintang dalam satuan radian
- δ = deklinasi matahari
- ω_s = sudut jam matahari

Posisi lintang dalam satuan radian untuk lintang selatan (LS) bernilai negatif dan lintang utara (LU) bernilai positif. Adapun apabila data cuaca yang tersedia dua parameter, maka model Hargreaves dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$ET_p = 0.0135(T_{mean} + 17.78)R_s \left(\frac{238.8}{595.5 - 0.55T_{mean}} \right) \dots\dots\dots (19)$$

Keterangan:

- ET_p = evapotranspirasi potensial (mm/hari)
- T_{mean} = suhu udara rata-rata harian (°C)
- R_s = radiasi matahari ($MJ/m^2/hari$)

Metode Makkink

Metode makkink membutuhkan 2 data cuaca yaitu suhu udara rata-rata harian dan radiasi matahari total untuk memprediksi ET_p secara langsung. Adapun persamaan model ini diberikan oleh persamaan (20) sebagai berikut:

$$ET_p = 0.61 \left(\frac{\Delta_m}{\Delta_m + \gamma} \right) \frac{R_s}{58.5} - 0.12 \dots\dots (20)$$

Keterangan:

- ET_p = evapotranspirasi potensial (mm/hari)
- R_s = radiasi matahari (MJ/m²/hari)
- Δ_m = kemiringan garis fungsi tekanan uap jenuh (mb/°C)
- γ = konstanta psikometrik (mb/°C)

Besar nilai Δ_m sebagai berikut:

$$\Delta_m = 33.8639[0.05904(0.00738T_{mean} + 0.8072)^7 - 0.0000342] \dots\dots\dots (21)$$

Nilai γ dihitung dengan persamaan berikut ini:

$$p = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26} \dots\dots\dots (22)$$

$$\gamma = 0.665 \times 10^{-3} P \dots\dots\dots (23)$$

Keterangan:

- z = ketinggian diatas permukaan air laut tempat pengukuran (m)
- P = tekanan atmosfer (kPa)

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \dots\dots\dots (24)$$

$$N = \left(0.25 + 0.5 \frac{n}{N} \right) R_a \dots\dots\dots (25)$$

Keterangan:

- N = maksimum lama penyinaran (jam/hari)
- ω_s = sudut jam matahari
- n = lama penyinaran aktual (jam/hari)

Model Turc

Model Turc membutuhkan 2 data cuaca yaitu suhu udara rata-rata harian dan radiasi matahari total untuk memprediksi ET_p secara langsung. Adapun persamaan model ini diberikan oleh persamaan (26) sebagai berikut:

$$ET_p = 0.013 \left(\frac{T_{mean}}{T_{mean} + 15} \right) (R_s + 50) \dots\dots (26)$$

Keterangan:

- ET_p = evapotranspirasi potensial (mm/hari)
- T_{mean} = suhu udara rata-rata harian (°C)
- R_s = radiasi matahari (ly/hari)

Untuk menyeragamkan unit satuan Rs menjadi MJ/m²/hari maka unit satuan Rs perlu dikonversi sehingga persamaan diatas dapat dirubah menjadi berikut:

$$ET_p = 0.013 \left(\frac{T_{mean}}{T_{mean} + 15} \right) (R_s(23.88) + 50) \dots\dots\dots (27)$$

Model Jensesn-Haise

Model Jensen-Heise ini membutuhkan beberapa data cuaca yaitu suhu udara rata-rata harian, suhu udara maksimum harian, suhu udara minimum harian dan radiasi matahari total untuk memprediksi ET_p secara langsung. Adapun persamaan model ini diberikan oleh persamaan (28) sebagai berikut:

$$ET_p = C_T(T_{mean} - T_x)R_s \dots\dots\dots (28)$$

Keterangan:

- ET_p = evapotranspirasi potensial (mm/hari)
- T_{mean} = suhu udara rata-rata harian (°C)
- R_s = radiasi matahari (mm/hari)

$$ET_p = C_T(T_{mean} - T_x) \frac{R_s}{2.25} \dots\dots\dots (29)$$

C_T, T_x adalah fungsi dari tekanan uap jenuh yang dihitung suhu udara maksimum dan minimum harian.

Model Penman

Model penman membutuhkan empat parameter data cuaca, yaitu suhu udara, radiasi matahari, kelembaban relatif, kecepatan angin sehingga persamaan (30) model ini dapat diberikan sebagai berikut:

$$ET_p = c \left(\frac{WR_n}{2.45} + (1 - W)f(u)(e_a - e_d) \right) \dots\dots\dots (30)$$

Keterangan:

- ET_p = evapotranspirasi potensial (mm/hari)
- W = faktor pemberat yang berkaitan dengan suhu
- R_n = radiasi netto ekivalen evaporasi (MJ/m²/hari)
- F(u) = fungsi yang berkaitan dengan kecepatan angin
- E_a-e_d = perbedaan antara tekanan uap jenuh pada suhu udara rata-rata dengan tekanan uap aktual rata-rata udara (mb)

Nilai R_n dapat dihitung berdasarkan persamaan-persamaan berikut:

$$R_n = (1 - \alpha)R_s - R_{nl} \dots\dots\dots (31)$$

$$R_{nl} = \alpha \left(\frac{T_{max} - T_{min}}{2} \right) (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \left(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right) \dots\dots\dots (32)$$

$$R_{so} = 0.75R_a \dots\dots\dots (33)$$

$$e_a = \left(\frac{RH_{mean}}{100} \right) \left(\frac{e^\circ(T_{max}) + e^\circ(T_{min})}{2} \right) \dots\dots\dots (34)$$

$$e^\circ(T) = 0.6108 \left(\frac{17.27T}{T + 237.3} \right) \dots\dots\dots (35)$$

Keterangan:

- R_{nl} = radiasi gelombang panjang netto
- R_{so} = radiasi *clear-sky*
- e_a = tekanan uap aktual (kPa)
- RH_{mean} = kelembaban relatif rata-rata (%)
- e^o = tekanan uap jenuh pada suhu udara tertentu (kPa)
- α = albedo atau koefisien refleksi kanopi sesuai tanaman

Nilai fu dan (e_a-e_d) dapat dihitung berdasarkan persamaan - persamaan berikut:

$$f(u) = 0.27 \left(1 + \frac{8.64u}{100} \right) \dots\dots\dots (36)$$

$$e_a = 0.0478T_{mean}^2 - 0.823T_{mean} + 13.41 \dots\dots\dots (37)$$

$$e_d = e_a \left(\frac{RH}{100} \right) \dots\dots\dots (38)$$

Keterangan:

- u = kecepatan angin (m/s)
- R_{so} = radiasi *clear-sky*

Model Penman-Monteith

Model ini juga membutuhkan empat parameter data cuaca seperti model Penman sebelumnya dengan persamaan (39) sebagai berikut:

$$ET_p = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{mean} + 273} u (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u)} \dots\dots\dots (39)$$

Keterangan:

- ET_p = evapotranspirasi potensial (mm/hari)
- Δ = Kurva kemiringan tekanan uap (kPa/°C)
- G = flux panas tanah (MJ/m²/hari)
- E_a = tekanan uap jenuh (kPa)

Nilai Δ dihitung dengan persamaan berikut:

$$\Delta = \frac{4098(0.6108) \exp\left(\frac{17.27T_{mean}}{T_{mean} + 237.3}\right)}{(T_{mean} + 237.3)^2} \dots\dots\dots (40)$$

Nilai G pada periode siang hari diperkirakan menjadi:

$$G = 0.1R_n \dots\dots\dots (41)$$

Pada periode malam hari, persamaan G bisa diperkirakan menjadi:

$$G = 0.5R_n \dots\dots\dots (42)$$

Nilai e_s dihitung dengan persamaan berikut:

$$e_s = \frac{e^{\circ}(T_{max})+e^{\circ}(T_{min})}{2} \dots\dots\dots(43)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Evaporasi

Faktor yang mempengaruhi evaporasi yaitu faktor fisik dan faktor meteorologis. Faktor fisik meliputi kualitas air, bentuk, luas dan kedalaman air sedangkan faktor meteorologis

meliputi radiasi matahari, suhu udara, kelembaban, tekanan udara, dan angin. Jumlah radiasi matahari potensial yang dapat menguapkan air di permukaan tergantung pada lokasi dan waktu. Selain itu, sehubungan dengan perbedaan posisi matahari, maka radiasi matahari potensial juga bervariasi tergantung pada posisi lintang dan musim. Hasil perhitungan evaporasi di daerah Kabupaten Maros dapat dilihat pada Tabel 4.

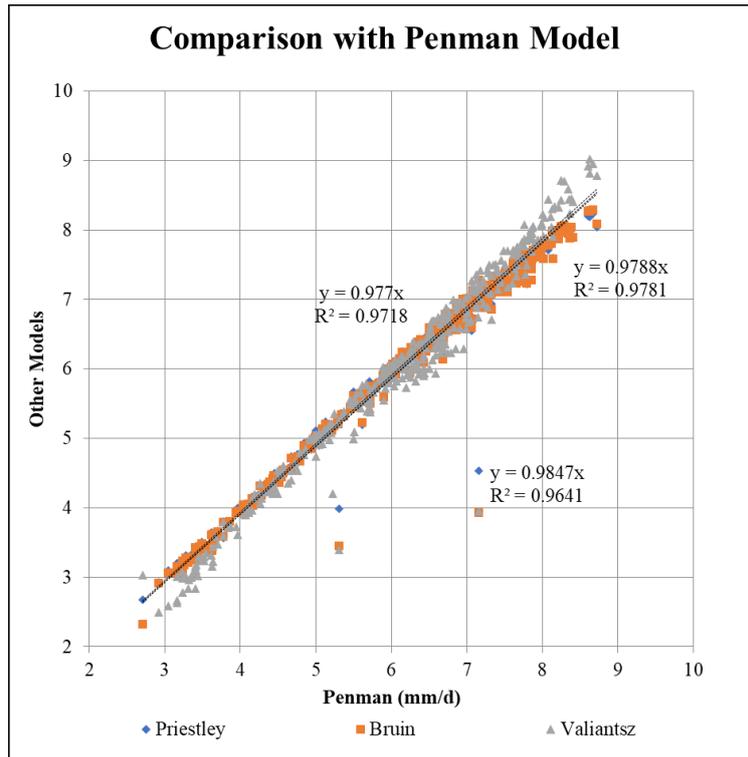
Tabel 4 Nilai Minimum, Maksimum, Rata-rata, dan Deviasi

Nilai	Tn (°C)	Tx (°C)	Ta (°C)	RH (%)	R (mm)	SS (jam)	U (m/detik)
Minimum	19.00	26.25	24.10	46.00	0.00	0.00	2.00
Rata-rata	23.90	32.02	27.58	77.28	5.35	7.65	4.96
Maksimum	26.20	38.30	30.90	97.00	133.00	11.50	12.00
Deviasi	1.38	1.67	1.14	9.87	14.00	3.43	1.24

Suhu udara sangat mempengaruhi aktifitas manusia dan makhluk hidup yang lain seperti pada Tabel 4, Suhu udara rata-rata dari suhu minimum, suhu rata-rata, dan suhu maksimum berturut turut adalah 23.90°C, 32.02°C, dan 27.58°C. Keadaan panas udara di Kabupaten Maros di sebabkan oleh panas matahari Radiasi matahari yang diserap oleh atmosfer dan panas yang diemisikan bumi dapat meningkatkan suhu udara sehingga menghasilkan suhu yang tinggi. Pada tekanan atmosfer, semakin tinggi suhu, semakin rendah kandungan uap airnya. Kelembaban udara maksimum di Kabupaten Maros yang dihasilkan sebesar 97.00% dengan standar deviasi 9.87.

Kelembaban udara ini juga mempengaruhi proses evapotranspirasi tanaman dan kandungan uap air di udara berubah-ubah bergantung pada suhu udara dan tekanan udara. Selain itu,

Kecepatan angin sangat mempengaruhi proses penguapan pada permukaan dimana kecepatan angin yang tinggi menyebabkan turbulensi udara, sehingga jumlah air yang menguap dari permukaan semakin besar. Kecepatan angin bergerak dari tempat bertekanan udara tinggi ke bertekanan udara rendah. Seperti pada Tabel 4, kecepatan angin maksimum yang dihasilkan sebesar 11.50 m/detik yang terjadi pada tanggal 10 Mei 2019. Parameter yang memiliki standar deviasi terkecil adalah suhu udara rata-rata (Ta). Model-model evaporasi yang digunakan adalah model Penman, Priestley, Bruin, dan Valiantzas. Dalam penelitian ini, model Penman pada evaporasi akan dibandingkan dengan model evaporasi lainnya (Priestley, Bruin, dan Valiantzas). Hasil perhitungan kodingan model-model tersebut akan dituangkan dalam grafik seperti pada Gambar 2.



Gambar 2 Perbandingan Dengan Model Penman

Tabel 5 Nilai Model-model Evapotranspirasi di Kabupaten Maros

Parameter	Eo (mm/hari)		
	Priestley	Bruin	Valiantzas
R ²	0.980	0.973	0.967
SSE	0.236	0.266	0.297

Berdasarkan Gambar 2, ketiga model tersebut memiliki Jumlah galat kuadrat (*sum of quadrate errors*, SSE). SSE adalah perhitungan statistik awal yang dipakai untuk menghitung nilai lain. Nilai SSE dihitung berdasarkan sekumpulan data dalam bentuk tabel (*Microsoft Excel*). Nilai SSE didapatkan dari perbandingan evaporasi model Penman dengan model lainnya (Priestley, Bruin, dan Valiantzas). Nilai SSE ketiga model tersebut berturut turut adalah 0.236, 0.266, dan 0.297 (Tabel 5). Semakin kecil nilai SSE, maka datanya semakin akurat sehingga model yang memiliki nilai SSE terkecil adalah model Priestley yaitu 0.236. Nilai SSE

mempengaruhi jumlah data (n). semakin besar nilai n, maka semakin sulit untuk menghasilkan nilai SSE yang kecil.

Tiga dari empat model kombinasi (Priestley–Taylor, DeBruin-Keijman, Penman) memberikan nilai standar deviasi yang berbeda-beda. Selain itu, nilai SSE berbanding terbalik dengan koefisien determinasi (R^2) yang dapat dilihat pada Gambar 1. Nilai R^2 pada ketiga model tersebut berturut-turut adalah 0.980, 0.973, dan 0.967 (Tabel 5). Model yang memiliki nilai R^2 terbesar adalah model Priestley. Model yang paling akurat adalah model yang memiliki nilai R^2 yang mendekati nilai 1. Berdasarkan hasil, Perbandingan model Penman dengan model Priestley merupakan model yang paling akurat dengan model lainnya (Bruin dan Valiantzas) dengan nilai 0.980.

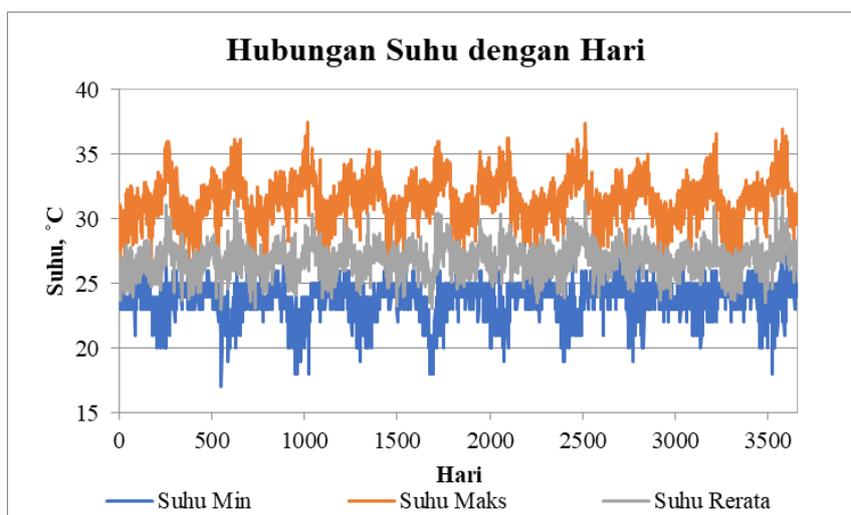
Tabel 6 Nilai Evaporasi Model Penman, Priestley, Bruin, dan Valiantzas

Evaporasi	Penman (mm/hari)	Priestley (mm/hari)	Bruin (mm/hari)	Valiantzas (mm/hari)
Minimum	2.7	2.7	2.3	2.5
Maksimum	8.7	8.2	8.3	9.0
Rata-rata	6.1	6.0	6.0	6.0

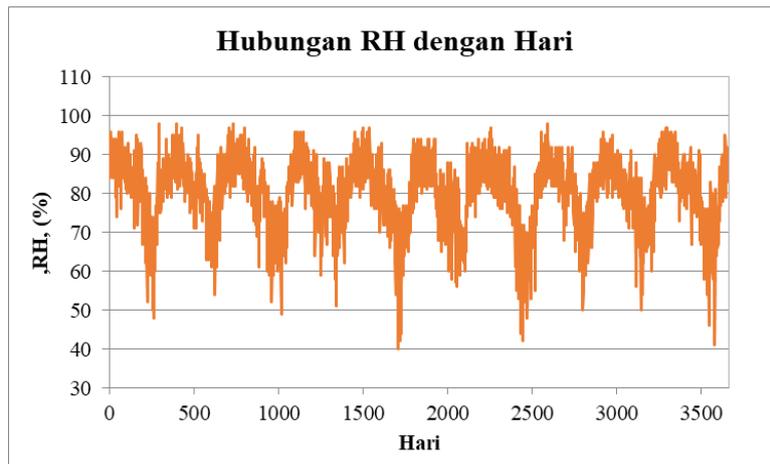
Berdasarkan Tabel 6, nilai evaporasi minimum dari keempat model (Penman, Priestley, Bruin, dan Valiantzas) berturut-turut adalah 2.7 mm/hari, 2.7 mm/hari, 2.3 mm/hari dan 2.5 mm/hari. Nilai evaporasi minimum dalam setahun di Kabupaten Maros pada model Penman dan Priestley adalah sama yaitu 2.7 mm/hari. Nilai evaporasi maksimum yang dihasilkan mempengaruhi nilai SSE yaitu semakin besar nilai evaporasi, nilai SSE semakin besar (Valiantz). Nilai yang dihasilkan pada Tabel 6 dapat dibandingkan dengan Tabel 6. Semakin kecil nilai evaporasi maksimum, nilai SSE yang dihasilkan semakin kecil (berbanding lurus) seperti pada model Priestley. Selain itu, nilai evaporasi rata-rata ketiga model (Priestley, Bruin, dan Valiantzas) tersebut adalah sama yaitu 6.0 mm/hari.

Evapotranspirasi

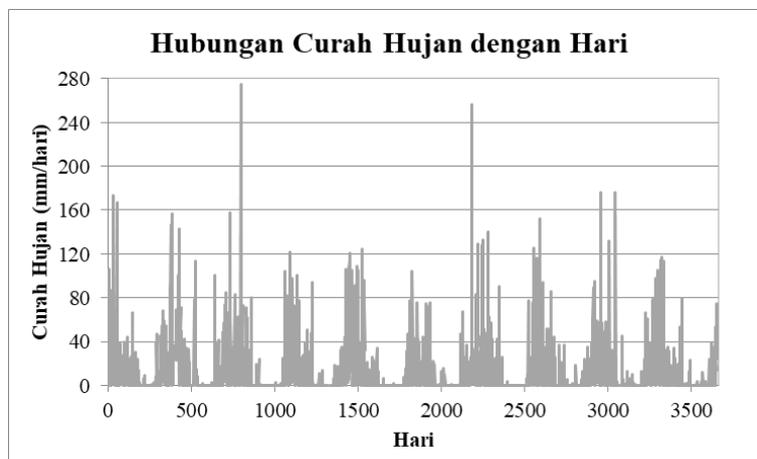
Evapotranspirasi adalah suatu gabungan evaporasi dan transpirasi tumbuhan yang hidup di permukaan bumi. Air yang diuapkan oleh tanaman dilepas ke atmosfer. Evaporasi merupakan pergerakan air ke udara dari berbagai sumber seperti tanah, atap, dan badan air. E_{Ta} merupakan total air yang menguap dari permukaan baik melalui proses evaporasi maupun transpirasi, sedangkan E_{Tp} merupakan potensi dari kemampuan dari atmosfer untuk menguapkan air dari permukaan baik melalui proses evaporasi dan transpirasi. Berdasarkan hasil perhitungan data iklim Kabupaten Maros, nilai minimum, maksimum, rata-rata, dan deviasi disajikan pada Tabel 7.



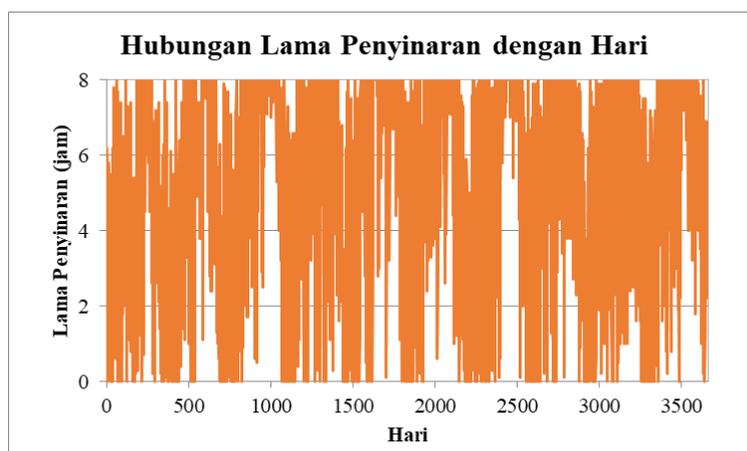
Gambar 3 Suhu Harian Kabupaten Maros



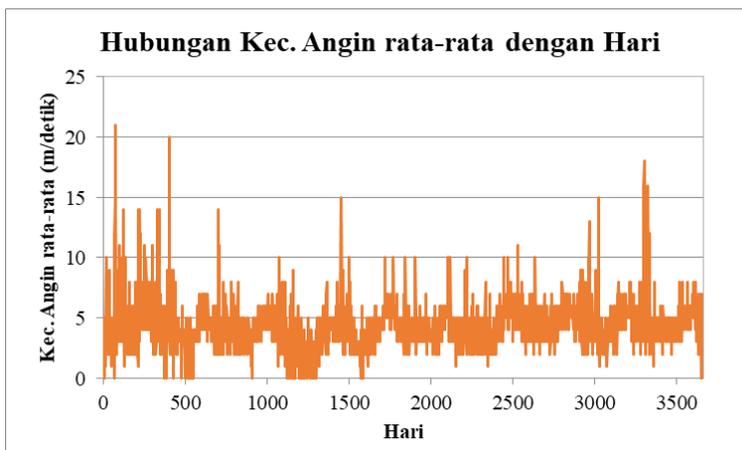
Gambar 4 Kelembaban Relatif Kabupaten Maros



Gambar 5 Curah Hujan (R) Kabupaten Maros



Gambar 6 Lama Penyinaran Matahari (SS) Kabupaten Maros



Gambar 7 Kecepatan Angin Kabupaten Maros

Data parameter iklim hasil pengamatan yaitu suhu, kelembaban relatif (RH), curah hujan (R), lama penyinaran matahari (SS), dan kecepatan angin (U), digunakan untuk menghitung evapotranspirasi potensial di Kabupaten Maros. Penelitian ini menggunakan data dari BMKG selama sepuluh tahun yaitu mulai dari tahun 2000 hingga 2009 atau selama 3653 hari dengan sembilan model evapotranspirasi yang digunakan

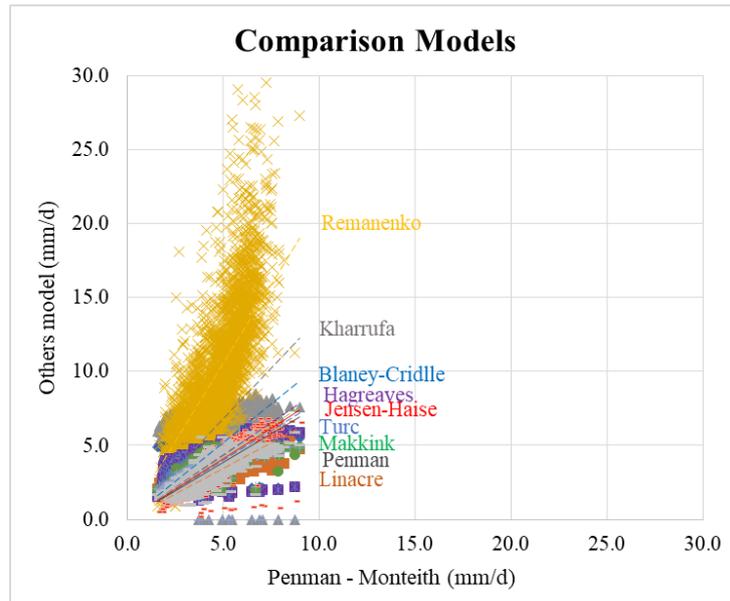
dalam perhitungan. Untuk mendapatkan model evapotranspirasi yang efisien yakni model dengan masukan parameter sedikit dan proses perhitungan tidak rumit, maka dilakukan perbandingan antar model sedangkan untuk mengetahui hubungan antar model digunakan tolok ukur koefisien determinasi (R^2) yang terdapat pada Tabel 8.

Tabel 7 Nilai minimum, maksimum, rata-rata, dan deviasi

Nilai	Tn (°C)	Tx (°C)	Ta (°C)	RH (%)	R (mm)	SS (jam)	U (m/detik)
Minimum	17.00	25.20	23.00	40.00	0.00	0.00	0.00
Rata-rata	23.70	31.50	26.90	80.50	10.00	5.30	4.40
Maksimum	29.00	37.50	31.70	98.00	275.00	8.00	21.00
Deviasi	1.40	1.70	1.10	8.60	22.20	2.70	1.80

Berdasarkan Tabel 7, curah hujan maksimum yang didapatkan 275.00 mm yang terjadi pada tanggal 27 Maret 2003. Kecepatan angin (U) yang dihasilkan sebesar 21.00 m/detik. Hal ini menunjukkan kecepatan yang besar. Standar deviasi yang dihasilkan setiap parameter seperti temperatur minimum (Tn), temperatur maksimum (Tx), temperatur udara (Ta), kelembaban rata-rata (RH), curah hujan (R), lamanya penyinaran matahari (SS), dan kecepatan angin maksimum (U) berturut-turut adalah 1.40, 1.70, 1.10, 8.60, 22.20, 2.70, dan 1.80. Deviasi terbesar yang

dihasilkan selama 10 tahun yaitu 2000 – 2009 adalah RH yaitu 22.20 sedangkan deviasi terkecil yang dihasilkan adalah Ta dengan nilai 1.10. Hasil ini sebagai parameter utama dalam menentukan nilai evapotranspirasi daerah Kabupaten Maros dengan menggunakan sembilan model yaitu Blaney-Cridlle, Linacre, Kharrufa, Remanencko, Hagreaves, Makkink, Turc, Jensen-Haise, dan Penman. Secara sederhana, hasil perhitungan *visual basic* comparison model dan R^2 dan SSE disajikan pada gambar dan tabel berikut.



Gambar 8 Comparison Model Evapotranspirasi

Tabel 8 Nilai R² dan SSE Sembilan Model

Model	R ²	SSE
Blaney-Cridlle	0.008	1.367
Linacre	0.313	1.655
Kharrufa	0.040	2.476
Remanenko	0.575	6.159
Hagreaves	0.771	0.857
Makkink	0.781	0.890
Turc	0.733	1.059
Jensen-Haise	0.889	0.963
Penman	0.810	1.156

Gambar 8 menunjukkan comparison model atau perbandingan model antara Penman-Monteith dengan sembilan model lainnya selama 10 tahun (2000 – 2009). Nilai SSE dari sembilan model tersebut dapat dilihat pada Tabel 8. Nilai SSE adalah perhitungan statistik awal yang dipakai untuk menghitung nilai lain seperti jika memiliki sekumpulan data, hubungan antara angka-angka dalam data tersebut dapat dicari. Nilai SSE terbesar adalah Remanenko yaitu 6.159 sedangkan nilai SSE terkecil adalah Hagreaves dengan nilai 0.857. Nilai evapotranspirasi maksimum yang dihasilkan kesembilan metode tersebut berturut-turut adalah 5.8

m/hari, 5.9 mm/hari, 8.5 mm/hari, 50.8 mm/hari, 6.2 mm/hari, 5.9 mm/hari, 5.0 mm/hari, 6.8 mm/hari, dan 5.9 mm/hari sedangkan nilai evapotranspirasi maksimum pada model Penman-Monteith selama 10 tahun adalah 9.0 mm/hari.

Berdasarkan data tersebut, model Remanenko merupakan nilai Evapotranspirasi maksimum terbesar dibandingkan dengan delapan metode lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa nilai SSE yang dihasilkan juga terbesar dibandingkan dengan model evapotranspirasi lainnya. Nilai evapotranspirasi (ET_P) maksimum dengan SSE memiliki hubungan yang

berbanding lurus. Semakin besar nilai ET_p , nilai SSE yang dihasilkan akan semakin besar. Selain nilai SSE, nilai R^2 dari sembilan model tersebut. Model evapotranspirasi dengan nilai R^2 terbesar adalah adalah Jensen-Haise yaitu 0.889 sedangkan nilai R^2 terkecil adalah Blaney-Cridlle yaitu 0.008 (sangat kecil).

Nilai koefisien determinasi antara 0 sampai dengan 1 (Riang 2004). Dinamakan koefisien determinasi karena $R^2 \times 100\%$ daripada variasi yang terjadi dalam variabel tak bebas Y dapat dijelaskan oleh variabel bebas X dengan adanya regresi linier Y atas X (Sujana 2011). Besarnya harga koefisien determinasi adalah berkisar $0 < R^2 < 1$. Artinya jika R^2 mendekati 1 maka dapat dikatakan pengaruh variabel bebas terhadap variabel terikat adalah besar (Zain 1995). Berarti model yang digunakan baik untuk menjelaskan pengaruh variabel tersebut. Untuk memastikan tipe hubungan antar variabel dengan berpedoman pada Tabel 9 dengan lima jenis interval koefisien dan tingga hubungan mulai dari sangat rendah, rendah, cukup kuat, kuat dan sangat kuat.

Tabel 9 Interpretasi Koefisien

Interval Koefisien	Tingkat Hubungan
0,80 1,000	Sangat Kuat
0,60 0,799	Kuat
0,40 0,599	Cukup Kuat
0,20 0,399	Rendah
0,00 0,199	Sangat Rendah

Sumber: (Sujana, 2001)

Berdasarkan hasil secara keseluruhan, koefisien determinasi (R^2) yang dihasilkan pada model Priestley yaitu 0.967 Jensen-Haise yaitu 0.889 menunjukkan tingkat hubungan yang Sangat Kuat yaitu berada diantara 0.80 – 1.00 seperti disajikan pada Tabel 9 sehingga dapat dikatakan pengaruh variabel bebas terhadap variabel terikat

adalah besar sehingga model yang digunakan baik untuk menjelaskan pengaruh variabel tersebut.

KESIMPULAN

Simpulan yang dapat ditarik dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Pada pemodelan evaporasi, model yang memiliki nilai R^2 terbesar adalah model Priestley yaitu 0.980
2. Pada pemodelan evapotranspirasi, model yang memiliki nilai R^2 terbesar adalah model Jensen-Haise yaitu 0.889
3. Kedua model yang memiliki nilai R^2 terbesar menunjukkan tingkat hubungan yang Sangat Kuat yaitu berada diantara 0.80 – 1.00

DAFTAR PUSTAKA

- Bruin K. 1979. The Priestley-Taylor evaporation model applied to a large shallow lake in the Netherland. *Journal of Applied Meteorology*. 18 : 898-903.
- Capece CL. 2002. *Comparison of Evapotranspiration Estimation Methods*. Yogyakarta (ID) : Kanisius.
- Doorenbos, P. (1977). *Guideline fo Predicting Crop Water Requirement*. Rome (IT) : FAO.
- Penman HL. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society*, (pp. 120 - 145).
- Priestley T. 1972. On the assessment of surfave heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Jurnal Monthly Weather Review*. 100: 81-92.
- Riang MS. 2014. Analisa faktor-faktor yang mempengaruhi hasil produksi padi di Deli Serdang. *Saintia Matematika*. 2 (1): 71 - 83.

- Rokhma. 2008. *Menyelamatkan Pangan dengan Irigasi Hemat*. Yogyakarta (ID): Kanisius.
- Singh X. 1997. Evaluation and Generalization of 13 Mass-transfer Equations for determining free water evaporation. *Hydrological Processes*. 11: 311-323.
- Sujana. 2001. *Metode Statistik*. Bandung (ID): Tarsito.
- Valiantzas. 2006. Simplified version for the Penman evaporation equation using routine weather data. *Journal of Hydrology*. 331, 3 - 15.
- Zain S. 1995. *Ekonometrika Dasar*. Jakarta (ID): Erlangga.

