



## **ANALISIS EVAPOTRANSPIRASI POTENSIAL PADA BERBAGAI MODEL EMPIRIS DAN JARINGAN SYARAF TIRUAN DENGAN DATA CUACA TERBATAS**

### *ANALYSIS OF POTENTIAL EVAPOTRANSPIRATION BY VARIOUS EMPIRICAL MODEL AND ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS WITH LIMITED WEATHER DATA*

Oleh:

**Chusnul Arif<sup>1)</sup>**, **Budi Indra Setiawan<sup>1)</sup>**, **Hanhan Ahmad Sofiyuddin<sup>2)</sup>**

<sup>1)</sup>Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, IPB University, Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680, Indonesia

<sup>2)</sup>Balai Teknik Irigasi, Direktorat Jenderal SDA, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Jl. Cut Meutia, Bekasi 17113, Indonesia

Korespondensi Penulis, email: chusnul\_arif@apps.ipb.ac.id

Naskah ini diterima pada 25 April 2020; revisi pada 11 September 2020;

Disetujui untuk dipublikasikan pada 3 November 2020

#### **ABSTRACT**

*On the determination of crop water requirements, climate data are essential but are often limited due to the farm field's lack of weather station. For this reason, it is necessary to consider plant water requirements with various potential evapotranspiration (ETp) models with various weather input parameters, including Artificial Neural Network (ANN) models. The objectives of this paper were 1) to develop ANN models to estimate ETp, 2) to compare various ETp models (empirical models) including ANN models with the FAO standard models, 3) to analyze crop water requirements by the models, and 4) to determine the recommended input parameters for estimating ETp. The analysis was performed based on the measurement of weather parameters data in the two rice planting seasons, i.e., April - August 2017 and January - May 2018. There are 8 ETp models (empirical models) and 3 ANN models with a combination of input parameters. The results of this study indicated that the ANN-2 model with solar radiation input parameters was the best ANN model with R<sup>2</sup> values 0.91-0.92 and RMSE 0.284 mm and 0.287 mm for the 2017 and 2018 planting seasons. ETp Turc model, one of the empirical ETp models with parameters input of air temperature and solar radiation, was the best model with the highest R<sup>2</sup> and the lowest RMSE. Therefore, these two models were the best models with total ETp values closed to the ETp FAO standard. In addition, the parameters of air temperature and solar radiation are recommended parameters to be measured in the determination of crop water requirements using the ETp Turc model. But if there is only one parameter that can be measured, it is recommended to measure solar radiation with ANN-2 models to determine potential evapotranspiration.*

**Keywords:** *potential evapotranspiration, artificial neural networks, crop water requirement, empirical model, weather parameter*

#### **ABSTRAK**

Data cuaca sangat diperlukan dalam penentuan kebutuhan air tanaman, namun sering kali ketersediaan stasiun cuaca di lapangan masih terbatas. Untuk itu, perlu dilakukan analisis berbagai model evapotranspirasi potensial (ETp) dengan beragam parameter input, termasuk juga model Jaringan Syaraf Tiruan (JST) sebagai pertimbangan dalam penentuan kebutuhan air tanaman. Tujuan makalah ini adalah 1) mengembangkan model JST untuk menduga ETp, 2) membandingkan berbagai model ETp termasuk model JST dengan model standar FAO, 3) untuk menganalisis kebutuhan air tanaman dengan model tersebut, dan 4) menentukan parameter input yang direkomendasikan untuk pendugaan ETp. Analisis didasarkan pada data pengukuran parameter cuaca pada dua musim tanam padi, yaitu pada bulan April - Agustus 2017 dan Januari - Mei 2018. Terdapat 8 Model ETp (model empiris) dan 3 model JST dengan kombinasi parameter input. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa Model JST-2 dengan parameter input radiasi matahari merupakan model JST terbaik dengan nilai R<sup>2</sup> 0,91-0,92 dan RMSE 0,284 mm dan 0,287 mm untuk percobaan tahun 2017 dan 2018. Model ETp Turc, salah satu model ETp empiris dengan parameter input suhu udara dan radiasi matahari, merupakan model terbaik dengan nilai R<sup>2</sup> tertinggi dan RMSE terendah. Sehingga kedua model tersebut merupakan model terbaik dengan nilai ETp total yang mendekati ETp standard FAO. Selain itu, parameter suhu udara dan radiasi matahari merupakan parameter yang direkomendasikan untuk diukur dalam penentuan kebutuhan air tanaman menggunakan model ETp Turc. Tetapi apabila hanya satu parameter yang dapat diukur, maka direkomendasikan untuk mengukur radiasi matahari dengan model JST-2 untuk penentuan evapotranspirasi potensial.

**Kata kunci:** *evapotranspirasi potensial, jaringan syaraf tiruan, kebutuhan air tanaman, model empiris, parameter cuaca*

## I. PENDAHULUAN

Program modernisasi irigasi memiliki 5 pilar, salah satunya adalah adanya sistem pengelolaan irigasi yang ditujukan untuk pengoperasian yang lebih praktis, efektif dan efisien. Dengan kata lain, modernisasi irigasi dipadukan dalam suatu sistem pengelolaan partisipatif dengan upaya untuk meningkatkan pelayanan yang lebih efektif dan efisien serta berkelanjutan guna mewujudkan ketahanan pangan dan air (Mulyadi, Soekarno, & Winskyati, 2014).

Pada tingkat yang lebih teknis, suplai air irigasi harus diberikan sesuai dengan kebutuhan air tanaman aktual. Evapotranspirasi potensial (ETp) merupakan parameter iklim yang berguna untuk memperkirakan kebutuhan air tanaman sesuai kondisi cuaca setempat. ETp menggambarkan laju penguapan air dari permukaan tanah bervegetasi kombinasi proses evaporasi dan transpirasi. Handoko (1995) mendefinisikan ETp sebagai laju maksimum kehilangan air pada suatu tanaman pada kondisi iklim tertentu dimana ketersediaan air tanahnya dalam kondisi cukup. Data ETp ini sangat penting bagi perencanaan operasi irigasi dalam menunjang pengelolaan irigasi yang lebih efektif dan efisien guna mendukung program modernisasi irigasi.

*Food and Agriculture Organization* (FAO) menetapkan model Penman-Monteith (PM) (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998) sebagai model baku untuk menghitung ETp yang dimuat dalam buku *FAO Irrigation and Drainage* Nomor 56. Model ini dibangun berdasarkan pendekatan kombinasi keseimbangan energi dengan transfer massa untuk menghitung evaporasi dari permukaan air yang merujuk pada data iklim, yaitu radiasi matahari, suhu udara, kelembaban udara dan kecepatan angin. Karena itu, keempat data ini perlu diukur secara kontinyu untuk menghitung ETp berdasarkan pada model PM tersebut. Dimana, sebagaimana disebutkan di atas, pengukuran keempat data iklim tersebut banyak kendalanya. Selain itu, prosedur perhitungan model PM yang juga membutuhkan informasi tambahan cukup panjang dan begitu kompleks.

Selain model PM, terdapat beberapa model ETp yang lebih sederhana dan membutuhkan lebih sedikit masukan data (Maulé, Helgalson, McGinn, & Cutforth, 2005). Namun, akurasi model tersebut masih rendah karena tidak sesuai dengan kondisi iklim setempat. Perbandingan akurasi di antara berbagai model ETp telah dilaporkan di beberapa negara, seperti di US (Douglas, Jacobs, Sumner, & Ray, 2009), Malaysia (Tukimat, Harun, & Shahid, 2012), Turki (Kisi, 2014), Polandia (Bogawski & Bednorz, 2014) dan Cina (Zhao *et al.*, 2015).

Indonesia, perbandingan antar model ETp, di antaranya, dilakukan di Lampung (Manik, Sanjaya, & Rosadi, 2017) dan Jawa Barat (June, Dewi, & Mejjide, 2018). Namun, model yang diperbandingkan masih sangat terbatas dan belum beragam. Suprayogi, Setiawan & Prasetyo (2003) juga telah membandingkan beberapa model, namun parameter masukan yang digunakan masih cukup kompleks.

Seiring dengan semakin pesatnya perkembangan ilmu komputasi dengan berbagai metode yang dikembangkan termasuk metode kecerdasan buatan (*artificial intelligence*), memungkinkan analisis data lebih cepat dan singkat. Jaringan Syaraf Tiruan (JST) merupakan salah satu metode dalam hal kecerdasan buatan yang memiliki kemampuan untuk melakukan identifikasi dengan lebih cepat dan akurat. Model JST memungkinkan menggunakan *multivariable inputs* dan *multivariable outputs*. Model JST ini telah banyak juga digunakan untuk menduga ETp.

Kumar, Raghuwanshi, & Singh (2011) telah mereview 25 makalah yang mengkaji penggunaan JST untuk menduga ETp. Namun, *variable input* yang digunakan masih cukup banyak dan sering tidak tersedia di lapangan. Sama halnya dengan yang dilakukan oleh Suprayogi, Setiawan & Suroso (2004). Beberapa makalah lainnya yang lebih terbaru juga masih menggunakan *variable input* yang banyak (lebih dari satu) untuk menduga ETp (Falamarzi, Palizdan, Huang, & Lee, 2014; Yassin, Alazba, & Mattar, 2016).

Variabel iklim yang dapat diukur di lapangan sering kali terbatas. Untuk menyelesaikan permasalahan tersebut, perlu dikaji dan ditemukan model yang lebih akurat yang membutuhkan data iklim lebih sedikit dan mudah diukur, suhu udara atau pun radiasi matahari saja. Selain itu, dengan penerapan model JST, mungkin dapat dikembangkan model JST untuk menduga ETp yang membutuhkan lebih sedikit *variable input* yang lebih mendekati hasil perhitungan model PM.

Tujuan penelitian ini adalah 1) menghasilkan model JST yang membutuhkan *variable input* yang minimum untuk menduga ETp, 2) mengetahui akurasi berbagai model ETp termasuk model JST ini diperbandingkan dengan model PM, 3) mendapatkan kebutuhan air tanaman berdasarkan berbagai model ETp, dan 4) mendapatkan variabel yang signifikan untuk menghasilkan ETp yang lebih mewakili kondisi iklim Indonesia, khususnya Jawa Barat.

## II. METODOLOGI

### 2.1. Waktu dan Tempat Pengambilan Data

Data yang digunakan dalam analisis ini diperoleh dari penelitian yang dilakukan selama dua musim tanam padi pada tahun 2017 dan 2018. Satu musim tanam membutuhkan waktu sekitar 120 hari (4 bulan). Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Lapang Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan yang terletak pada 6°35'35.36" LS dan 106°46'17.95" BT di Bogor, Jawa Barat. Penelitian pada tahun 2017 dilaksanakan pada bulan April sampai dengan Agustus 2017, sedangkan pada tahun 2018 dilaksanakan pada bulan Januari sampai dengan Mei 2018.

### 2.2. Skema Pengukuran di Lapangan

Data cuaca yang diukur terdiri dari 4 parameter utama, yaitu suhu udara, radiasi matahari, kelembaban relatif dan kecepatan angin. Suhu udara diukur dengan sensor suhu, kelembaban relatif diukur dengan sensor kelembaban udara, radiasi matahari diukur dengan pyranometer, dan kecepatan angin diukur dengan anemometer dengan ketinggian 2 m di atas permukaan tanah sesuai dengan standar. Skema pengukuran dapat dilihat pada Gambar 1 yang terintegrasi dalam set *Automatic Weather Station (AWS)* yang diproduksi oleh Davis Corp USA yang telah terstandarisasi internasional.

Pengambilan data dilakukan secara otomatis setiap 30 menit, dimana data tersebut tersimpan dalam sebuah *console* yang dilengkapi dengan *datalogger*. Analisis data dilakukan harian sesuai dengan model ETp yang digunakan.



Keterangan: a: sensor suhu dan kelembaban, b: pyranometer, c: anemometer, d: *console*

**Gambar 1** Skema Pengukuran Data Cuaca Menggunakan AWS

### 2.3. Penentuan Model Evapotranspirasi Potensial

Secara aktual evapotranspirasi dapat diukur dengan menggunakan lysimeter dengan prinsip keseimbangan air. Selain itu evapotranspirasi aktual (ETa) juga dapat diestimasi dengan menggunakan metode *Eddy-Covariance* (Gebler *et al.*, 2015). Sedangkan evapotranspirasi potensial (ETp) ditentukan berdasarkan model-model empiris yang diturunkan dari ketersediaan data cuaca. Model ETp cukup banyak dan beragam, dari model yang sederhana sampai model yang kompleks. Data cuaca atau klimatologi yang biasa diukur adalah suhu udara, radiasi matahari, kelembaban udara, dan kecepatan angin. Data-data tersebut diukur secara kontinyu karena perubahannya sangat dinamis seiring perubahan waktu.

Analisis evapotranspirasi potensial pada penelitian ini dihitung berdasarkan 8 model ETp, yaitu Blaney-Cridle, Kharuffa, Remanenکو, Hargreaves, Turc, Jensen-Haise, Penman, dan Penman-Monteith. Data parameter *input* model masing-masing dapat dilihat pada Tabel 1.

**Tabel 1** Kebutuhan Parameter Input Masing-masing Model ETp

No.	Model	T	Rs	RH	u	d	crop
1	Blaney-Cridley	x					
2	Kharuffa	x					
3	Remanenکو	x		x			
4	Hargreaves	x	x				
5	Turc	x	x				
6	Jensen-Haise	x	x				
7	Penman	x	x	x	x	x	
8	Penman-Monteith	x	x	x	x	x	x

Keterangan:

T : suhu udara,

Rs : Radiasi matahari

RH : kelembaban relatif

u : kecepatan angin

d : panjang hari

crop : faktor tanaman

#### 2.3.1. Model Blaney-Cridle

Model ini merupakan model yang paling sederhana, karena hanya membutuhkan data suhu udara. Adapun persamaannya adalah (Brouwer & Heibloem, 1986):

$$ET_p = p(0.46T_{mean} + 8) \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan:

ETp : evapotranspirasi potensial (mm/hari)

p : persentase rata-rata harian penyinaran matahari. Besarnya nilai p tergantung dari posisi lintang tempat pengukuran dan waktu pengukuran. Nilai p ini sudah ditentukan berdasarkan data empiris  
*T<sub>mean</sub>* : suhu udara rata-rata harian (°C)

### 2.3.2. Model Kharrufa

Model ini serupa dengan model Blaney-Cridle yang hanya membutuhkan satu data input yaitu suhu udara. Adapun persamaannya diberikan sebagai berikut (Xu, 2002):

$$ET_p = 0.34pT_{mean}^{1.3} \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan:

ET<sub>p</sub> : evapotranspirasi potensial (mm/hari)  
 p : persentase rata-rata harian penyinaran matahari  
*T<sub>mean</sub>* : suhu udara rata-rata harian (°C)

### 2.3.3. Model Remanencko

Model ET<sub>p</sub> lebih banyak membutuhkan data cuaca dibandingkan dua model sebelumnya. Data tersebut adalah suhu rata-rata harian dan kelembaban relatif. Adapun persamaannya adalah sebagai berikut (Xu, 2002):

$$ET_p = 0.00018(25 + T_{mean})^2(100 - RH) \dots\dots\dots(3)$$

Keterangan:

ET<sub>p</sub> : evapotranspirasi potensial (mm/hari)  
 RH : kelembaban relatif (%)  
*T<sub>mean</sub>* : suhu udara rata-rata harian (°C)

### 2.3.4. Model Hargreaves

Model ini juga cukup beragam dan dapat diturunkan hanya dengan satu data parameter cuaca yaitu suhu udara, maupun dua data yang terdiri dari suhu udara dan radiasi matahari. Model yang membutuhkan satu data cukup kompleks dengan beberapa persamaan, sedangkan model dengan dua parameter cukup sederhana. Model dengan satu parameter suhu udara sudah diwakili oleh model sebelumnya, maka model Hargreaves yang digunakan adalah model dengan dua parameter dengan persamaan berikut ini (Wu, 1997):

$$ET_p = 0.0135(T_{mean} + 17.78)R_s \left( \frac{238.8}{595.58 + 55T_{mean}} \right) \dots\dots\dots(4)$$

Keterangan:

ET<sub>p</sub> : evapotranspirasi potensial (mm/hari)  
*T<sub>mean</sub>* : suhu udara rata-rata (°C)  
 R<sub>s</sub> : radiasi matahari (MJ/m<sup>2</sup>/hari)

### 2.3.5. Model Turc

Model ini sama dengan model Hargreaves yang membutuhkan 2 data cuaca yaitu suhu udara rata-

rata harian dan radiasi matahari. Adapun persamaan model ini diberikan oleh persamaan sebagai berikut (Xu dan Chen, 2005):

$$ET_p = 0.013 \left( \frac{T_{mean}}{T_{mean} + 15} \right) (R_s + 50) \dots\dots\dots(5)$$

Dimana, ET<sub>p</sub> adalah evapotranspirasi potensial (mm/hari), *T<sub>mean</sub>* adalah suhu udara rata-rata harian (°C), dan R<sub>s</sub> adalah radiasi matahari total (ly/hari). Untuk menyeragamkan unit satuan R<sub>s</sub> menjadi MJ/m<sup>2</sup>/hari maka unit satuan R<sub>s</sub> perlu dikonversi sehingga persamaan diatas dapat dirubah menjadi:

$$ET_p = 0.013 \left( \frac{T_{mean}}{T_{mean} + 15} \right) (R_s * 23.88 + 50) \dots\dots\dots(6)$$

### 2.3.6. Model Jensen-Haise

Model ini lebih kompleks dibandingkan model sebelumnya dimana 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<sub>p</sub> secara langsung. Adapun persamaan model ini diberikan oleh persamaan sebagai berikut (Jensen, 1980):

$$ET_p = C_T(T_{mean} - T_x)R_s \dots\dots\dots(7)$$

Dimana, ET<sub>p</sub> adalah evapotranspirasi potensial (mm/hari), *T<sub>mean</sub>* adalah suhu udara rata-rata harian (°C), R<sub>s</sub> adalah radiasi matahari ekivalen evaporasi (mm/hari). Agar unit satuan R<sub>s</sub> menjadi MJ/m<sup>2</sup>/hari maka persamaan diatas dapat diubah menjadi:

$$ET_p = C_T(T_{mean} - T_x) \frac{R_s}{2.45} \dots\dots\dots(8)$$

Sedangkan C<sub>T</sub> dan T<sub>x</sub> merupakan fungsi dari tekanan uap jenuh yang dihitung suhu udara maksimum dan minimum harian. Adapun fungsi-fungsi tersebut adalah sebagai berikut:

$$C_T = \frac{1}{C_1 + 7.3C_H} \dots\dots\dots(9)$$

$$C_H = \frac{50}{e_2 - e_1} \dots\dots\dots(10)$$

$$C_1 = 38 - \frac{2z}{305} \dots\dots\dots(11)$$

$$T_x = -2.5 - 0.14(e_2 - e_1) - \frac{z}{550} \dots\dots\dots(12)$$

Keterangan:

z : ketinggian di atas permukaan air laut tempat pengukuran (m)  
 e<sub>2</sub> : tekanan uap jenuh dihitung berdasarkan suhu maksimum harian (mb)  
 e<sub>1</sub> : tekanan uap jenuh dihitung berdasarkan suhu minimum harian (mb)

### 2.3.7. Model Penman

Model ini membutuhkan parameter cuaca paling banyak dibandingkan model sebelumnya. Terdapat 4 parameter data cuaca, yaitu suhu udara, radiasi matahari, kelembaban relatif dan kecepatan angin. Persamaan model ini diberikan sebagai berikut (Doorenbos & Pruitt, 1977):

$$ETp = c[WR_n + (1 - W)f(u)(ea - ed)] \dots\dots\dots (13)$$

Keterangan:

- ETp : evapotranspirasi potensial (mm/hari)
- W : faktor pemberat yang berkaitan dengan suhu
- Rn : radiasi netto ekivalen evaporasi (mm/hari)
- f(u) : fungsi yang berkaitan dengan kecepatan angin
- (ea-ed) : perbedaan antara tekanan uap jenuh pada suhu udara rata-rata dengan tekanan uap aktual rata-rata udara (mb)
- c : faktor koreksi

Agar Rn dalam unit satuan MJ/m<sup>2</sup>/hari, maka persamaan di atas menjadi:

$$ETp = c \left[ \frac{WR_n}{2.45} + (1. W)f(u)(ea - ed) \right] \dots\dots\dots (14)$$

Sedangkan nilai Rn bisa dihitung dengan beberapa persamaan sebagai berikut:

$$R_n = (1\alpha\alpha)R_s - R_{nl} \dots\dots\dots (15)$$

$$R_{nl} = \alpha \left[ \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \right] (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \left( 1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right) \dots\dots (16)$$

$$R_{so} = 0.75R_a \dots\dots\dots (17)$$

$$e_a = \frac{RH_{mean}}{100} \left[ \frac{e^o(T_{max}) + e^o(T_{min})}{2} \right] \dots\dots\dots (18)$$

$$e^o(T) = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27T}{T+237.3}\right) \dots\dots\dots (19)$$

Keterangan:

- Rnl : radiasi gelombang panjang netto
- Rso : radiasi *clear-sky*, ea tekanan uap aktual (kPa)
- RH<sub>mean</sub> : kelembaban relatif rata-rata (%)
- e<sub>o</sub> : tekanan uap jenuh pada suhu udara tertentu (kPa)
- α : albedo atau koefisien refleksi kanopi sesuai tanaman

Pada persamaan 14, f(u) dan (ea-ed) dihitung dengan persamaan berikut ini:

$$f(u) = 0.27 \left( 1 + \left( \frac{8.64u}{100} \right) \right) \dots\dots\dots (20)$$

$$ea = 0.0478T_{mean}^2 - 0.823T_{mean} + 13.41 \dots (21)$$

$$ed = ea \frac{RH}{100} \dots\dots\dots (22)$$

Keterangan:

- u : kecepatan angin (m/s)
- RH : kelembaban relatif (%)

### 2.3.8. Model Penman-Monteith

Model ini merupakan model standard FAO yang merupakan modifikasi dari model Penman sebelumnya dengan jumlah data yang dibutuhkan adalah sama. Adapun persamaannya ada sebagai berikut (ini juga membutuhkan empat parameter data cuaca seperti model Penman sebelumnya dengan persamaan sebagai berikut (Allen *et al.*, 1998; Fisher, DeBiase, Qi, Xu, & Goldstein, 2005):

$$ETp = \frac{0.408\Delta.R_n - G + \gamma \frac{900}{T_{mean} + 273} u (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u)} \dots\dots\dots (23)$$

Keterangan:

- ETp : evapotranspirasi potensial (mm/hari)
- Δ : kurva kemiringan tekanan uap (kPa/°C)
- G : flux panas tanah (MJ/m<sup>2</sup>/ hari)
- e<sub>s</sub> : tekanan uap jenuh (kPa)

D dihitung dengan persamaan berikut ini:

$$\Delta = \frac{4098 [0.6108 \exp(\frac{17.27T_{mean}}{T_{mean} + 237.3})]}{(T_{mean} + 237.3)^2} \dots\dots\dots (24)$$

Sedangkan G pada periode siang hari diperkirakan menjadi:

$$G = 0.1R_n \dots\dots\dots (25)$$

Pada periode malam hari, persamaan G bisa diperkirakan menjadi:

$$G = 0.5R_n \dots\dots\dots (26)$$

## 2.4. Pengembangan Model JST

*Artificial Neural Network* (ANN) atau Jaringan Syaraf Tiruan (JST) merupakan salah satu metode dalam kecerdasan buatan yang merupakan model matematika atau model komputasi yang terinspirasi dari aspek struktural maupun fungsional dari jaringan syaraf biologis yang berada di otak manusia. Atau dengan kata lain JST merupakan salah satu representasi buatan dari otak manusia yang berusaha untuk memahami fakta untuk proses pembelajaran yang kemudian ditarik kesimpulan sehingga bisa menduga kasus lain yang serupa. Menurut Lippman (1998) dan Kusumadewi (2003) JST merupakan penjabaran fungsi otak manusia dalam bentuk fungsi matematika untuk mensimulasikan proses pembelajaran dengan menjalankan proses perhitungan secara paralel. Sebenarnya metode ini sudah cukup lama dikenal dan pertama kali dikenalkan oleh Waren McCulloch dan Walter Pitts tahun 1943.

Model JST mulai bekerja dengan menerima *input* atau masukan, setiap masukan kemudian terkoneksi dengan keluaran (*output*) yang direpresentasikan oleh pembobot (*weight*). Pada jenis JST tertentu, sebelum terkoneksi dengan keluaran biasanya ada lapisan tersembunyi (*hidden layer*) yang juga terkoneksi dengan pembobot. Untuk saling terhubung, diperlukan signal aktivasi dalam bentuk fungsi aktivasi/fungsi transfer untuk menghasilkan keluaran (*output*) dari sel syaraf.

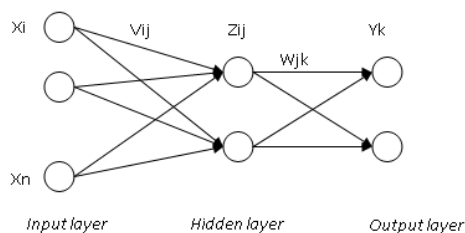
Arsitektur model JST cukup beragam. Arsitektur yang paling sederhana adalah *Single Layer Perceptron*. Model ini merupakan model JST yang paling sederhana yang hanya terdiri dari lapisan input dan sebuah unit *output*. Ditemukan oleh Frank Rosenblatt tahun 1950-an untuk pemodelan sederhana retina mata manusia. Model ini cocok digunakan untuk mengklasifikasikan suatu tipe pola tertentu/pemisahan secara linear.

Adapun model JST yang cukup banyak diaplikasikan dalam bidang pengelolaan air termasuk irigasi adalah model *Backpropagation*. Algoritma *backpropagation* menggunakan *error output* untuk mengubah nilai pembobotnya dalam arah mundur (*backward*). Untuk mendapatkan *error output*, tahap perambatan maju (*forward propagation*) harus dikerjakan terlebih dahulu (Kusumadewi, 2003). Model JST ini telah terbukti efektif dan akurat untuk diaplikasikan dalam bidang pengelolaan air dan lingkungan seperti estimasi kelembaban tanah dari lahan sawah (Arif, Setiawan, Mizoguchi, & Doi, 2012), pendugaan emisi gas rumah kaca dari lahan pertanian dengan berbagai perlakuan pengelolaan air (Arif *et al.*, 2015; Setiawan *et al.*, 2014), pendugaan suhu untuk larutan nutrisi didalam *greenhouse* (Arif *et al.*, 2010) dan lain sebagainya.

**Tabel 2** Model JST yang Dikembangkan pada Studi ini

Model	Parameter Input	Jumlah Node Input	Jumlah Node Hidden	Jumlah Node Output
JST-1	T	1	3	1
JST-2	Rs	1	3	1
JST-3	T, Rs	2	3	1

Ket: T: suhu udara, Rs: Radiasi matahari



**Gambar 2** Arsitektur *Backpropagation* yang digunakan (Kusumadewi, 2003)

Model JST yang dikembangkan dalam makalah ini menggunakan algoritma *Backpropagation* dengan tiga layer, yaitu layer *input*, *hidden*, dan *output* (Gambar 2). Sesuai dengan salah tujuan makalah ini untuk menentukan parameter utama yang berpengaruh terhadap ETp, maka input yang dipilih adalah parameter cuaca. Dari Tabel 1 dapat dilihat bahwa parameter suhu udara dan radiasi matahari hampir dapat dijumpai pada setiap model, oleh sebab itu kedua parameter ini digunakan sebagai paramater input. Sehubungan dengan kemampuan model JST yang mampu mempelajari pola data dengan minimum input, maka dikembangkan 3 model JST dengan kombinasi input yang berbeda sebagaimana disajikan dalam Tabel 2.

Adapun fungsi aktivasi, baik untuk perhitungan *input layer* ke *hidden layer* maupun dari *hidden layer* ke *output layer*, yang digunakan dalam model JST ini adalah fungsi sigmoid berikut ini:

$$f(Z_{ij}) = \frac{1}{1 + \exp^{-\sigma(Z_{ij})}} \dots\dots\dots (27)$$

$$Z_{ij} = \sum_{i=1}^n X_i V_{ij} \dots\dots\dots (28)$$

Keterangan:

- $X_i$  : data input ke-i
- $V_{ij}$  : pembobot pada input ke-i dan hidden ke-j
- $\sigma$  : konstanta fungsi sigmoid nilai dari 0-1

**2.5. Uji Performansi Model**

Pada evaluasi kinerja model, baik model ETp maupun JST, digunakan dua indikator yaitu Koefesien Determinasi ( $R^2$ ) dan *Root Mean Square Error* (RMSE) sesuai persamaan berikut ini (Kisi, 2014):

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}))^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \dots\dots\dots (29)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2} \dots\dots\dots (30)$$

Keterangan:

- n atau N : jumlah data  $\bar{x}$  dan  $\bar{y}$  adalah nilai rata-rata dari data perhitungan/prediksi model maupun acuan
- $x_i$  : data perhitungan/prediksi model
- $y_i$  : data acuan

Sesuai tujuan, data acuan yang digunakan dalam evaluasi ini adalah data model Penman-Monteith yang menjadi standard perhitungan standard ETp .

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1. Kondisi Cuaca pada Waktu Pengamatan

Kondisi cuaca selama percobaan di tahun 2017 dan 2018 sangat berfluktuasi (Gambar 3-4). Pada tahun 2017, percobaan dimulai pada bulan April 2017 dimana suhu udara maksimum mencapai 36,4°C yang juga merupakan suhu maksimum selama percobaan pada tahun ini. Sedangkan suhu rata-rata dan minimum pada bulan ini adalah 26,8°C dan 22°C. Percobaan satu musim tanam selesai pada bulan Juli, dimana suhu udara rata-rata pada bulan ini adalah 26,4°C, sedikit lebih rendah dari bulan April. Secara umum kisaran suhu pada musim percobaan ini yang merupakan musim kering adalah 20,1 – 36,4°C dengan suhu rata-rata adalah 26,7°C. Pada tahun 2018, percobaan dimulai pada bulan Januari yang masih masuk musim penghujan. Pada bulan ini suhu udara lebih rendah dibandingkan suhu udara pada awal musim di percobaan tahun 2017. Pada bulan ini, suhu udara maksimum dan rata-rata adalah 32,1°C dan 25,1°C.

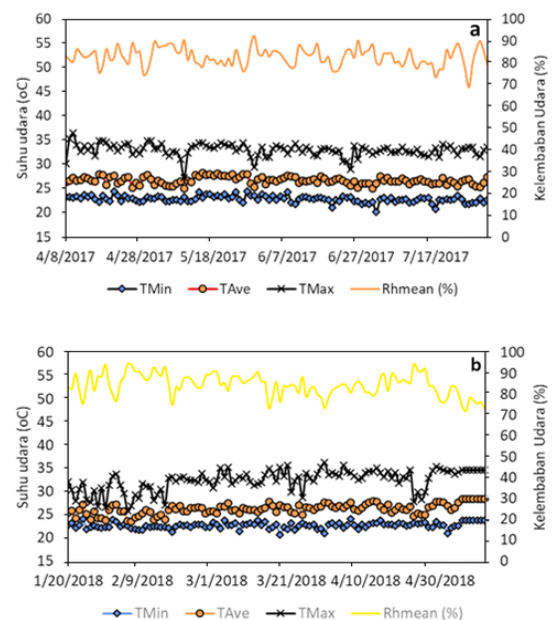
Sedangkan akhir percobaan terjadi pada bulan Mei dengan terjadinya peningkayan suhu udara maksimum dan rata-rata menjadi 34,6°C dan 27,8°C. Adapun rentang suhu pada percobaan tahun 2018 adalah 20,6 – 36,2°C dengan suhu rata-rata 26,2°C. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun berfluktuasi, interval suhu dalam dua kali percobaan menunjukkan interval yang hampir sama. Rata-rata suhu udara hasil pengukuran lebih tinggi dari penelitian sebelumnya yang menyebutkan suhu udara rata-rata di Bogor pada periode 1975 – 2012 adalah 25,2°C (Wati, Pawitan, & Sopaheluwakan, 2015). Hal ini kemungkinan effect dari pemanasan global yang terjadi seiring dengan peningkatan emisi gas rumah kaca dengan tingginya industrialisasi di Bogor.

Kelembaban udara memiliki trend yang berbanding terbalik dengan suhu udara pada tekanan atmosfer dimana semakin tinggi suhu udara, maka semakin kecil kelembaban udaranya, begitu sebaliknya. Hal ini terlihat dari trend kelembaban udara yang disajikan pada Gambar 3. Pada percobaan tahun 2017, kelembaban udara rata-rata minimum harian sebesar 68,6% yang terjadi pada bulan Juli, sedangkan kelembaban rata-rata maksimum harian adalah 92,3% yang terjadi pada bulan Mei. Rata-rata kelembaban udara pada tahun percobaan tersebut adalah 82,7%. Sedangkan pada tahun 2018, kelembaban udara maksimum terjadi pada bulan Februari sebesar 94,6%, sedangkan minimum sebesar 72,0% pada bulan Mei dengan rata-rata selama percobaan sebesar 84,5%. Hal ini menunjukkan bahwa rata-rata percobaan tahun 2018 lebih tinggi

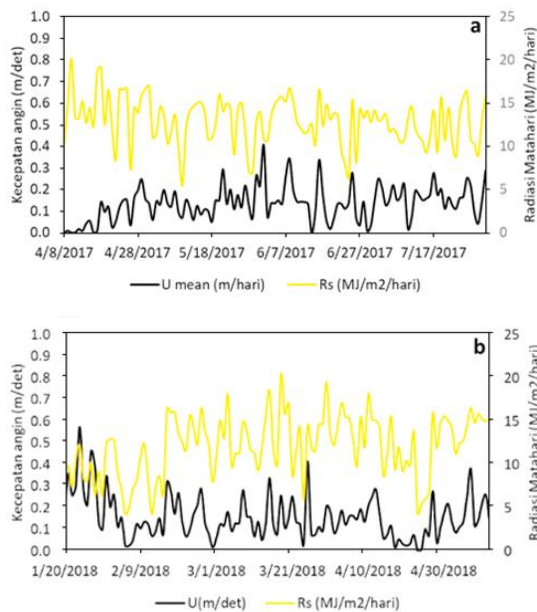
dibandingkan tahun sebelumnya, berbanding terbalik dengan kondisi suhu udara.

Radiasi matahari dan kecepatan angin lebih berfluktuasi dibandingkan dengan suhu udara dan kelembaban udara. Radiasi matahari dan berfluktuasi karena sangat tergantung dari keberadaan awan (Qian, Wang, Leung, & Kaiser, 2007). Sedangkan kecepatan angin variasinya sangat dipengaruhi intensitas hujan (Choi, 1994). Lokasi percobaan yang memiliki curah hujan tinggi dicirikan dengan awan mendung yang relatif banyak sehingga mempengaruhi radiasi matahari dan juga kecepatan angin. Pada tahun 2017, radiasi matahari tertinggi terjadi pada bulan April, sebesar 201 MJ/m<sup>2</sup>/hari, sedangkan terendah sebesar 5,4 MJ/m<sup>2</sup>/hari pada bulan Mei dengan rata-rata sebesar 12,9 MJ/m<sup>2</sup>/hari. Hal yang hampir sama terjadi pada tahun berikutnya, dimana radiasi matahari tertinggi adalah 20,4 MJ/m<sup>2</sup>/hari dengan rata-rata adalah 12,1 MJ/m<sup>2</sup>/hari.

Kecepatan angin yang terjadi di lokasi percobaan termasuk dalam kategori rendah dibandingkan dengan penelitian sebelumnya dengan rata-rata kecepatan angin harian lebih rendah dari 1 m/det (Wati *et al.*, 2015). Pada percobaan tahun 2017, kecepatan angin bervariasi dari 0 – 0,4 m/det, sedangkan pada tahun 2018, variasinya lebih tinggi sampe mencapai 0,6 m/det.



**Gambar 3** Fluktuasi suhu udara dan kelembaban udara: a) 2017; b) 2018

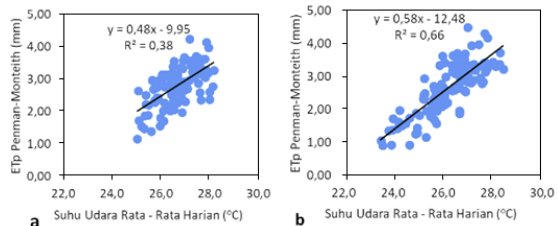


**Gambar 4** Fluktuasi kecepatan angin dan radiasi matahari: a) 2017, b) 2018

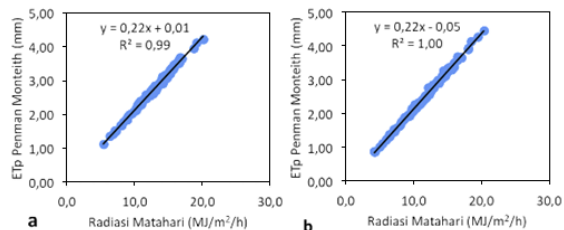
### 3.2. Hubungan Cuaca dan Evapotranspirasi Standard FAO

Parameter cuaca memiliki tingkat korelasi dengan ETp yang berbeda-beda (Gambar 5 s.d. 8). Secara umum, dalam dua tahun percobaan di lokasi yang sama, hubungan linear antara parameter cuaca dengan ETp memiliki trend yang konsisten. Radiasi matahari memiliki hubungan linear yang paling kuat dengan nilai  $R^2$  tertinggi. Kemudian secara berturut-turut diikuti oleh suhu udara, kelembaban udara dan kecepatan angin. Hanya parameter kelembaban udara yang memiliki korelasi negatif dengan ETp.

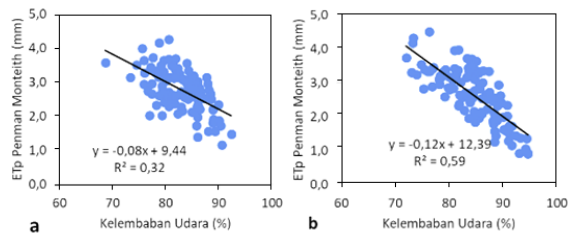
Keempat parameter cuaca tersebut saling terkait, misalnya peningkatan radiasi matahari akan dibarengi dengan peningkatan suhu udara dan penurunan kelembaban relatif, oleh sebab itu sangat memungkinkan untuk dikembangkan multiple linear analisis sebagai telah dikembangkan untuk pendugaan ETp di India (Perugu, Singam, & Kamasani, 2013). Kuatnya hubungan radiasi matahari dengan ETp Penman-Monteith disebabkan oleh penurunan persamaan tersebut didasarkan pada kombinasi keseimbangan energi dan transfer massa, dimana faktor energi dari sinar matahari menjadi kunci utama (Allen *et al.*, 1998). Sehingga parameter ini menjadi parameter cuaca pertama yang dibahas dalam buku FAO-56 *Irrigation and Drainage* nomor 56. Apabila data radiasi tidak tersedia dapat diwakili dengan data durasi/lama penyinaran matahari, dimana parameter ini juga merupakan parameter yang paling berpengaruh terhadap ETp (Xing *et al.*, 2016).



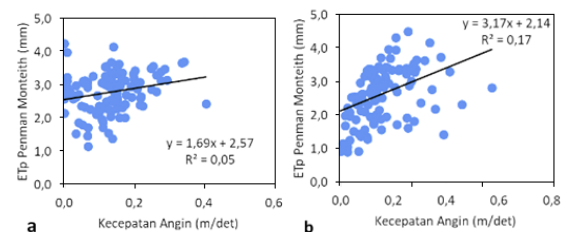
**Gambar 5** Hubungan linear antara suhu udara dan ETp Penman-Monteith: a) 2017, b) 2018



**Gambar 6** Hubungan linear antara radiasi matahari dan ETp Penman-Monteith: a) 2017, b) 2018



**Gambar 7** Hubungan linear antara kelembaban udara dan ETp Penman-Monteith: a) 2017, b) 2018



**Gambar 8** Hubungan linear antara kecepatan angin dan ETp Penman-Monteith: a) 2017, b) 2018

Suhu udara merupakan parameter yang memiliki korelasi linear terkuat setelah radiasi matahari. Hal ini disebabkan peningkatan suhu udara akan menyebabkan kenaikan tekanan uap permukaan sehingga jumlah uap air dalam udara meningkat secara eksponensial (Febriana *et al.*, 2018). Oleh sebab itu, meskipun suhu udara merupakan parameter kedua setelah radiasi matahari, tetapi perubahan suhu udara dapat menyebabkan perubahan ETp secara signifikan. Dengan kata lain, suhu udara merupakan parameter yang paling sensitif terhadap perubahan ETp (Sharifi & Dinpashoh, 2014).

Sedangkan untuk kelembaban udara, kekuatan hubungan linear dengan ETp hampir sama dengan suhu udara, tetapi berbanding terbalik. Hal ini disebabkan suhu udara dan kelembaban udara

memang parameter cuaca yang terkait langsung dalam kondisi tekanan atmosfer. Oleh sebab itu, sensitivitas parameter ini terhadap ETp juga cukup kuat (Estévez, Gavilán, & Berengena, 2009).

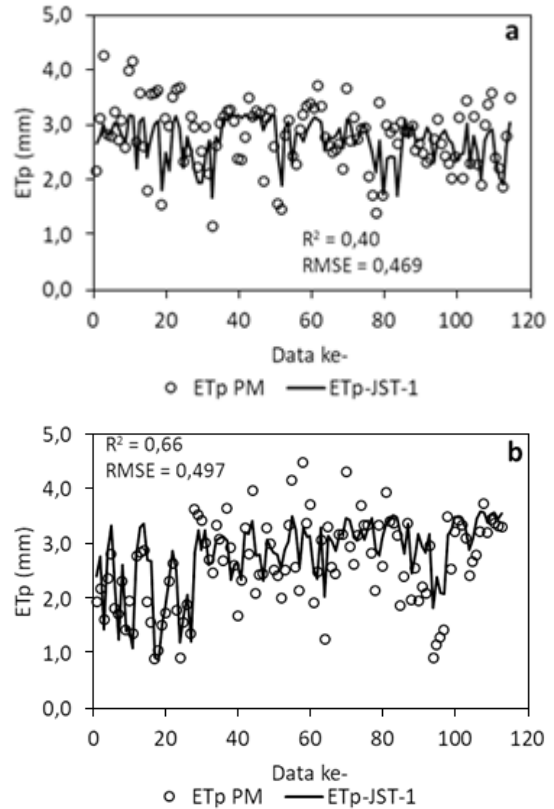
Kecepatan angin merupakan parameter cuaca yang memiliki hubungan linear terlemah terhadap ETp. Hal ini disebabkan nilai pengukuran di lokasi percobaan cukup kecil (< 1 m/det) sehingga perubahannya terhadap ETp tidak terlalu signifikan.

### 3.3. Perfarmansi Model JST

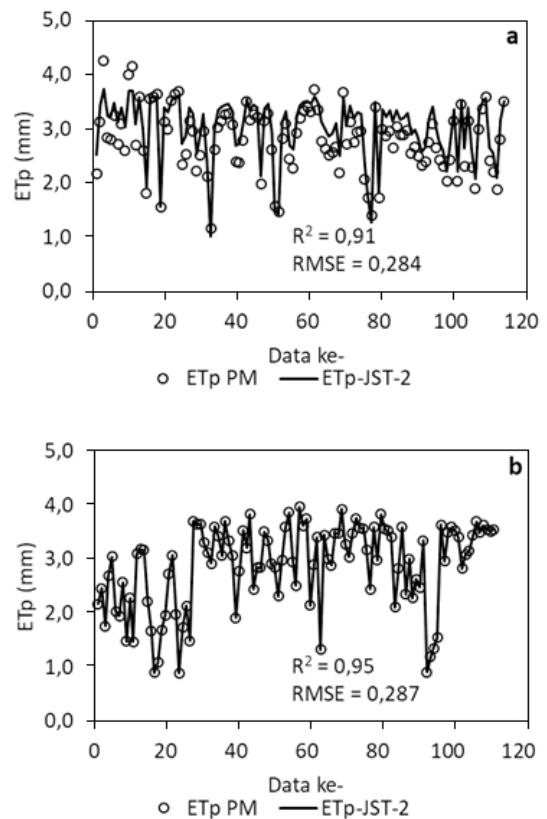
Pelatihan (*training*) model JST dilakukan dengan parameter yang sama, yaitu nilai  $\sigma$  sebesar 0,9 dengan 2000 pengulangan (*iterasi*) dimana pembobot awal ditentukan secara acak. Performansi masing-masing model dapat dilihat pada Gambar 9 s.d. 11.

Terlihat bahwa model JST-1 dengan hanya satu parameter input suhu udara menghasilkan performansi yang paling rendah dengan nilai  $R^2$  terendah (< 0,7) dan RMSE terbesar (> 0,4 mm/hari) untuk dua tahun percobaan. Rendahnya performansi model JST-1 disebabkan terjadinya *underestimation* untuk nilai ETp yang lebih dari 3.5 mm dan *overestimation* untuk nilai ETp kurang dari 1.5 mm. Hal ini menunjukkan kesalahan dalam pendugaan model JST (Nassif *et al.*, 2015). Hal ini terjadi kemungkinan sebaran dan trend data suhu udara dengan ETp berbeda dengan hubungan linear yang kurang kuat ( $R^2 < 0.7$ , lihat Gambar 4). *Overestimation* maupun *underestimation* memang sering terjadi dalam pendugaan ETp dengan menggunakan model JST, seperti yang dilaporkan penelitian sebelumnya (Khoob, 2008).

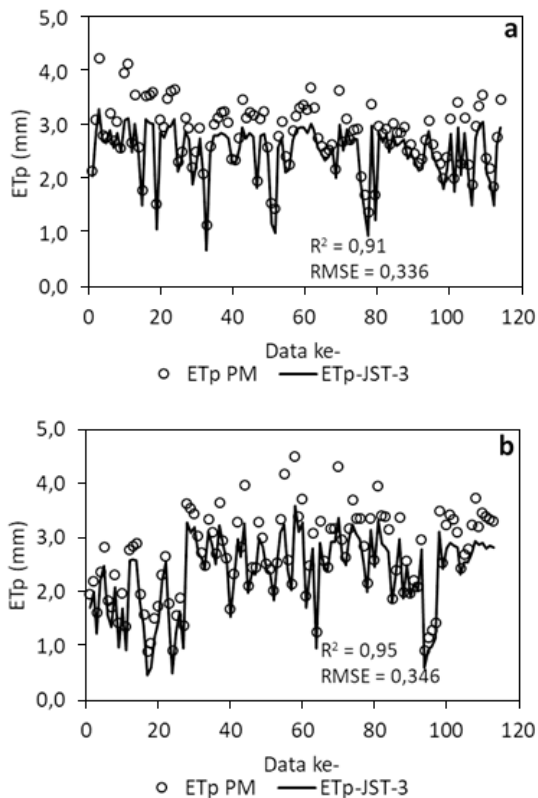
Model JST-3 dengan dua input paramater, suhu udara dan radiasi matahari, juga menghasilkan performa yang tidak lebih baik dari model JST-2 dengan satu input paramater. Meskipun  $R^2 > 0.9$  dengan RMSE < 0.4 mm/hari, tetapi *underestimation* masih terjadi untuk nilai ETp > 0.3 mm. Model JST-3 hanya bisa mengurangi kejadian *overestimation* untuk nilai ETp yang rendah. Hal ini menunjukkan bahwa semakin banyak input tidak otomatis memperbaiki proses pembelajaran data, justru akan menambah waktu.



**Gambar 9** Perbandingan Pendugaan Model JST-1 dengan ETp Penman-Monteith: a)2017, b)2018



**Gambar 10** Perbandingan pendugaan model JST-2 dengan ETp Penman-Monteith: a) 2017, b)2018



**Gambar 11** Perbandingan pendugaan model JST-3 dengan ETp Penman-Monteith: a) 2017, b) 2018

Model JST-2 merupakan model JST terbaik dengan nilai  $R^2$  terbesar dan RMSE terkecil. Gambar 10 (b) menunjukkan garis estimasi JST-2 berimpit dengan data ETp Penman-Monteith. Hal ini menunjukkan bahwa radiasi matahari dapat digunakan sebagai input parameter untuk pendugaan ETp secara akurat. Keakuratan model ini disebabkan oleh sebaran dan trend data radiasi matahari dan ETp yang sama (Gambar 6), sehingga model JST dengan mudah dapat mengestimasi ETp tanpa membutuhkan parameter input yang lain.

Model JST merupakan model stokastik yang bekerja berdasarkan pola data. Oleh sebab itu, penentuan parameter input tidak dapat dilakukan secara acak ataupun *trial and error*. Analisis korelasi diperlukan sebelum menentukan parameter input. Semakin tinggi tingkat korelasinya maka semakin tepat dijadikan parameter input model JST.

### 3.4. Perbandingan Antar Model

Hasil perbandingan performa masing-masing model terhadap model standard FAO cukup beragam sebagaimana disajikan di Tabel 3. Model Penman paling mendekati model Penman-Monteith karena memang model standard ini dikembangkan dari model Penman sebelumnya (Allen *et al.*, 1998).

**Tabel 3** Perbandingan Performansi Model ETp dengan ETp Standard FAO

Model ETp	Tahun			
	2017		2018	
	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE
Blaney-Criddle	0,34	2,525	0,36	2,561
Kharuffa	0,37	4,073	0,68	3,941
Remanencko	0,35	5,875	0,59	5,280
Hargreaves	0,99	0,418	1,00	0,357
Turc	1,00	0,197	1,00	0,183
Jensen-Haise	0,98	0,647	0,97	0,649
Penman	0,99	0,106	1,00	0,098
Penman-Monteith*	1,00	0,000	1,00	0,000

\*Model acuan

Model Turc dengan parameter input yang lebih sedikit dari model acuan, merupakan model yang paling mendekati nilai model ETp Penman-Monteith dengan  $R^2$  tertinggi dan RMSE terendah untuk kedua musim tanam. Berikutnya diikuti model Jensen-Haise dan Hargreaves dengan parameter input yang sama dengan model Turc. Model Remanencko dengan parameter input suhu udara dan kelembaban udara justru performanya lebih rendah daripada model Blaney-Criddle dan Kharuffa. Hal ini menunjukkan bahwa semakin banyak parameter input belum tentu menunjukkan performa yang lebih baik. Dari hasil ini menunjukkan bahwa parameter radiasi matahari dan suhu udara harus diukur untuk menghasilkan model yang mendekati model standard FAO yang membutuhkan parameter input lebih banyak.

Perbandingan model empiris dan model JST pada evapotranspirasi potensial dapat dilihat pada Tabel 4 dan 5. Evapotranspirasi potensial pada model acuan berturut-turut untuk musim tanam 2017 dan 2018 adalah 321,8 mm dan 298,4 mm. Beberapa model menunjukkan nilai evapotranspirasi potensial dibawah nilai standard (acuan), yaitu: Penman, JST-1 dan JST-3 untuk tahun 2017 dan Model Penman, JST-3 untuk tahun 2018.

Selain itu, model lain menunjukkan nilai total ETp yang lebih besar dari nilai acuan model. Bahkan nilainya ada yang 2-3 kali lebih dari nilai acuan model. Model tersebut adalah Model Kharuffa dan Remanencko. Sehingga model ini tidak direkomendasikan untuk digunakan karena sangat tidak akurat dan cenderung terjadinya pemborosan penggunaan air. Model lain yang tidak direkomendasikan adalah model Blaney-Criddle, karena memiliki nilai total ETp yang hampir dua kali lebih besar dari nilai acuan model.

Oleh sebab itu, Ali & Shui (2008) menggunakan model Blaney-Criddle yang dimodifikasi. Model yang paling mendekati total ETp acuan adalah Model Turc dan JST-2. Sebenarnya model JST-1 juga mendekati model acuan untuk tahun 2018, tetapi model ini tidak konsisten pada tahun sebelumnya dan nilai R<sup>2</sup> masih terlalu rendah serta nilai RMSE terlalu besar. Oleh sebab itu model yang direkomendasikan untuk digunakan adalah model Turc dan JST-2. Nilai ETp total pada kedua model ini adalah berturut turut 6,8% dan 7,8% lebih

tinggi dari nilai acuan pada tahun 2017, serta 6,4% dan 8,7% pada tahun 2018. Apabila peralatan pengukuran terbatas, diutamakan untuk mengukur suhu udara dan radiasi matahari, kemudian kebutuhan air tanaman dapat ditentukan dengan model Turc. Sedangkan apabila hanya dapat mengukur satu parameter, maka direkomendasikan untuk mengukur radiasi matahari dengan model JST-2 untuk menentukan kebutuhan air tanaman.

**Tabel 4** Perbandingan Total Evapotranspirasi Potensial pada Model ETp dan JST untuk Tahun 2017

Model ET dan JST	ETp setiap Fase Pertumbuhan (mm)				
	Awal	Vegetatif	Tengah	Akhir Musim	Total
Blaney-Criddle	146,5	253,6	110,2	94,3	604,6
Kharuffa	190,8	332,3	141,9	121,3	786,3
Remanenکو	226,5	404,8	169,2	161,2	961,7
Hargreaves	99,0	152,8	62,1	53,7	367,6
Turc	91,3	142,6	58,9	50,8	343,5
Jensen-Haise	106,3	158,3	64,1	56,3	385,0
Penman	85,8	128,8	53,6	46,9	315,1
JST - 1	77,0	135,9	54,0	45,7	312,6
JST - 2	90,0	144,6	60,7	51,7	347,0
JST - 3	75,8	120,4	50,4	42,4	289,0
Penman-Monteith*	85,9	133,4	54,8	47,7	321,8

\*Model acuan

**Tabel 5** Perbandingan Total Evapotranspirasi Potensial pada Model ETp dan JST untuk tahun 2018

Model ET dan JST	ETp setiap Fase Pertumbuhan (mm)				
	Awal	Vegetatif	Tengah	Akhir Musim	Total
Blaney-Cridley	142,2	248,1	105,1	80,5	575,8
Kharuffa	177,0	319,6	135,5	107,1	739,2
Remanenکو	163,6	364,6	139,2	172,1	839,5
Hargreaves	60,2	159,4	58,0	58,1	335,6
Turc	60,4	148,5	55,4	53,1	317,5
Jensen-Haise	53,1	169,5	60,7	64,7	348,0
Penman	52,4	139,9	48,8	49,5	290,5
JST - 1	59,9	142,7	61,5	54,4	318,4
JST - 2	60,6	153,1	56,1	54,6	324,4
JST - 3	46,9	128,5	46,0	44,2	265,6
Penman-Monteith*	55,1	141,4	51,2	50,7	298,4

\*Model acuan

#### IV. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis evapotranspirasi potensial, model Turc dan Model JST-2 merupakan model terbaik dengan nilai ET<sub>p</sub> total yang mendekati ET<sub>p</sub> acuan. Model ET<sub>p</sub> Turc dengan variabel *input* suhu udara dan radiasi matahari merupakan model terbaik dengan nilai R<sup>2</sup> tertinggi dan RMSE terendah. Model Jaringan Syaraf Tiruan-2 (JST-2) dengan variabel *input* radiasi matahari merupakan model JST terbaik dengan nilai R<sup>2</sup> tertinggi, RMSE terendah dan nilai ET<sub>p</sub> total yang mendekati model acuan FAO.

Parameter suhu udara dan radiasi matahari merupakan parameter yang direkomendasikan untuk diukur dalam penentuan kebutuhan air tanaman menggunakan model Turc. Tetapi apabila hanya satu parameter yang dapat diukur, maka direkomendasikan untuk mengukur radiasi matahari dengan model JST-2 sebagai pertimbangan dalam penentuan kebutuhan air tanamannya.

Metode yang dikembangkan ini, dapat diterapkan pada berbagai kondisi cuaca di Indonesia dengan dengan periode lebih panjang untuk proses pembelajaran (*training*). Sehingga hasil yang didapatkan mewakili kondisi cuaca di Indonesia.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada reviewer yang telah memberikan masukan konstruktif untuk perbaikan makalah ini. Selain itu, kami juga menyampaikan apresiasi dan terima kasih kepada Kementerian Riset dan Teknologi/Badan Riset dan Inovasi Nasional yang telah membiayai penelitian dasar dengan judul “*Pengembangan smart evaporative irrigation untuk pertanian presisi yang ramah lingkungan berbasis kecerdasan buatan*” pada tahun 2020-2022

#### DAFTAR PUSTAKA

Ali, Md. H., & Shui, L. T. (2008). Potential evapotranspiration model for Muda Irrigation Project, Malaysia. *Water Resources Management*, 23(1), 57. <https://doi.org/10.1007/s11269-008-9264-6>

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop Evapotranspiration Guidelines for Computing Crop Water Requirements* (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). Rome, Italy: Food and Agriculture Organization.

Arif, C., Setiawan, B. I., Mizoguchi, M., & Doi, R. (2012). Estimation of soil moisture in paddy field using Artificial Neural Networks. *International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence (IJARAI)*, 1(1), 17–21.

Arif, C., Setiawan, B. I., Widodo, S., Hasanah, N. A. I., Mizoguchi, M., & others. (2015). Pengembangan model jaringan saraf tiruan untuk menduga emisi gas rumah kaca dari lahan sawah dengan berbagai rejim air. *Jurnal Irigasi*, 10(1), 1–10.

Bogawski, P., & Bednorz, E. (2014). Comparison and validation of selected evapotranspiration models for conditions in Poland (Central Europe). *Water Resources Management*, 28(14), 5021–5038. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0787-8>

Brouwer, C., & Heibloem, M. (1986). *Irrigation water management: Irrigation water needs* (Irrigation Water Management Training Manual No. 3). Rome, Italy: Food and Agriculture Organization. Diperoleh dari <http://www.fao.org/docrep/S2022E/S2022E00.htm>

Choi, E. C. C. (1994). Parameters affecting the intensity of wind-driven rain on the front face of a building. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 53(1), 1–17. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(94\)90015-9](https://doi.org/10.1016/0167-6105(94)90015-9)

Doorenbos, J., & Pruitt, W. O. (1977). *Guidelines for Predicting Crop Water Requirements* (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 24). Rome, Italy: Food and Agriculture Organization.

Douglas, E. M., Jacobs, J. M., Sumner, D. M., & Ray, R. L. (2009). A comparison of models for estimating potential evapotranspiration for Florida land cover types. *Journal of Hydrology*, 373(3), 366–376. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.04.029>

Estévez, J., Gavilán, P., & Berengena, J. (2009). Sensitivity analysis of a Penman–Monteith type equation to estimate reference evapotranspiration in southern Spain. *Hydrological Processes*, 23(23), 3342–3353. <https://doi.org/10.1002/hyp.7439>

Falamarzi, Y., Palizdan, N., Huang, Y. F., & Lee, T. S. (2014). Estimating evapotranspiration from temperature and wind speed data using artificial and wavelet neural networks (WNNs). *Agricultural Water Management*, 140, 26–36. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.03.014>

Fisher, J. B., DeBiase, T. A., Qi, Y., Xu, M., & Goldstein, A. H. (2005). Evapotranspiration models compared on a Sierra Nevada forest ecosystem. *Environmental Modelling & Software*, 20(6), 783–796. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2004.04.009>

Gebler, S., Hendricks Franssen, H.-J., Pütz, T., Post, H., Schmidt, M., & Vereecken, H. (2015). Actual evapotranspiration and precipitation measured by lysimeters: A comparison with eddy covariance and tipping bucket. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(5), 2145–2161. <https://doi.org/10.5194/hess-19-2145-2015>

- Handoko (Ed.). (1995). *Klimatologi Dasar: Landasan Pemahaman Fisika Atmosfer dan Unsur-Unsur Iklim*. Jakarta, Indonesia: Pustaka Jaya.
- Jensen, M. E. (Ed.). (1980). *Design and Operation of Farm Irrigation Systems*. Michigan, USA: American Society of Agricultural Engineers.
- June, T., Dewi, N. W. S. P., & Mejjide, A. (2018). Perbandingan metode aerodinamik, Bowen Ratio dan Penman-Monteith dalam penentuan evapotranspirasi pertanian kelapa sawit. *Agromet*, 32(1), 11–20. <https://doi.org/10.29244/j.agromet.32.1.11-20>
- Khoob, A. R. (2008). Comparative study of Hargreaves's and artificial neural network's methodologies in estimating reference evapotranspiration in a semiarid environment. *Irrigation Science*, 26(3), 253–259. <https://doi.org/10.1007/s00271-007-0090-z>
- Kisi, O. (2014). Comparison of different empirical methods for estimating daily reference evapotranspiration in mediterranean climate. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 140(1), 04013002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000664](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000664)
- Kumar, M., Raghuvanshi, N. S., & Singh, R. (2011). Artificial neural networks approach in evapotranspiration modeling: A review. *Irrigation Science*, 29(1), 11–25. <https://doi.org/10.1007/s00271-010-0230-8>
- Kusumadewi, S. (2003). *Artificial Intelligence (Teknik dan Aplikasinya)*. Yogyakarta, Indonesia: Graha Ilmu.
- Lippman. (1998). *Estimating Potential Evaporation and Management 2nd Edition*. Virginia, USA: Reston Publishing Company, Inc.
- Manik, T. K., Sanjaya, P., & Rosadi, R. A. B. (2017). Comparison of different models in estimating standard evapotranspiration in Lampung Province, Indonesia. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, 2(5), 2309–2318.
- Maulé, C., Helgalson, W., McGinn, S., & Cutforth, H. (2005). Estimation of standardized reference evapotranspiration on the Canadian Prairies using simple models with limited weather data. Dipresentasikan pada CSAE/SCGR 2005 Meeting, Winnipeg, Canada. Diperoleh dari <http://www.csbe-scgab.ca/docs/meetings/2005/05-054.pdf>
- Mulyadi, M., Soekarno, I., & Winskayati, W. (2014). Analisis pilar modernisasi irigasi dengan pendekatan Analytical Hierarchy Process (AHP) pada Daerah Irigasi Barugbug-Jawa Barat. *Jurnal Teknik Sipil*, 21(3), 213–220.
- Perugu, M., Singam, A. J., & Kamasani, C. S. R. (2013). Multiple Linear Correlation Analysis of Daily Reference Evapotranspiration. *Water Resources Management*, 27(5), 1489–1500. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0250-7>
- Qian, Y., Wang, W., Leung, L. R., & Kaiser, D. P. (2007). Variability of solar radiation under cloud-free skies in China: The role of aerosols. *Geophysical Research Letters*, 34(12). <https://doi.org/10.1029/2006GL028800>
- Setiawan, B. I., Imansyah, A., Arif, C., Watanabe, T., Mizoguchi, M., & Kato, H. (2014). SRI paddy growth and GHG emissions at various groundwater levels. *Irrigation and Drainage*, 63(5), 612–620.
- Sharifi, A., & Dinpashoh, Y. (2014). Sensitivity Analysis of the Penman-Monteith reference Crop Evapotranspiration to Climatic Variables in Iran. *Water Resources Management*, 28(15), 5465–5476. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0813-x>
- Tukimat, N. N. A., Harun, S., & Shahid, S. (2012). Comparison of different methods in estimating potential evapotranspiration at Muda Irrigation Scheme of Malaysia. *Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics (JARTS)*, 113(1), 77–85.
- Wati, T., Pawitan, H., & Sopaheluwakan, A. (2015). Pengaruh parameter cuaca terhadap proses evaporasi pada interval waktu yang berbeda. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 16(3), 155–165. <https://doi.org/10.31172/jmg.v16i3.286>
- Wu, I. P. (1997). *A simple evapotranspiration model for Hawaii: The Hargreaves model* (CTAHR Fact Sheet, Engineer's Notebook No. 106). Honolulu, Hawaii: University of Hawaii. Diperoleh dari <https://scholarspace.manoa.hawaii.edu/bitstream/10125/12218/EN-106.pdf>
- Xing, X., Liu, Y., Zhao, W., Kang, D., Yu, M., & Ma, X. (2016). Determination of dominant weather parameters on reference evapotranspiration by path analysis theory. *Computers and Electronics in Agriculture*, 120, 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.11.001>
- Xu, C. Y. (2002). *Textbook of Hydrologic Models*. Sweden: Uppsala University.
- Yassin, M. A., Alazba, A. A., & Mattar, M. A. (2016). Artificial neural networks versus gene expression programming for estimating reference evapotranspiration in arid climate. *Agricultural Water Management*, 163, 110–124. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.09.009>

Zhao, P., Li, S., Li, F., Du, T., Tong, L., & Kang, S. (2015). Comparison of dual crop coefficient method and Shuttleworth–Wallace model in evapotranspiration partitioning in a vineyard of northwest China. *Agricultural Water Management*, 160, 41–56. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.06.026>