

**ANALISIS EVAPOTRANSPIRASI METODE PENMAN MODIFIKASI DAN THORNTHWAITE
TERHADAP PEMODELAN DEBIT FJ. MOCK**

***ANALYSIS OF EVAPOTRANSPIRATION USING MODIFIED PENMAN AND THORNTHWAITE
METHODS ON FJ. MOCK'S RUN-OFF MODELLING***

Ari Yudha Baskoro^{*1}, Suripin², Suprpto³

¹Mahasiswa Program Studi Magister Teknik Sipil, Departemen Teknik Sipil, Universitas Diponegoro

^{2,3}Dosen Program Studi Magister Teknik Sipil, Departemen Teknik Sipil, Universitas Diponegoro

Korespondensi: aribaskoro5@gmail.com

ABSTRAK

Evapotranspirasi merupakan salah satu parameter penting dalam pemodelan debit. Letak geografis bendungan Bulango Ulu yang terletak di sekitar garis khatulistiwa dimana penyinaran matahari maksimum sepanjang tahun menyebabkan faktor penguapan menjadi faktor yang sangat penting dalam analisis ketersediaan air. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja dua metode perhitungan evapotranspirasi terhadap akurasi pemodelan debit aliran ke bendungan Bulango Ulu. Metode evapotranspirasi yang digunakan adalah metode *Penman* modifikasi dan *Thornthwaite* yang menjadi masukan untuk pemodelan debit menggunakan metode *Fj. Mock*. Hasil analisis menunjukkan bahwa metode *Mock-Penman* memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan metode *Mock-Thornthwaite* dengan hasil parameter statistik MAE 0,963, NSE 0,891, R 0,949 dan K_r 1,3%, sehingga disimpulkan bahwa pemodelan debitnya mendekati nilai debit pengamatan (observasi).

Kata Kunci: Fj. Mock, Pemodelan Debit, Penman, Thornthwaite

ABSTRACT

Evapotranspiration is a key parameter used in run-off modelling. The Bulango Ulu Dam, located near the equator where sunlight is at its peak throughout the year, makes evapotranspiration a crucial factor in analysing water availability. This research aims to analyse the performance of two evapotranspiration calculation methods on the accuracy of run-off modelling to the Bulango Ulu dam. The study employs the modified Penman and Thornthwaite evapotranspiration methods as input to Mock's model. The Analysis indicates that the Mock-Penman method outperforms the Mock-Thornthwaite method, with statistical parameter results of MAE 0.963, NSE 0.891, R 0.949 and K_r 1.3%, Therefore, it concludes that the run-off modelling aligns with the observed flow value.

Keywords: Fj. Mock, Penman, Run-off Modelling, Thornthwaite

PENDAHULUAN

Ilmu hidrologi berkaitan erat dengan hujan, limpasan (*run-off*) dan penguapan (evaporasi) (Hadisusanto, 2010). Pada suatu DAS, terkadang tidak memiliki periode pencatatan debit sungai yang panjang sehingga diperlukan metode pemodelan debit menggunakan data hujan, klimatologi dan karakteristik DAS.

Kementerian PUPR melalui Balai Wilayah Sungai Sulawesi II Gorontalo sedang melaksanakan pembangunan bendungan Bulango Ulu yang berlokasi pada DAS Bolango-Bone. Analisis hidrologi yang tepat sangatlah penting untuk menjamin keberlanjutan pengelolaan DAS dan fungsi suatu bendungan. Secara geografis bendungan Bulango Ulu terletak di 0°39' 35,75" LU dan 123°5'46,16" BT. Bendungan ini terletak di sekitar garis khatulistiwa dimana penyinaran matahari maksimum sepanjang tahun sehingga faktor penguapan adalah salah satu faktor penting dalam analisis ketersediaan air.

Salah satu parameter penting pada pemodelan debit (hujan-aliran) adalah evapotranspirasi yang sangat tergantung pada ketersediaan data klimatologi pada suatu DAS. Metode analisis evapotranspirasi yang biasa digunakan adalah metode *Penman* modifikasi dan metode *Thornthwaite*, kedua metode ini memiliki perbedaan dalam jumlah data klimatologi yang digunakan, sehingga hipotesisnya adalah semakin banyak data yang digunakan maka semakin akurat pemodelan debit (hujan-aliran) yang dihasilkan.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis kinerja dua metode perhitungan evapotranspirasi yaitu *Penman* modifikasi dan *Thornthwaite* terhadap akurasi pemodelan debit aliran ke bendungan Bulango Ulu di Gorontalo.

TINJAUAN PUSTAKA

Evapotranspirasi

Evaporasi merupakan proses penguapan dari air permukaan, sedangkan transpirasi adalah proses evaporasi dari permukaan tanaman (Jayanti et al., 2023). Evapotranspirasi merupakan bagian dari siklus hidrologi yang terdiri dari evaporasi dan transpirasi serta dapat dihitung dengan berbagai metode menggunakan data-data unsur cuaca seperti suhu, kelembaban relatif, lama penyinaran matahari dan kecepatan angin (Wilnaldo et al., 2020). Suhu, curah hujan, radiasi matahari, kecepatan angin, kelembaban udara, tekanan udara dan lama

penyinaran matahari merupakan faktor-faktor berpengaruh dalam evapotranspirasi potensial (Wirawan et al., 2021).

Metode perhitungan evapotranspirasi *Penman* modifikasi dan *Thornthwaite* merupakan metode yang sudah lazim digunakan di Indonesia. Keduanya memiliki perbedaan pada jumlah data klimatologi yang digunakan dalam perhitungan. Metode *Penman* modifikasi menggunakan empat komponen klimatologi yaitu suhu udara, kelembaban relatif (RH), lama penyinaran matahari dan kecepatan angin, sedangkan metode *Thornthwaite* hanya menggunakan data suhu udara saja.

Metode *Penman* Modifikasi

Metode evapotranspirasi *Penman* modifikasi merupakan metode yang dimodifikasi dari persamaan *Penman* oleh *Food and Agriculture Organization of The United Nations* (FAO) tahun 1977 (Hadisusanto, 2010). Perhitungan evapotranspirasi *Penman* modifikasi ditunjukkan pada persamaan berikut ini:

$$ET_0 = c [W R_n + (1-W) f(U) (e_s - e_a)] \quad (1)$$

Dimana:

- ET₀ = Evapotranspirasi (mm/hari)
 - W = Faktor penimbang (tergantung suhu)
 - R_n = Radiasi *netto* (mm/hari)
 - f(U) = Fungsi kecepatan angin
 - (e_s-e_a) = *Saturation deficit* (mbar)
 - c = Faktor penyesuaian (koefisien)
- (Hadisusanto, 2010)

Komponen dalam persamaan *Penman* modifikasi tersebut dijabarkan sebagai berikut, koefisien c merupakan faktor penyesuaian kompensasi efek kondisi cuaca siang dan malam hari, nilai W pada persamaan merupakan faktor penimbang yang berhubungan dengan suhu udara. Fungsi f(U) merupakan fungsi kecepatan angin yang dirumuskan sebagai berikut:

$$f(U) = 0,27 \left(1 + \frac{U}{100}\right) \quad (2)$$

Dimana U adalah kecepatan angin dalam km/hari
Variabel e_s merupakan tekanan uap air jenuh (*saturated vapor pressure*) dalam satuan mbar dan nilainya dapat dihitung dengan persamaan:

$$e_s = 611 \exp \left(\frac{17,27 T}{237,3 + T} \right) \quad (3)$$

(Chow et al., 1988)

Dimana T merupakan suhu udara (°C). Satuan dalam **Persamaan 3** tersebut menggunakan satuan *pascals* (Pa), sehingga dalam perhitungannya perlu dikali konstanta 0,01 agar satuannya konsisten dengan persamaan *Penman* pada **Persamaan 1** (satuan mbar). Variabel e_a adalah tekanan uap air (*actual vapor pressure*) dalam satuan mbar dan dapat dihitung dengan persamaan berikut ini:

$$e_a = e_s \left(\frac{RH}{100} \right) \quad (4)$$

Dimana RH adalah kelembaban relatif udara (%) yang didapatkan dari data klimatologi.

Radiasi *netto* (R_n) adalah jumlah energi radiasi yang sampai ke permukaan bumi yang dihitung dari selisih radiasi gelombang pendek *netto* yang datang (R_{ns}) dengan radiasi gelombang panjang *netto* (R_{nl}) dan dapat dihitung dengan persamaan berikut ini:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (5)$$

dan,

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s \quad (6)$$

Dimana α merupakan nilai albedo (refleksi) radiasi gelombang pendek yang tergantung pada jenis permukaannya (untuk tanah lempung 0,20 - 0,35). R_s adalah radiasi matahari yang mencapai bumi setelah diserap terlebih dahulu di atmosfer dan dirumuskan sebagai berikut:

$$R_s = R_a \left(0,25 + 0,50 \frac{n}{N} \right) \quad (7)$$

Dimana R_a adalah radiasi *extraterrestrial* yang diterima oleh bagian teratas atmosfer dan besarnya tergantung dengan posisi garis lintang suatu tempat di permukaan bumi (mm/hari).

Nilai n/N merupakan persentase lama penyinaran matahari aktual terhadap lama penyinaran matahari maksimum yang dipengaruhi oleh posisi geografis suatu tempat (garis lintang) dan data n/N bisa didapatkan dari data klimatologi (Hadisusanto, 2010).

Radiasi gelombang panjang *netto* atau *net longwave radiation* (R_{nl}) pada **Persamaan 5** dirumuskan sebagai berikut:

$$R_{nl} = f(T) f(e_a) f\left(\frac{n}{N}\right) \quad (8)$$

$f(T)$ adalah suatu fungsi dari pengaruh suhu udara terhadap radiasi gelombang panjang (R_{nl}) yang dirumuskan sebagai berikut:

$$f(T) = \varepsilon \tau T^4 \quad (9)$$

Dimana ε adalah nilai *grey body emissivity* suatu permukaan yang nilainya lebih dari 0 dan kurang dari 1, τ merupakan konstanta Stefan-Boltzmann $1,174 \times 10^{-7}$ kal/cm²/hari/K⁴, namun konstanta ini perlu dilakukan konversi dalam satuan mm/hari (agar konsisten dengan satuan evapotranspirasi) sehingga menjadi 2×10^{-9} mm/hari (1 mm/hari setara penguapan sama dengan 59,04 kal/cm²/hari/K⁴) dan T merupakan suhu udara mutlak (K).

$f(e_a)$ adalah fungsi efek tekanan udara pada radiasi gelombang panjang (R_{nl}) dan ditetapkan pada persamaan berikut ini:

$$f(e_a) = 0,34 - 0,044 \sqrt{e_a} \quad (10)$$

Dimana nilai e_a (satuan mbar) dapat dihitung menggunakan **Persamaan 4**.

$f(n/N)$ merupakan fungsi dari efek persentase lama penyinaran matahari pada radiasi gelombang panjang (R_{nl}) dan dirumuskan pada persamaan berikut ini:

$$f\left(\frac{n}{N}\right) = 0,10 + 0,90 \frac{n}{N} \quad (11)$$

Dimana nilai n/N bisa didapatkan dari data klimatologi (persentase lama penyinaran matahari) (Hadisusanto, 2010).

Metode Thornthwaite

Metode perhitungan untuk evapotranspirasi *Thornthwaite* dikembangkan oleh Thornthwaite tahun 1948 menggunakan data suhu udara dan letak geografis (lintang) dalam analisisnya (Anggraini & Slamet, 2021). Hasil perhitungan menggunakan metode ini masih sangat kasar karena komponen iklim lainnya tidak diperhitungkan (Hadisusanto, 2010). Perhitungan evapotranspirasi *Thornthwaite* ditunjukkan pada persamaan berikut ini:

$$Ep^* = 16 \left[\frac{10T}{T} \right]^a \quad (12)$$

dan,

$$Ep = Ep^* f \quad (13)$$

(Anggraini & Slamet, 2021)

Dimana:

- Ep* = Evapotranspirasi potensial belum terkoreksi (mm/bulan)
- Ep = Evapotranspirasi potensial sudah terkoreksi (mm/bulan)
- f = Faktor koreksi tergantung letak geografis
- T = Suhu rerata bulanan (°C)
- I = Indeks panas tahunan
- a = Konstanta yang tergantung oleh nilai I

Penjabaran komponen pada persamaan evapotranspirasi *Thornthwaite* tersebut dijelaskan sebagai berikut, faktor koreksi (f) nilainya tergantung pada letak geografisnya di permukaan bumi (letak lintang). Nilai dari faktor koreksi *Thornthwaite* ditunjukkan pada **Tabel 1**. Perhitungan evapotranspirasi menggunakan metode *Thornthwaite* digunakan jika pada suatu DAS hanya memiliki data suhu udara saja (Hadisusanto, 2010).

Tabel 1. Faktor koreksi *Thornthwaite*

B.U	JAN	FEB	MAR	APR	MEI	JUN	JUL	AGT	SEP	OKT	NOV	DE
0	1.04	.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04
5	1.02	.93	1.03	1.02	1.06	1.03	1.06	1.05	1.01	1.03	.99	1.02
10	1.00	.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	.98	.99
15	.97	.91	1.03	1.04	1.11	1.08	1.12	1.08	1.02	1.01	.95	.97
20	.95	.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	.93	.94
25	.93	.89	1.03	1.06	1.15	1.14	1.17	1.12	1.02	.99	.91	.91
26	.92	.88	1.03	1.06	1.15	1.15	1.17	1.12	1.02	.99	.91	.91
27	.92	.88	1.03	1.07	1.16	1.15	1.18	1.13	1.02	.99	.90	.90
28	.91	.88	1.03	1.07	1.16	1.16	1.18	1.13	1.02	.98	.90	.90
29	.91	.87	1.03	1.07	1.17	1.16	1.19	1.13	1.03	.98	.90	.89
30	.90	.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.20	1.14	1.03	.98	.89	.88
31	.90	.87	1.03	1.08	1.18	1.18	1.20	1.14	1.03	.98	.89	.88
32	.89	.86	1.03	1.08	1.19	1.19	1.21	1.15	1.03	.98	.88	.87
33	.88	.86	1.03	1.09	1.19	1.20	1.22	1.15	1.03	.97	.88	.86
34	.88	.85	1.03	1.09	1.20	1.20	1.22	1.16	1.03	.97	.87	.86
35	.87	.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	.97	.86	.85
36	.87	.85	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16	1.03	.97	.86	.84
37	.86	.84	1.03	1.10	1.22	1.23	1.25	1.17	1.03	.97	.85	.83
38	.85	.84	1.03	1.10	1.23	1.24	1.25	1.17	1.04	.96	.84	.83
39	.85	.84	1.03	1.11	1.23	1.24	1.26	1.18	1.04	.96	.84	.82
40	.84	.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	.96	.83	.81
41	.83	.83	1.03	1.11	1.25	1.26	1.27	1.19	1.04	.96	.82	.80
42	.82	.83	1.03	1.12	1.26	1.27	1.28	1.19	1.04	.95	.82	.79
43	.81	.82	1.02	1.12	1.26	1.28	1.29	1.20	1.04	.95	.81	.77
44	.81	.82	1.02	1.13	1.27	1.29	1.30	1.20	1.04	.95	.80	.76
45	.80	.81	1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	.94	.79	.75
46	.79	.81	1.02	1.13	1.29	1.31	1.32	1.22	1.04	.94	.79	.74
47	.77	.80	1.02	1.14	1.30	1.32	1.33	1.22	1.04	.93	.78	.73
48	.76	.80	1.02	1.14	1.31	1.33	1.34	1.23	1.05	.93	.77	.72
49	.75	.79	1.02	1.14	1.32	1.34	1.35	1.24	1.05	.93	.76	.71
50	.74	.78	1.02	1.15	1.33	1.36	1.37	1.25	1.06	.92	.76	.70
B.S												
5	1.06	.95	1.04	1.00	1.02	.99	1.02	1.03	1.00	1.05	1.03	1.06
10	1.06	.97	1.05	.99	1.01	.96	1.00	1.01	1.00	1.06	1.05	1.10
15	1.12	.98	1.05	.98	.98	.94	.97	1.00	1.00	1.07	1.07	1.12
20	1.14	1.00	1.05	.97	.96	.91	.95	.99	1.00	1.08	1.09	1.15
25	1.17	1.01	1.05	.96	.94	.88	.93	.98	1.00	1.10	1.11	1.18
30	1.20	1.03	1.06	.95	.92	.85	.90	.96	1.00	1.12	1.14	1.21
35	1.23	1.04	1.06	.94	.89	.82	.87	.94	1.00	1.12	1.17	1.25
40	1.27	1.06	1.07	.93	.86	.78	.84	.92	1.00	1.15	1.20	1.29
42	1.28	1.07	1.07	.92	.85	.76	.82	.92	1.00	1.16	1.22	1.31
44	1.30	1.08	1.07	.92	.83	.74	.81	.91	.99	1.17	1.23	1.33
46	1.32	1.10	1.07	.91	.82	.72	.79	.90	.99	1.17	1.25	1.35
48	1.34	1.11	1.08	.90	.80	.70	.76	.89	.99	1.18	1.27	1.37
50	1.37	1.12	1.08	.89	.77	.67	.74	.88	.99	1.19	1.29	1.41

Sumber: (Nugroho, 1989)

Suhu rerata bulanan (T) didapatkan dari data klimatologi. Indeks panas tahunan (I) dihitung berdasarkan suhu rerata setiap bulannya dan dirumuskan pada persamaan berikut ini:

$$I = \sum_{n=1}^{12} \left[\frac{T_n}{5} \right]^{1,514} \quad (14)$$

Dimana T_n adalah suhu udara rerata setiap bulannya

(°C) dan indeks-n menyatakan bulan ke-n pada tahun perhitungan. Konstanta a pada **Persamaan 12** merupakan suatu fungsi dari nilai I dan dirumuskan pada persamaan berikut ini:

$$a = 675 \times 10^{-9} I^3 - 771 \times 10^{-7} I^2 + 1792 \times 10^{-5} I + 0,49239 \quad (15)$$

Dimana I adalah indeks panas tahunan yang dihitung menggunakan **Persamaan 14** (Angraini & Slamet, 2021).

Pemodelan Debit *Fj. Mock*

Model *Mock* dikembangkan oleh Dr. Fj. Mock (1973) yang berbasis neraca air (Adiningrum, 2016). Beliau memperkenalkan cara perhitungan simulasi aliran sungai dari data hujan, evapotranspirasi dan karakteristik hidrologi DAS dalam makalahnya *Land Capability Appraisal and Water Availability Appraisal* di Bogor, Indonesia. Dalam proses perhitungannya, pemodelan menggunakan *Fj. Mock* ini perlu proses kalibrasi dengan data debit observasi jangka pendek minimal satu tahun (Hadisusanto, 2010). Pendekatan hujan-aliran dalam model *Mock* dijelaskan sebagai berikut, hujan yang turun ke permukaan bumi sebagian ada yang mengalami penguapan, penguapan bisa terjadi pada air di permukaan tanah (evaporasi) maupun pada permukaan tanaman (transpirasi), gabungan keduanya disebut dengan evapotranspirasi yang telah dijelaskan pada sub bagian sebelumnya, lalu selebihnya akan menjadi limpasan permukaan dan bagian yang mengalami proses infiltrasi. Air permukaan yang mengalami infiltrasi akan menuju lapisan yang kembang air dan menjadi aliran dasar (*baseflow*) atau aliran air tanah. Aliran dasar bersama dengan aliran permukaan akan menjadi aliran sungai (Adiningrum, 2016).

Proses perhitungan model *Mock* terbagi menjadi 5 tahapan utama yaitu: (1) *input* data hujan rerata wilayah dan hari hujan rerata (2) perhitungan evapotranspirasi aktual (E_a) atau evapotranspirasi terbatas (E_t) (3) perhitungan keseimbangan air pada permukaan tanah (4) perhitungan limpasan dan penyimpanan air tanah dan (5) perhitungan debit aliran sungai. kelima proses tersebut dijelaskan sebagai berikut:

- (1) *Input* data hujan (P) dan hari hujan.
- Analisis hujan wilayah menggunakan data hujan dan perangkat lunak sistem informasi geografis akan menjadi *input* dalam perhitungan debit *Mock*.

(2) Perhitungan evapotranspirasi terbatas (E_t).

Data yang digunakan adalah hasil perhitungan evapotranspirasi yang telah dibahas pada sub bagian sebelumnya. Setelah itu dilakukan perhitungan evapotranspirasi terbatas (E_t) dengan persamaan berikut ini:

$$E_t = ET_0 - \Delta E \quad (16)$$

Dimana ET_0 adalah evapotranspirasi potensial yang telah dihitung sebelumnya (menggunakan *Penman modifikasi*, *Thornthwaite* atau metode lainnya), ΔE pada persamaan tersebut merupakan sisa evaporasi dari kondisi permukaan tanah yang kering dan dirumuskan dengan persamaan berikut ini:

$$\Delta E = ET_0 \left(\frac{d}{30} \right) m \quad (17)$$

Dimana d adalah jumlah hari tanpa hujan dalam satu bulan yang dirumuskan $3/2 (18-h)$, dengan h adalah jumlah hari hujan dalam satu bulan, m adalah persentase lahan tanpa vegetasi (*expose surface*) dengan nilai sebagai berikut, m bernilai 0% untuk lahan dengan hutan, 10% - 40% untuk lahan yang mengalami erosi, 20% - 50% untuk lahan pertanian (Hadisusanto, 2010).

(3) Perhitungan keseimbangan air pada permukaan tanah.

Hujan yang turun ke permukaan bumi sebagian akan mengalami evapotranspirasi dan sisanya akan menjadi aliran permukaan dan aliran yang akan mengalami perkolasi ke dalam tanah menuju lapisan dibawahnya (*water surplus*) yang dirumuskan sebagai berikut:

$$W_s = (P - E_t) - S_s \quad (18)$$

Dimana P adalah curah hujan (mm/bulan) yang telah dianalisis pada tahapan (1), E_t adalah evapotranspirasi terbatas (mm/bulan) yang telah dihitung berdasarkan tahapan (2) atau **Persamaan 16**, S_s adalah *soil storage* atau tampungan air tanah yang tergantung dengan kelembaban tanah (SM) bulan ini dan sebelumnya (*soil moisture*), pada musim kemarau S_s bisa bernilai negatif. Nilai kelembaban tanah memiliki *range* $0 \leq SM \leq SMC$ dimana SMC adalah kapasitas kelembaban maksimum tanah yang ditentukan dengan cara *trial and error* terlebih dahulu.

(4) Perhitungan limpasan dan penyimpanan air tanah.

Setelah kelembaban tanah permukaan terbentuk,

maka air akan mengalami perkolasi menuju lapisan kenyang air dan menjadi tampungan air tanah (*ground water storage*) yang dirumuskan dengan persamaan berikut ini:

$$V_n = k V_{n-1} + 0,5 (1+k) I \quad (19)$$

Dimana, k adalah faktor resesi air tanah yang ditentukan secara *trial and error* dengan nilai 0,1 - 0,9. V_{n-1} adalah volume tampungan air tanah bulan sebelumnya (mm/bulan). I adalah nilai infiltrasi yang dihitung dengan persamaan berikut ini:

$$I = W_s i \quad (20)$$

Dimana i adalah koefisien infiltrasi dengan rentang nilai 0,1 - 0,9 (Putri et al., 2023). W_s merupakan *water surplus* yang dapat dihitung menggunakan **Persamaan 18**.

(5) Perhitungan debit aliran sungai

Komponen debit aliran sungai terdiri dari aliran dasar (*baseflow*) dan limpasan langsung (*direct run-off*). Aliran dasar (mm/bulan) merupakan aliran dari tampungan air tanah (*ground water storage*) yang mengalir menuju sungai (perkolasi) dan dirumuskan dengan persamaan berikut ini:

$$B_f = I - \Delta V_n \quad (21)$$

Dimana I dihitung dengan **Persamaan 20**, ΔV_n adalah selisih volume tampungan air tanah bulan ini (V_n) dengan bulan sebelumnya (V_{n-1}) yang dirumuskan dengan persamaan berikut ini:

$$\Delta V_n = V_n - V_{n-1} \quad (22)$$

Komponen debit aliran sungai selanjutnya adalah limpasan langsung (*direct run-off*) yang dirumuskan dalam persamaan berikut ini:

$$D_{ro} = W_s - I \quad (23)$$

Dimana W_s dan I masing-masing dihitung menggunakan **Persamaan 18** dan **20**.

Aliran debit sungai (Q) dengan pemodelan *Mock* merupakan penjumlahan dari aliran dasar (*baseflow*) dan limpasan langsung (*direct run-off*) yang dirumuskan dengan persamaan berikut ini:

$$Q = \frac{A (B_f + D_{ro})}{86,4 H} \quad (24)$$

Dimana A adalah luas DAS (km^2) dan H adalah jumlah hari kalender (Adiningrum, 2016).

Validasi Debit

Debit hasil perhitungan *Fj. Mock* harus divalidasi untuk mengetahui kesesuaian pemodelan dengan debit hasil pengukuran (observasi) (Widyaningsih et al., 2021). Analisis statistik yang biasa dilakukan untuk melakukan validasi adalah sebagai berikut:

(1) *Mean Absolute Error* (MAE), mengukur selisih absolut antara pemodelan dengan observasi yang dirumuskan dengan persamaan berikut ini:

$$MAE = \left| \frac{\sum_{i=1}^n (B_i - A_i)}{n} \right| \quad (25)$$

Dimana B_i adalah nilai debit pemodelan ke- i , A_i adalah nilai debit observasi ke- i dengan i dan n masing-masing adalah bulan ke 1,2,3 dst dan jumlah data.

(2) *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE) dirumuskan dalam persamaan berikut ini:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (A_i - B_i)^2}{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2} \quad (26)$$

Dimana \bar{A} adalah rerata nilai debit observasi. Nilai NSE memiliki interpretasi baik jika nilainya di atas 0,75 (Suhartanto et al., 2019).

(3) Koefisien korelasi (R) dirumuskan dengan persamaan berikut ini:

$$R = \frac{n \sum_{i=1}^n (A_i B_i) - (\sum_{i=1}^n A_i) (\sum_{i=1}^n B_i)}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n A_i^2 - (\sum_{i=1}^n A_i)^2} \sqrt{n \sum_{i=1}^n B_i^2 - (\sum_{i=1}^n B_i)^2}} \quad (27)$$

Nilai koefisien korelasi dalam rentang nilai 0,8 - 1 artinya memiliki interpretasi yang sangat kuat (Suhartanto et al., 2019).

(4) Kesalahan relatif (K_r) dirumuskan dengan persamaan berikut ini:

$$K_r = \left| \frac{\sum_{i=1}^n (A_i - B_i)}{\sum_{i=1}^n A_i} \right| 100\% \quad (28)$$

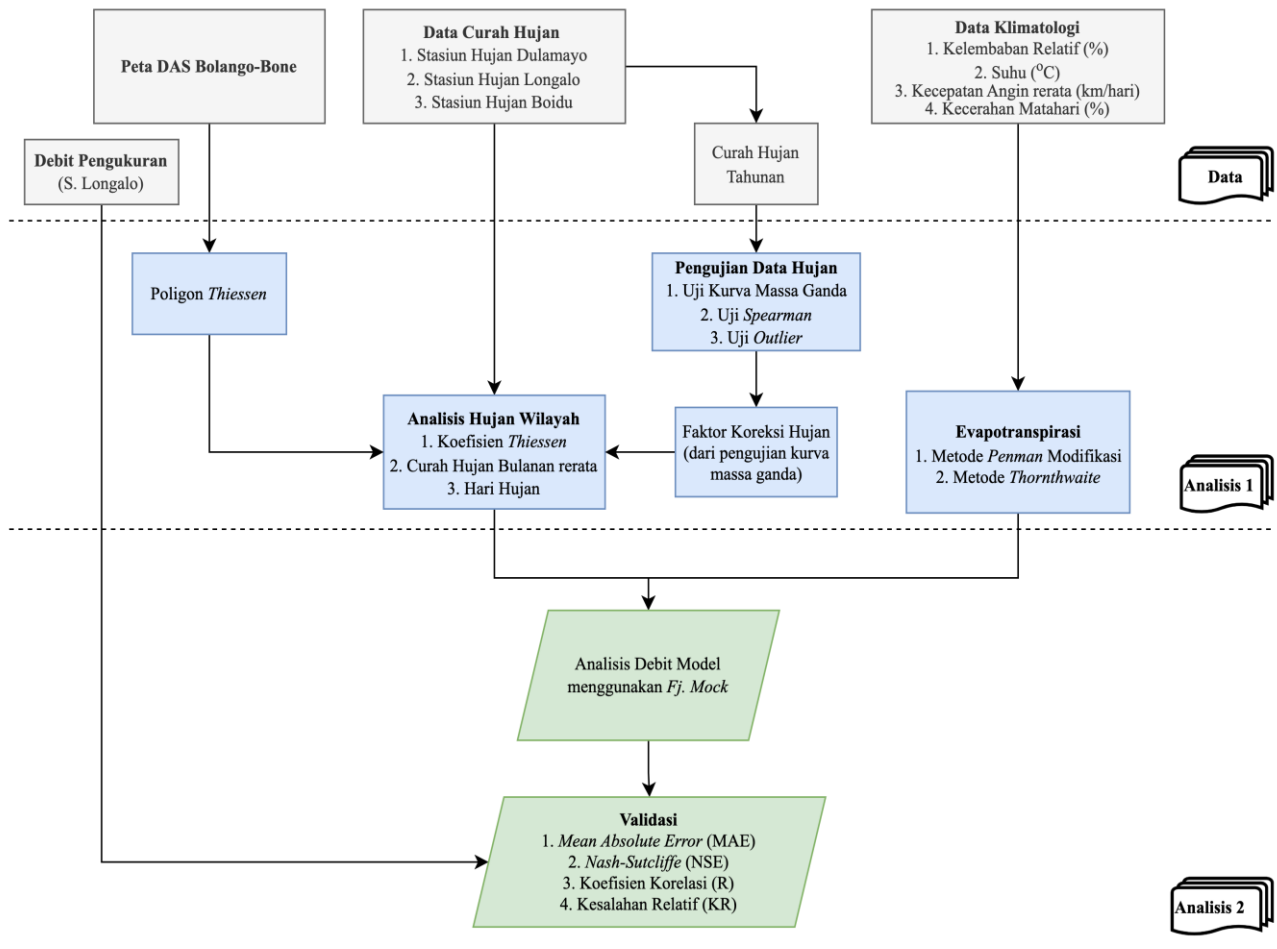
(Widyaningsih et al., 2021)

METODE

Penelitian ini berlokasi pada Sub DAS Mongiilo (DAS Bolango-Bone), pada aliran sungai menuju bendungan Bulango Ulu. Data-data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder dan bersumber dari Balai Wilayah Sungai Sulawesi II Gorontalo, adapun rincian datanya adalah sebagai berikut:

1. Data curah hujan harian selama 10 tahun periode pencatatan 2013-2022 pada stasiun hujan di DAS Bolango-Bone
2. Data klimatologi selama 10 tahun periode 2013-2022 pada stasiun klimatologi di DAS Bolango-Bone
3. Data pengukuran debit Sungai Longalo
4. Peta DAS Bolango-Bone

Tahapan analisis penulis bagi menjadi 2 tahapan, yaitu analisis pertama terkait aspek hidrologi berupa perhitungan hujan wilayah menggunakan metode poligon *Thiessen*, perhitungan evapotranspirasi menggunakan metode *Penman* modifikasi dan metode *Thornthwaite*. Analisis kedua adalah melakukan pemodelan debit menggunakan metode *Fj. Mock* dan melakukan validasi statistik untuk mengetahui perbandingan penggunaan metode evapotranspirasi dalam mendapatkan pemodelan debit yang mendekati nilai debit sebenarnya (observasi). Detail tahapan analisis pada penelitian ini ditunjukkan oleh bagan alir pada **Gambar 1**.

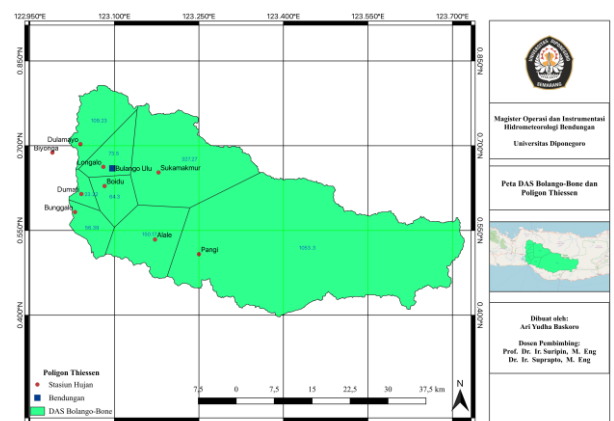


Gambar 1. Bagan alir analisis

Sumber: Analisis penulis (2023)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada tahap pertama, dilakukan analisis hujan wilayah menggunakan metode poligon *thiessen*. Data yang dibutuhkan adalah data peta DAS Bolango-Bone yang diolah menggunakan *software Quantum GIS* untuk mendapatkan peta luas pengaruh masing-masing stasiun hujan terhadap keseluruhan DAS. Melalui perangkat lunak *Quantum GIS* tersebut, posisi masing-masing stasiun hujan di-plot pada peta lalu diolah untuk mendapatkan luasan poligon *thiessen* seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2** berikut ini.



Gambar 2. Peta DAS dan Poligon Thiessen

Sumber: Analisis penulis (2023)

Lokasi penelitian ini merupakan lokasi pembangunan bendungan Bulango Ulu (Sub DAS Mongiilo), sehingga stasiun hujan yang digunakan adalah stasiun pada *catchment area* bendungan. Berdasarkan **Gambar 2** tersebut, Pada daerah tangkapan air Bendungan Bulango Ulu terdapat tiga stasiun hujan yang berpengaruh yaitu Stasiun Hujan

Dulamayo, Stasiun Hujan Longalo dan Stasiun Hujan Bidu yang menjadi *input* dalam menghitung pemodelan debit. Data curah hujan dari ketiga stasiun hujan tersebut diuji secara statistik (uji konsistensi, ketiadaan *trend*, dan *outlier*).

Selanjutnya dilakukan perhitungan evapotranspirasi dengan menggunakan metode *Penman* modifikasi dan metode *Thornthwaite* menggunakan data dari Stasiun Klimatologi Bone-Tumbehe.

Perhitungan evapotranspirasi metode *Penman*

modifikasi membutuhkan empat data klimatologi yaitu suhu rerata bulanan (°C), kecerahan matahari (%), kelembaban relatif rerata bulanan (%) dan kecepatan angin rerata bulanan (km/hari) lalu dilakukan perhitungan evapotranspirasi potensial dengan menggunakan **Persamaan 1** hingga **Persamaan 11**. Hasil perhitungan evapotranspirasi potensial metode *Penman* modifikasi (mm/hari) tahun 2022 ditunjukkan pada **Tabel 2** berikut ini.

Tabel 2. Evapotranspirasi *Penman* 2022

No	Bulan	Letak Lintang	T (°C)	es	w	f(t)	RH	ea	f(ea)	Ra (mm/hr)	n/N	Rs	f(n/N)	u	f(u)	Rn1	ETo*	c	ETo (mm/hari)
1	Jan	0,55° LU	27,64	37,08	0,77	16,23	0,88	32,69	0,09	14,92	0,47	7,21	0,52	38,84	0,37	0,75	4,0	1,1	4,4
2	Feb	0,55° LU	27,13	36,03	0,77	16,12	0,91	32,67	0,09	15,45	0,37	6,75	0,44	32,24	0,36	0,62	3,7	1,1	4,0
3	Mar	0,55° LU	27,94	37,70	0,77	16,29	0,90	33,80	0,08	15,67	0,48	7,71	0,54	28,25	0,35	0,73	4,2	1,0	4,2
4	Apr	0,55° LU	28,32	38,48	0,78	16,38	0,86	33,25	0,09	15,30	0,55	8,03	0,60	31,10	0,35	0,84	4,4	0,9	4,0
5	Mei	0,55° LU	28,55	38,95	0,78	16,43	0,87	33,74	0,08	14,46	0,47	7,00	0,52	27,25	0,34	0,72	3,9	0,9	3,5
6	Jun	0,55° LU	27,91	37,63	0,77	16,29	0,86	32,25	0,09	13,98	0,62	7,81	0,66	27,99	0,35	0,96	4,2	0,9	3,8
7	Jul	0,55° LU	27,60	36,99	0,77	16,22	0,90	33,31	0,09	14,16	0,39	6,27	0,45	21,93	0,33	0,62	3,4	0,9	3,1
8	Agu	0,55° LU	27,46	36,71	0,77	16,19	0,89	32,63	0,09	14,83	0,50	7,41	0,55	30,63	0,35	0,79	4,0	1,1	4,4
9	Sep	0,55° LU	27,68	37,16	0,77	16,24	0,87	32,35	0,09	15,30	0,52	7,77	0,56	31,63	0,36	0,82	4,3	1,1	4,7
10	Okt	0,55° LU	28,49	38,83	0,78	16,41	0,83	32,28	0,09	15,37	0,57	8,20	0,61	37,81	0,37	0,90	4,6	1,1	5,1
11	Nov	0,55° LU	28,32	38,48	0,78	16,38	0,86	33,05	0,09	15,02	0,48	7,38	0,53	35,60	0,37	0,76	4,2	1,1	4,6
12	Des	0,55° LU	28,07	37,96	0,78	16,32	0,87	33,11	0,09	14,69	0,50	7,33	0,55	37,65	0,37	0,78	4,1	1,1	4,5

Sumber: Analisis penulis (2023)

Perhitungan evapotranspirasi metode *Thornthwaite* hanya menggunakan data suhu rerata bulanan saja. Analisis evapotranspirasi potensial menggunakan metode *Thornthwaite* membutuhkan faktor koreksi (**Tabel 1**) yang merupakan fungsi dari letak geografis (garis lintang) dan waktu (bulan) untuk mendapatkan nilai evapotranspirasi potensial terkoreksi. Pada sub bagian sebelumnya telah dijelaskan tahapan perhitungan pada metode *Thornthwaite* yaitu dengan menghitung nilai indeks panas tahunan, konstanta a, lalu menghitung evapotranspirasi potensialnya menggunakan **Persamaan 12** hingga **Persamaan 15**. Pada **Tabel 3** ditunjukkan hasil perhitungan evapotranspirasi potensial metode *Thornthwaite* (dalam mm/bulan) untuk tahun 2022.

Tabel 3. Evapotranspirasi *Thornthwaite* 2022

Bulan	2022				
	t (°C)	I	a	Ep*	Ep
Jan	27,6	13,3		154,217	160,046
Feb	27,1	12,9		142,470	133,765
Mar	27,9	13,5		161,464	167,745
Apr	28,3	13,8		171,015	172,913
May	28,6	14,0		177,002	184,472
Jun	27,9	13,5	4,254	160,728	162,689
Jul	27,6	13,3		153,269	159,737
Aug	27,5	13,2		149,989	156,154
Sep	27,7	13,3		155,168	156,720
Oct	28,5	13,9		175,425	182,249
Nov	28,3	13,8		171,015	172,349
Dec	28,1	13,6		164,684	170,909
Total		162,3			

Sumber: Analisis penulis (2023)

Rekapitulasi hasil perhitungan evapotranspirasi metode *Penman* modifikasi dan *Thornthwaite* ditunjukkan pada **Tabel 4** dan **Tabel 5**.

Tabel 4. Rekapitulasi evapotranspirasi metode *Penman* modifikasi (mm/hari)

No	Bulan	ET ₀ (mm/hari)									
		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
1	Januari	4,4	4,1	4,7	4,9	4,1	4,0	3,7	4,5	3,8	4,4
2	Februari	4,2	5,3	4,6	5,3	4,1	4,2	4,3	4,6	4,5	4,0
3	Maret	4,5	5,0	4,5	4,9	3,7	3,8	4,5	4,3	3,9	4,2
4	April	3,5	4,1	4,0	4,1	3,9	3,6	4,0	3,9	3,9	4,0
5	Mei	3,3	3,6	4,0	3,6	3,7	3,9	4,0	3,6	3,5	3,5
6	Juni	3,4	3,3	3,4	3,3	3,0	3,2	3,3	3,1	3,5	3,8
7	Juli	2,8	3,8	4,0	3,5	3,3	3,7	3,1	2,9	3,3	3,1
8	Agustus	4,2	4,3	5,2	4,9	3,9	4,9	5,5	4,2	4,4	4,4
9	September	4,6	5,4	5,5	4,6	3,6	5,3	5,8	4,2	4,0	4,7
10	Oktober	3,9	5,3	5,3	4,6	4,1	4,4	4,9	4,3	5,0	5,1
11	November	4,9	4,6	5,1	4,8	4,3	4,2	4,9	4,2	4,5	4,6
12	Desember	4,0	4,5	4,9	4,2	2,7	4,0	4,2	4,0	4,6	4,5

Sumber: Analisis penulis (2023)

Tabel 5. Rekapitulasi evapotranspirasi metode *Thornthwaite* (mm/bulan)

No	Bulan	Ep (mm/bulan)									
		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
1	Januari	167,2	138,6	150,0	155,9	141,8	147,1	132,3	171,5	154,1	160,0
2	Februari	120,9	143,0	126,4	141,0	130,2	137,0	123,4	153,4	152,7	133,8
3	Maret	169,8	167,6	143,9	167,6	157,7	138,8	153,7	170,0	161,6	167,7
4	April	175,1	156,2	144,1	156,3	177,6	154,1	172,5	160,6	155,4	172,9
5	Mei	167,9	154,2	150,6	156,5	185,7	158,8	168,1	168,5	165,5	184,5
6	Juni	156,1	147,6	140,2	139,3	146,9	131,3	147,5	148,1	161,9	162,7
7	Juli	138,3	149,8	140,3	139,2	136,0	143,4	139,0	142,9	144,8	159,7
8	Agustus	140,3	154,1	130,4	141,2	140,1	154,1	147,4	146,0	144,6	156,2
9	September	151,2	136,9	119,3	134,9	142,2	147,4	143,0	146,7	139,6	156,7
10	Oktober	160,2	138,7	130,1	143,0	167,3	156,0	151,4	151,1	170,2	182,2
11	November	148,6	144,9	149,7	147,0	172,0	164,9	153,4	151,7	160,5	172,3
12	Desember	155,4	147,0	158,5	153,6	172,1	140,7	162,6	167,8	175,8	170,9

Sumber: Analisis penulis (2023)

Nilai evapotranspirasi yang didapatkan dari kedua metode tersebut akan menjadi *input* dalam analisis pemodelan debit menggunakan metode *Fj. Mock*, setelah itu dilakukan proses kalibrasi menggunakan data debit observasi selama 10 tahun (2013-2022) pada Sungai Longalo untuk mendapatkan parameter *Fj. Mock* yang optimum.

Pemodelan debit dilakukan dengan memasukkan data hujan rerata wilayah, hari hujan, evapotranspirasi potensial yang telah dihitung dengan menggunakan kedua metode sebelumnya (*Penman* modifikasi dan *Thornthwaite*) dan menganalisis sesuai tahapan pada sub bagian sebelumnya (5 tahapan) hingga mendapatkan nilai debit hasil pemodelan untuk setiap bulannya dari tahun 2013 sampai 2022 menggunakan **Persamaan 16** hingga **Persamaan 24**. Parameter-parameter *Mock* seperti koefisien infiltrasi (*i*), faktor resesi air tanah (*k*), nilai kapasitas kelembaban maksimum tanah (SMC) didapatkan secara *trial and error* dan kalibrasi terhadap debit observasi. Pada penelitian ini nilai masing-masing parameter ditentukan sebagai berikut, *i* nilainya 0,5, *k* berkisar dari 0,2

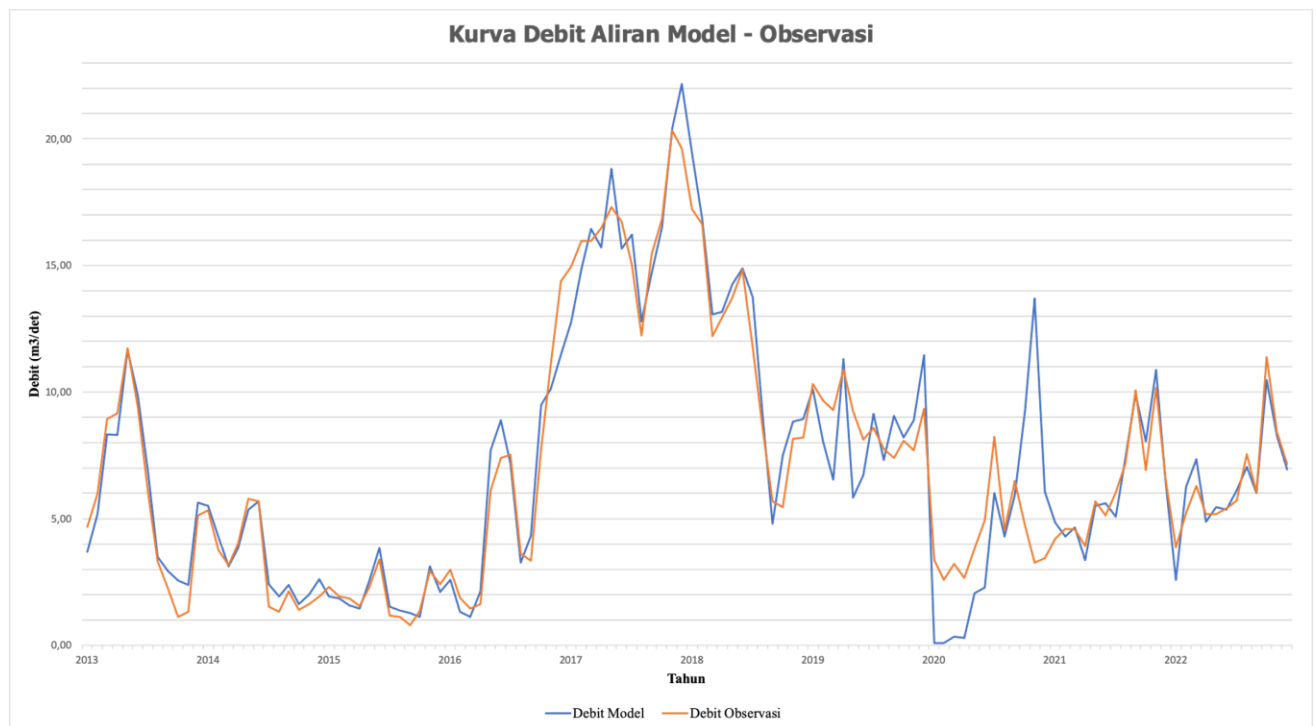
hingga 0,8, nilai *expose surface* atau *m* berkisar dari 20% sampai 50%, kapasitas kelembaban tanah minimum adalah 10 mm, kapasitas maksimum sebesar 200 mm, kapasitas kelembaban tanah awal sebesar 50 mm. Nilai masing-masing pemodelan debit dan debit observasi untuk setiap tahunnya ditunjukkan pada **Tabel 6**. Pada **Gambar 3** dan **Gambar 4** ditunjukkan kurva perbandingan antara nilai pemodelan debit dengan debit observasi masing-masing untuk metode *Penman* modifikasi dan metode *Thornthwaite*. Setelah didapatkan nilai debit pada pemodelan *Mock*, maka dilakukan proses validasi statistik menggunakan uji *Mean Absolute Error* (MAE), *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE), koefisien korelasi (R) dan uji kesalahan relatif (K_r) terhadap debit observasi menggunakan data 10 tahun untuk mengetahui perbandingan kinerja kedua metode evapotranspirasi dalam pemodelan debit menggunakan metode *Fj. Mock*.

Tabel 6. Rekapitulasi pemodelan debit *Mock* dan debit observasi (m³/det)

Tahun	Debit	Bulan											
		Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Des
2013	<i>penman</i>	3,7	5,2	8,3	8,3	11,7	9,9	6,9	3,5	2,9	2,6	2,4	5,6
	<i>thornthwaite</i>	3,7	5,0	6,8	2,1	9,1	5,7	4,2	2,6	2,1	1,9	1,7	3,7
	Observasi	4,7	6,0	8,9	9,2	11,7	9,4	6,0	3,3	2,3	1,1	1,3	5,1
2014	<i>penman</i>	5,5	4,3	3,1	3,8	5,4	5,7	2,4	1,9	2,4	1,6	2,0	2,6
	<i>thornthwaite</i>	3,5	3,0	2,1	2,6	1,8	1,6	1,1	0,9	1,1	0,7	1,7	2,2
	Observasi	5,3	3,8	3,2	4,0	5,8	5,7	1,5	1,3	2,1	1,4	1,6	1,9
2015	<i>penman</i>	1,9	1,9	1,6	1,5	2,5	3,8	1,5	1,4	1,3	1,1	3,1	2,1
	<i>thornthwaite</i>	1,6	1,5	1,3	1,2	2,1	1,9	0,7	0,7	0,6	0,5	1,5	1,0
	Observasi	2,3	1,9	1,9	1,5	2,3	3,4	1,2	1,1	0,8	1,3	2,9	2,4

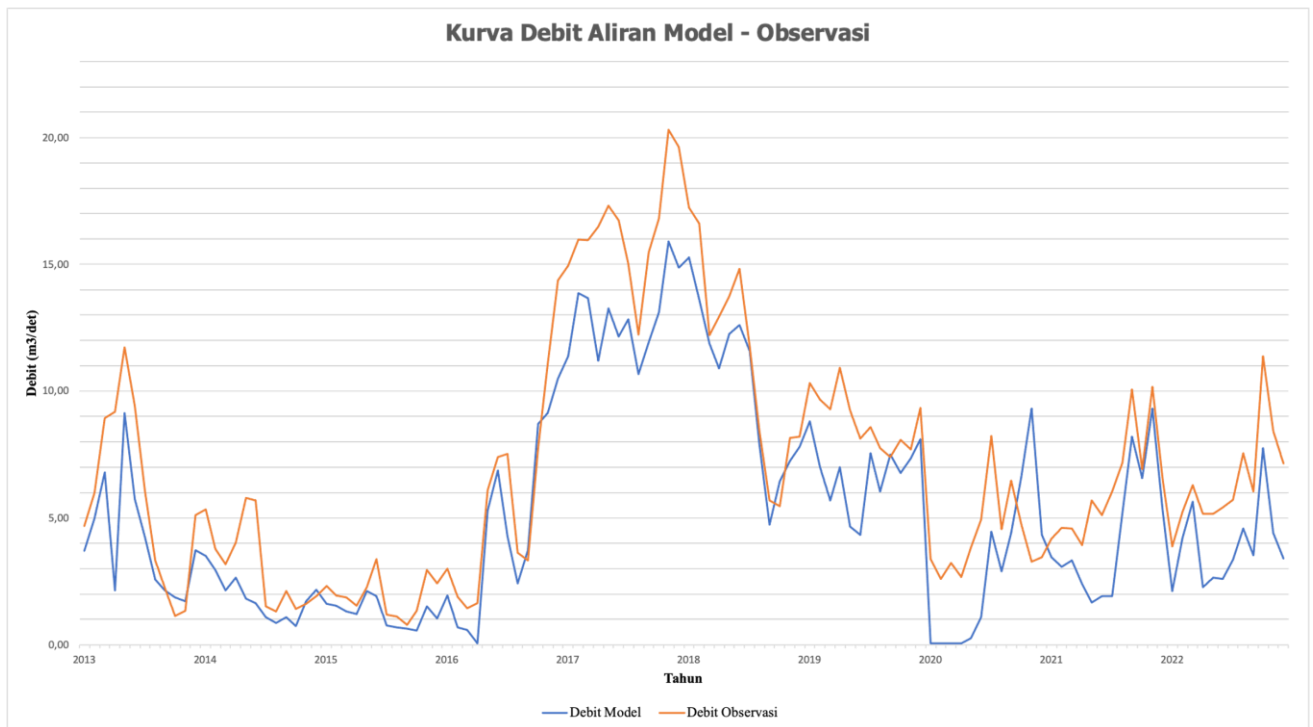
Tahun	Debit	Bulan											
		Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Des
2016	penman	2,6	1,3	1,1	2,1	7,7	8,9	7,2	3,3	4,3	9,5	10,1	11,5
	thornthwaite	1,9	0,7	0,6	0,1	5,3	6,9	4,3	2,4	3,7	8,7	9,1	10,5
	Observasi	3,0	1,9	1,4	1,6	6,1	7,4	7,5	3,6	3,3	7,8	11,1	14,4
2017	penman	12,8	14,8	16,4	15,7	18,8	15,7	16,2	12,8	14,7	16,5	20,4	22,2
	thornthwaite	11,4	13,9	13,7	11,2	13,3	12,2	12,8	10,7	11,9	13,1	15,9	14,9
	Observasi	15,0	16,0	16,0	16,5	17,3	16,7	15,0	12,2	15,5	16,8	20,3	19,6
2018	penman	19,4	16,8	13,1	13,2	14,3	14,9	13,8	8,9	4,8	7,5	8,8	8,9
	thornthwaite	15,3	13,6	11,9	10,9	12,3	12,6	11,6	7,9	4,7	6,4	7,3	7,8
	Observasi	17,2	16,6	12,2	12,9	13,7	14,8	11,8	8,5	5,7	5,5	8,2	8,2
2019	penman	10,1	8,1	6,6	11,3	5,8	6,7	9,1	7,3	9,1	8,2	8,9	11,5
	thornthwaite	8,8	7,0	5,7	7,0	4,7	4,3	7,6	6,0	7,5	6,8	7,3	8,1
	Observasi	10,3	9,7	9,3	10,9	9,2	8,1	8,6	7,8	7,4	8,1	7,7	9,3
2020	penman	0,1	0,1	0,3	0,3	2,0	2,3	6,0	4,3	5,9	9,3	13,7	6,1
	thornthwaite	0,1	0,1	0,0	0,0	0,3	1,1	4,4	2,9	4,4	6,6	9,3	4,3
	Observasi	3,4	2,6	3,2	2,7	3,8	4,9	8,2	4,6	6,5	4,7	3,3	3,5
2021	penman	4,9	4,3	4,7	3,4	5,5	5,6	5,1	7,4	9,9	8,1	10,9	6,4
	thornthwaite	3,5	3,1	3,3	2,4	1,7	1,9	1,9	5,2	8,2	6,6	9,3	5,3
	Observasi	4,2	4,6	4,6	3,9	5,7	5,1	6,0	7,2	10,1	6,9	10,2	6,5
2022	penman	2,6	6,3	7,3	4,9	5,5	5,4	6,1	7,1	6,0	10,5	8,3	6,9
	thornthwaite	2,1	4,2	5,6	2,3	2,6	2,6	3,3	4,6	3,5	7,8	4,4	3,4
	Observasi	3,9	5,2	6,3	5,2	5,2	5,4	5,7	7,5	6,0	11,4	8,4	7,2

Sumber: Analisis penulis (2023)



Gambar 3. Kurva perbandingan debit model - observasi metode Mock-Penman

Sumber: Analisis penulis (2023)



Gambar 4. Kurva perbandingan debit model - observasi metode *Mock-Thornthwaite*

Sumber: Analisis penulis (2023)

Berdasarkan hasil yang ditunjukkan pada grafik debit model-observasi terlihat bahwa perhitungan debit model *Fj. Mock* dengan menggunakan masukan dari evapotranspirasi *Penman* modifikasi atau *Mock-Penman* (**Gambar 3**) memiliki nilai yang mendekati nilai debit observasi dibandingkan dengan model yang menggunakan masukan dari nilai evapotranspirasi *Thornthwaite* atau *Mock-Thornthwaite* (**Gambar 4**) pada validasi selama 10 tahun. Validasi pada pemodelan debit *Fj. Mock* dilakukan dengan analisis statistik menggunakan parameter MAE (*Mean Absolute Error*), NSE (*Nash-Sutcliffe Efficiency*), koefisien korelasi (R) dan uji kesalahan relatif (K_r) seperti yang telah dibahas pada sub bagian sebelumnya menggunakan **Persamaan 25** hingga **Persamaan 28** untuk mengukur kinerja masing-masing metode dalam menghasilkan nilai pemodelan debit yang mendekati nilai debit sebenarnya. Nilai parameter statistik pada masing-masing metode ditunjukkan pada **Tabel 7** berikut ini.

Tabel 7. Rekapitulasi parameter statistik

Debit	Parameter			
	MAE	NSE	R	KR
<i>Mock-Penman</i>	0,963	0,891	0,949	0,013
<i>Mock-Thornthwaite</i>	1,970	0,731	0,934	0,251

Sumber: Analisis penulis (2023)

Berdasarkan tabel tersebut, model debit *Fj. Mock* dengan metode evapotranspirasi *Penman* untuk validasi 10 tahun memiliki nilai yang lebih baik daripada model debit *Fj. Mock* dengan metode evapotranspirasi *Thornthwaite*, dimana nilai MAE pada *Mock-Penman* memiliki error terkecil (mendekati 0), nilai NSE dengan interpretasi lebih baik (mendekati 1), nilai koefisien korelasi (R) dengan interpretasi lebih kuat (mendekati 1) dan nilai kesalahan relatif (K_r) sebesar 0,013 (1,3%) pada metode *Mock-Penman* menunjukkan bahwa pemodelan debit ini memiliki nilai yang mendekati nilai debit sebenarnya (debit observasi).

PENUTUP

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis menggunakan parameter statistik *Mean Absolute Error* (MAE), *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE), koefisien korelasi (R) dan kesalahan relatif (K_r), disimpulkan bahwa pemodelan debit *Mock-Penman* memiliki hasil yang lebih mendekati nilai debit observasi daripada pemodelan debit *Mock-Thornthwaite*.

DAFTAR PUSTAKA

- Adiningrum, C. (2016). Analisis Perhitungan Evapotranspirasi Aktual Terhadap Perkiraan Debit Kontinyu dengan Metode Mock. *Jurnal Teknik Sipil*, 13(2), 135–147. <https://doi.org/10.24002/jts.v13i2.649>
- Angraini, N., & Slamet, B. (2021). Thornthwaite Models for Estimating Potential evapotranspiration in Medan City. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 912(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/912/1/012095>
- Chow, V. Te, Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology* (B. J. Clark & J. Morriss, Eds.; 2nd ed.). McGraw-Hill Book Co.
- Hadisusanto, N. (2010). *Aplikasi Hidrologi* (H. Istianto, Ed.; 1st ed., Vol. 1). Jogja Mediautama.
- Jayanti, M., Sabar, A., Ariesyady, H. D., Marselina, M., & Qadafi, M. (2023). A comparison of three water discharge forecasting models for monsoon climate region: A case study in cimanuk-jatigede watershed Indonesia. *Water Cycle*, 4, 17–25. <https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2023.01.002>
- Nugroho, A. (1989). Beberapa Teori dan Aplikasi Rumus Thornthwaite untuk Menghitung Jumlah Cadangan Sumber Daya Air. *Majalah Geografi Indonesia*, 2(3), 27–38. <https://journal.ugm.ac.id/mgi/article/view/5280>
- Putri, A. S., Suhartanto, E., & Fidari, J. S. (2023). Perbandingan Metode Alih Ragam Hujan Menjadi Debit dengan FJ. Mock dan NRECA di DAS Rejoso Kabupaten Pasuruan. *Jurnal Teknologi Dan Rekayasa Sumber Daya Air*, 3(2), 78–92. <https://doi.org/10.21776/ub.jtresda.2023.003.002.07>
- Suhartanto, E., Cahya, E. N., & Maknun, L. (2019). Analisa Limpasan Berdasarkan Curah Hujan Menggunakan Model Artificial Neural Network (ANN) di Sub DAS Brantas Hulu. *Jurnal Teknik Pengairan*, 10(2), 134–144. <https://doi.org/10.21776/ub.pengairan.2019.010.02.07>
- Widyaningsih, K. waasiu, Harisuseno, D., & Soetopo, W. (2021). Perbandingan Metode FJ. Mock dan NRECA untuk Transformasi Hujan Menjadi Debit pada DAS Metro Kabupaten Malang, Jawa Timur. *Jurnal Teknologi Dan Rekayasa Sumber Daya Air*, 1(1), 52–61. <https://doi.org/10.21776/ub.jtresda.2021.001.01.05>
- Wilnaldo, A., Putra, Y. S., & Adriat, R. (2020). Perbandingan Metode Perhitungan Evapotranspirasi Potensial di Paloh Kabupaten Sambas Kalimantan Barat. *PRISMA FISIKA*, 8(3), 165–171. <https://doi.org/10.26418/pf.v8i3.43618>
- Wirawan, J., Idkham, M., & Chairani, S. (2021). Analisis Evapotranspirasi dengan Menggunakan Metode Thornthwaite, Blaney Criddle, Hargreaves, dan Radiasi. *Rona Teknik Pertanian*, 6(2), 451–457. <https://doi.org/10.17969/rtp.v6i2.20429>