

MENGUJI DIGITALISASI DATA PICHE EVAPORIMETER SEBAGAI DASAR PERHITUNGAN EVAPOTRANSPIRASI REFERENSI MENGGUNAKAN SENSOR LOAD CELL

Rida Yustian Yuda Ditiya^{1*}, Nardi², Abraham Frederik Mustamu³, Benyamin Heryanto Rusanto⁴

^{1,2,3,4}Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika; Jl. Meteorologi No.5, RT.003/RW.013, Tanah Tinggi, Kec. Tangerang, Kota Tangerang, Banten 15221; 02173691621

Keywords:

Piche evaporimeter, sensor load cell, evapotranspirasi referensi, digitalisasi, ESP32.

Correspondent Email:

maulalfahmi@gmail.com

Abstrak. Pengukuran evaporasi menggunakan Piche evaporimeter di Stasiun Klimatologi Jawa Timur masih dilakukan secara manual, sehingga rentan terhadap human error dan tidak memungkinkan perekaman data secara kontinu.. Penelitian ini mengembangkan sistem digitalisasi Piche evaporimeter berbasis sensor load cell yang terintegrasi dengan modul ADC HX711, mikrokontroler ESP32, penyimpanan MicroSD, dan antarmuka web berbasis MySQL. Sistem menerapkan Median Filter dan Exponential Moving Average (EMA, $\alpha = 0,05$) secara bertingkat untuk menstabilkan sinyal sensor. Evaporasi dihitung dari selisih massa air setiap interval dua jam, lalu dikonversi menjadi estimasi evapotranspirasi referensi (ET_0) menggunakan koefisien Piche. Pengujian komparasi menunjukkan persentase galat rata-rata 0,01% dengan $R^2 = 99,9975\%$. Selama 1–5 Juli 2026, sistem mencatat evaporasi harian 3,07–3,86 mm dan ET_0 2,15–2,51 mm/hari. Sistem ini membuktikan bahwa instrumen pemantauan evaporasi yang ekonomis, otomatis, dan akurat dapat mendukung kegiatan klimatologi pada skala pendidikan maupun pertanian masyarakat.



Copyright © 2026 The Author(s), Published by Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

Abstract. Evaporation measurements using a Piche evaporimeter at the East Java Climatological Station are still performed manually, making the process susceptible to human error and preventing continuous data recording. This study developed a digital Piche evaporimeter system based on a load cell sensor integrated with an HX711 analog-to-digital converter (ADC), an ESP32 microcontroller, MicroSD storage, and a MySQL-based web interface. The system employs a two-stage filtering approach consisting of a Median Filter and an Exponential Moving Average (EMA, $\alpha = 0.05$) filter to stabilize the sensor signal. Evaporation was calculated from the water mass loss measured at two-hour intervals and subsequently converted into reference evapotranspiration (ET_0) estimates using the Piche coefficient. Comparative testing demonstrated an average error of 0.01% with a coefficient of determination (R^2) of 99.9975%. During the observation period from 1 to 5 July 2026, the system recorded daily evaporation values ranging from 3.07 to 3.86 mm and estimated ET_0 values ranging from 2.15 to 2.51 mm day⁻¹. These results demonstrate that a low-cost, automated, and accurate evaporation monitoring instrument can support climatological observations for educational purposes and community-scale agricultural applications.

1. PENDAHULUAN

Penguapan atau evaporasi merupakan salah satu komponen paling menentukan dalam siklus hidrologi. Besarnya jumlah air yang menguap dari permukaan tanah, waduk, maupun media tanam secara langsung memengaruhi ketersediaan air di suatu wilayah, khususnya untuk kebutuhan pertanian. Dalam konteks ini, evapotranspirasi referensi (ET_0) menjadi parameter kunci yang digunakan para peneliti dan praktisi pertanian untuk memperkirakan kebutuhan air tanaman serta merancang sistem irigasi yang efisien [1].

Salah satu instrumen standar yang digunakan untuk mengukur laju penguapan di stasiun klimatologi adalah Piche evaporimeter. Alat ini bekerja dengan prinsip sederhana: air dalam tabung kaca merembes melalui kertas saring dan menguap ke atmosfer, kemudian selisih volume air dari hari ke hari dicatat sebagai nilai evaporasi. Meski telah digunakan secara luas di stasiun UPT BMKG, pencatatan datanya hingga saat ini masih dilakukan secara manual oleh petugas pengamat. Ketergantungan pada proses manual ini membawa sejumlah kelemahan yang cukup serius: data hanya tersedia tiga kali sehari, resolusi temporal rendah, dan hasil pengukuran sangat bergantung pada ketelitian individu sehingga rentan terhadap *human error* [10].

Perkembangan teknologi sensor dan *Internet of Things* (IoT) membuka peluang besar untuk mengatasi keterbatasan tersebut, seperti yang telah diterapkan pada berbagai sistem monitoring pertanian berbasis IoT [22]. Beberapa penelitian telah mendemonstrasikan potensi digitalisasi instrumen klimatologi konvensional menggunakan sensor berbasis mikrokontroler. Toruan dan Prayoga [10] berhasil mengembangkan prototipe Piche evaporimeter digital menggunakan sensor load cell dan mikrokontroler Arduino yang mampu merekam perubahan massa air secara kontinu dengan resolusi tinggi. Di sisi lain, sejumlah penelitian juga telah mengeksplorasi metode estimasi ET_0 menggunakan instrumen sederhana sebagai alternatif terhadap metode baku FAO Penman-Monteith yang memerlukan banyak data meteorologi. Owusu-Sekyer et al. [17] membandingkan lima metode estimasi ET_0 di Ghana dan menyimpulkan bahwa Piche evaporimeter, meski berkorelasi lebih lemah dengan FAO56-PM, tetap dapat digunakan

sebagai alternatif praktis di wilayah dengan keterbatasan data cuaca. Hasil serupa juga ditunjukkan oleh Onwuegbunam et al. [13] di Nigeria, yang menegaskan bahwa metode berbasis pengukuran langsung memerlukan koefisien konversi yang tepat agar hasilnya dapat mendekati metode standar.

Meskipun demikian, terdapat kesenjangan yang belum sepenuhnya terjawab oleh penelitian-penelitian tersebut. Sebagian besar sistem yang dikembangkan masih menggunakan mikrokontroler tanpa kemampuan WiFi sehingga data tidak dapat diakses secara *real-time*. Berdasarkan telaah terhadap penelitian yang digunakan pada penelitian ini, integrasi antara digitalisasi Piche evaporimeter, estimasi ET_0 , dan penyajian data melalui web masih belum banyak dibahas secara bersamaan. Selain itu, instrumen yang tersedia secara komersial untuk pengukuran evaporasi digital umumnya memiliki harga yang tidak terjangkau oleh instansi pendidikan, lembaga penelitian skala kecil, maupun komunitas pertanian. Kondisi inilah yang menjadi celah nyata yang perlu diisi.

Penelitian ini hadir untuk menjawab celah tersebut dengan mengembangkan sistem digitalisasi Piche evaporimeter berbasis sensor load cell yang ekonomis namun tetap akurat. Sistem yang dibangun mengintegrasikan mikrokontroler ESP32 berkemampuan WiFi, algoritma penyaringan sinyal berlapis (*Median Filter* dan *Exponential Moving Average*), serta antarmuka web yang terhubung langsung dengan basis data MySQL untuk menampilkan data evaporasi dan estimasi ET_0 secara *real-time*. Dengan pendekatan ini, penelitian bertujuan untuk: (1) merancang dan menguji sistem digitalisasi Piche evaporimeter yang mampu menghasilkan data akurat secara otomatis, (2) memvalidasi kinerja sensor melalui komparasi dengan timbangan analitik, dan (3) mengestimasi nilai ET_0 dari data evaporasi harian menggunakan koefisien Piche sebagaimana dikemukakan oleh Casanova et al. [21]. Pada akhirnya, sistem ini diharapkan dapat menjadi solusi pemantauan evaporasi yang lebih terjangkau dan dapat direplikasi secara luas.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Piche evaporimeter merupakan salah satu instrumen yang digunakan untuk mengukur

besarnya evaporasi berdasarkan perubahan volume air di dalam tabung kaca yang dilengkapi dengan kertas saring pada bagian bawah. Air di dalam tabung akan merembes menuju kertas saring, kemudian menguap ke atmosfer akibat pengaruh kondisi lingkungan seperti suhu udara, kelembapan relatif, dan kecepatan angin [8]. Hingga saat ini, pengamatan menggunakan Piche evaporimeter di berbagai stasiun klimatologi masih banyak dilakukan secara manual dengan membaca perubahan skala air pada tabung. Cara tersebut cukup sederhana, namun hasil pengukuran sangat bergantung pada ketelitian pengamat dan tidak dapat menghasilkan data secara kontinu [10].



Gambar 1. Piche evaporimeter

Perkembangan sensor digital membuka peluang untuk mengatasi keterbatasan tersebut. Salah satu pendekatan yang telah dikembangkan adalah memanfaatkan sensor load cell untuk mendeteksi perubahan massa air selama proses penguapan. Prinsip ini memungkinkan penurunan massa air direkam secara otomatis sehingga data evaporasi dapat diperoleh secara kontinu tanpa harus melakukan pembacaan langsung pada skala tabung. Toruan dan Prayoga [10] menunjukkan bahwa penggunaan load cell pada Piche evaporimeter mampu meningkatkan kontinuitas pengamatan serta menghasilkan data dengan resolusi yang lebih baik dibandingkan metode konvensional.

Karena perubahan massa yang diukur relatif kecil, sinyal keluaran sensor rentan terhadap gangguan yang dapat memengaruhi hasil pengukuran. Oleh sebab itu, diperlukan proses

penyaringan sinyal sebelum data digunakan untuk perhitungan evaporasi. Pada penelitian ini digunakan dua metode penyaringan, yaitu *Median Filter* dan *Exponential Moving Average (EMA)*. *Median Filter* berfungsi mengurangi pembacaan yang menyimpang akibat gangguan sesaat, sedangkan EMA digunakan untuk menghaluskan fluktuasi data sehingga nilai yang diperoleh menjadi lebih stabil [3].

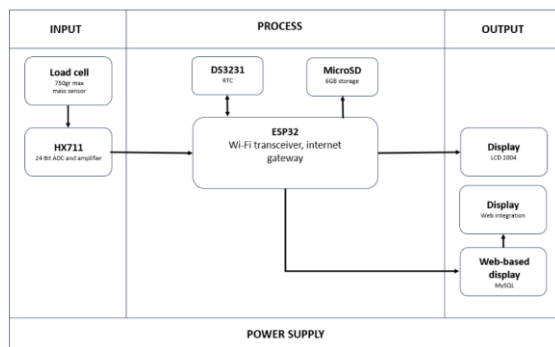
Data evaporasi yang telah diperoleh selanjutnya digunakan sebagai dasar untuk mengestimasi evapotranspirasi referensi (ET_0) melalui pendekatan koefisien Piche. Pendekatan ini menjadi alternatif ketika data meteorologi yang dibutuhkan oleh metode standar, seperti FAO Penman–Monteith, tidak tersedia secara lengkap. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa hasil pengukuran menggunakan Piche evaporimeter dapat digunakan untuk memperkirakan ET_0 dengan menerapkan koefisien empiris yang sesuai dengan kondisi wilayah pengamatan [4], [5].

Penelitian yang dilakukan oleh Toruan dan Prayoga [2] menunjukkan bahwa sensor load cell dapat dimanfaatkan untuk mendigitalisasi Piche evaporimeter sehingga proses pengamatan evaporasi dapat dilakukan secara otomatis. Sementara itu, penelitian lain lebih banyak membahas penggunaan data evaporasi untuk memperkirakan evapotranspirasi referensi (ET_0) melalui pendekatan koefisien Piche [4], [5]. Meskipun demikian, kedua pendekatan tersebut masih dikembangkan secara terpisah. Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini mengintegrasikan proses pengukuran evaporasi menggunakan Piche evaporimeter digital, perhitungan estimasi evapotranspirasi referensi (ET_0), serta penyajian data melalui antarmuka web dalam satu sistem.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem digitalisasi Piche evaporimeter yang mampu mengukur evaporasi secara otomatis dan mengestimasi nilai evapotranspirasi referensi (ET_0). Sistem yang dikembangkan terdiri atas sensor load cell sebagai pendeteksi perubahan massa air, modul HX711 sebagai penguat sekaligus konverter analog-ke-digital, ESP32 sebagai pengendali utama, sebagaimana lazim digunakan pada sistem monitoring IoT berbasis mikrokontroler [22], modul RTC

DS3231 sebagai sumber waktu, MicroSD sebagai media penyimpanan data, serta LCD untuk menampilkan hasil pengukuran secara lokal. Data hasil pengukuran selanjutnya dikirim ke basis data MySQL dan ditampilkan melalui antarmuka web sehingga dapat dipantau secara daring.



Gambar 2. Diagram blok sistem digitalisasi Piche evaporimeter.

Pada sistem yang dikembangkan, tabung Piche evaporimeter ditempatkan di atas sensor load cell sehingga perubahan massa air akibat proses penguapan dapat dideteksi secara langsung. Sinyal keluaran load cell yang masih sangat kecil diperkuat oleh modul HX711 sebelum diproses oleh ESP32. Selanjutnya, data hasil pembacaan disaring menggunakan *Median Filter* dan *Exponential Moving Average* (EMA) untuk mengurangi fluktuasi pembacaan. Data yang telah diproses kemudian dikonversi menjadi nilai evaporasi berdasarkan perubahan massa air dan disimpan ke dalam kartu MicroSD sebagai cadangan data. Pada saat yang sama, data juga dikirimkan ke server untuk disimpan dalam basis data MySQL dan ditampilkan melalui halaman web.

3.1 Akuisisi dan Pengolahan Data

Pengambilan data dilakukan secara otomatis selama periode pengamatan menggunakan RTC DS3231 sebagai acuan waktu. Sensor load cell membaca perubahan massa air secara berkala, kemudian hasil pembacaan diproses menggunakan *Median Filter* untuk menghilangkan nilai pencilan (*outlier*) yang muncul akibat gangguan sesaat. Setelah itu, data kembali diproses menggunakan metode *Exponential Moving Average* (EMA) sehingga perubahan massa yang diperoleh menjadi lebih stabil.

Perubahan massa air yang telah diperoleh digunakan untuk menghitung besarnya evaporasi. Nilai evaporasi dihitung berdasarkan selisih massa air sebelum dan sesudah proses penguapan, kemudian dikonversi menjadi satuan milimeter dengan mempertimbangkan massa jenis air dan luas penampang tabung Piche evaporimeter. Hasil perhitungan tersebut disimpan sebagai data evaporasi harian yang selanjutnya digunakan sebagai dasar estimasi evapotranspirasi referensi (ET_0).



Gambar 3. Diagram alir pengolahan data pada sistem.

3.2 Perhitungan Evaporasi dan Evapotranspirasi Referensi

Estimasi evapotranspirasi referensi (ET_0) dilakukan menggunakan pendekatan koefisien Piche. Nilai evaporasi harian hasil pengukuran dikalikan dengan koefisien Piche sehingga diperoleh nilai ET_0 . Pendekatan ini dipilih karena penelitian tidak menggunakan seluruh parameter meteorologi yang dibutuhkan oleh metode FAO Penman–Monteith, sehingga koefisien Piche menjadi alternatif yang sesuai dengan tujuan penelitian [21].

Persamaan yang digunakan dalam algoritma EMA sebelum data itu digunakan untuk menentukan nilai estimasi ET_0 ditunjukkan pada persamaan (1).

$$Y_n = (\alpha \times X_n) + ((1 - \alpha) \times Y_{n-1}) \quad (1)$$

Dimana:

Y_n = nilai EMA pada pembacaan ke-n

X_n = nilai sensor hasil *Median Filter*

Y_{n-1} = nilai EMA sebelumnya

α = faktor smoothing

Nilai parameter *smoothing* yang digunakan pada sistem ini adalah 0,05. Pemilihan nilai tersebut bertujuan menghasilkan proses penyaringan yang cukup kuat sehingga perubahan pembacaan akibat *noise* dapat diredam, namun tetap mampu mengikuti perubahan massa air yang terjadi secara bertahap selama proses evaporasi

Tahapan selanjutnya adalah proses penghitungan luas area evaporasi. Perhitungan diawali dengan mencari luas area evaporasi melalui diameter kertas saring yang sudah diketahui yaitu 3 cm.

$$A = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (2)$$

$$A = \pi \left(\frac{3}{2}\right)^2 = 7,0686 \text{ cm}^2$$

Selanjutnya akan masuk tahap perhitungan oleh sistem. Tahap pertama adalah menghitung perubahan massa dengan persamaan (3)

$$\Delta M_i = M_{\text{awal}} - M_{\text{akhir}} \quad (3)$$

Keterangan:

ΔM_i = perubahan massa pada interval ke-i (gram)

M_{awal} = massa awal interval (gram)

M_{akhir} = massa akhir interval (gram)

Massa yang telah diketahui akan dikonversi menjadi volume melalui persamaan (4)

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\rho} \quad (4)$$

Keterangan:

ΔV = volume air yang hilang (mL atau cm^3)

ρ = massa jenis air (g/mL)

Karena massa jenis air sekitar 1 g/mL maka 1 g air $\approx$ 1 mL air.

Nilai volume yang sudah diketahui akan diproses Kembali melalui persamaan (5) untuk memperoleh tinggi evaporasi.

$$E = \frac{\Delta V}{A} \quad (5)$$

Jika ΔV dalam cm^3 dan A dalam cm^2 , hasilnya adalah cm. Karena data evaporasi dilaporkan dalam mm:

$$E_{\text{mm}} = \frac{\Delta m}{\rho A} \times 10 \quad (6)$$

Faktor 10 merupakan konversi dari 1 cm = 10 mm. Persamaan perubahan massa air (gram) menjadi nilai evaporasi (mm) selanjutnya dilakukan pengolahan lebih lanjut untuk memperoleh nilai evaporasi harian dan evapotranspirasi referensi melalui persamaan (7) dan (8)

$$E_{\text{harian}} = \sum_{i=1}^5 \Delta M_i \quad (7)$$

Keterangan:

E_{harian} = Evaporasi harian

ΔM_i = Kehilangan massa air pada interval dua jam

$$ET_0 = \alpha \times \beta \times E_p \quad (8)$$

ET_0 = Evapotranspirasi referensi (mm/hari)

E_p = Evaporasi harian hasil pengukuran (mm/hari)

α = 0,27

β = 2,41

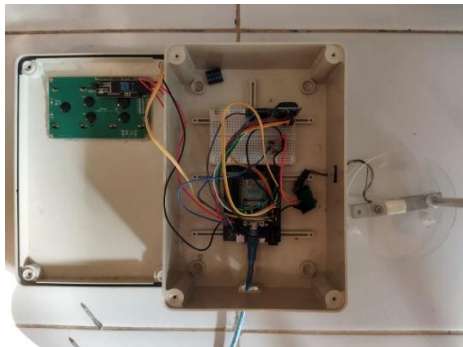
3.3 Pengujian Sistem

Pengujian dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran evaporasi dari sistem digital terhadap hasil pembacaan Piche evaporimeter secara manual. Selain itu, nilai ET_0 hasil estimasi dibandingkan dengan data ET_0 yang diperoleh dari Stasiun Klimatologi Jawa Timur sebagai data pembanding. Hasil pengujian dianalisis menggunakan parameter galat berupa *Mean Absolute Error* (MAE), *Root Mean Square Error* (RMSE), dan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) untuk mengetahui tingkat kesesuaian hasil pengukuran sistem yang dikembangkan terhadap data acuan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sistem digitalisasi Piche evaporimeter berhasil direalisasikan sesuai dengan rancangan yang telah dibuat. Sistem terdiri atas Piche evaporimeter yang dipasang pada sensor load cell sebagai pendeteksi perubahan massa air,

modul HX711 sebagai penguat sinyal, ESP32 sebagai pengendali utama, RTC DS3231 sebagai pewaktu, MicroSD sebagai media penyimpanan data, serta LCD sebagai penampil informasi lokal. Seluruh komponen bekerja secara terintegrasi sehingga proses pengukuran evaporasi dapat dilakukan secara otomatis tanpa pembacaan manual.

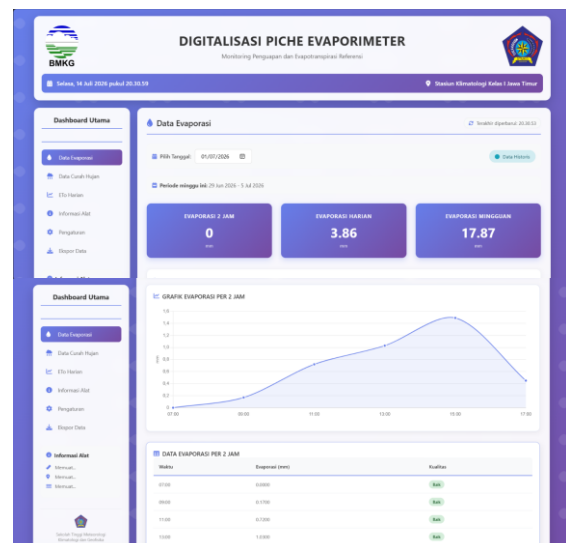


Gambar 4. Tampilan dalam logger



Gambar 5. Tampilan luar logger

Selama pengujian, perubahan massa air yang terjadi akibat proses penguapan dapat dideteksi oleh load cell dan diproses oleh ESP32. Data hasil pengukuran kemudian disimpan ke dalam MicroSD serta dikirim ke basis data MySQL untuk ditampilkan melalui antarmuka web.



Gambar 6. Tampilan website

Dashboard menyajikan informasi hasil pengukuran dalam bentuk ringkasan data, grafik, dan tabel sehingga memudahkan pengguna dalam memantau kondisi evaporasi selama periode pengamatan. Tampilan ini serupa dengan pendekatan monitoring real-time pada sistem IoT [22]. Antarmuka ini terdiri atas beberapa komponen utama, yaitu panel informasi, grafik hasil pengukuran, dan tabel riwayat data. Panel informasi pada bagian atas *dashboard* menampilkan data hasil pengukuran terbaru, meliputi nilai evaporasi pada interval pengamatan, akumulasi evaporasi harian, serta nilai estimasi evapotranspirasi referensi (ET_0).

4.1 Hasil faktor kalibrasi dan komparasi

Sebelum sistem digunakan untuk melakukan pengukuran evaporasi, sensor load cell terlebih diuji untuk memperoleh faktor kalibrasi (*calibration factor*) yang digunakan sebagai konstanta konversi dari nilai keluaran modul HX711 menjadi satuan massa (gram). Kalibrasi dilakukan dengan menggunakan sebuah benda uji yang massa referensinya telah ditentukan menggunakan timbangan analitik. Massa benda yang diperoleh dari timbangan analitik digunakan sebagai nilai acuan (*reference value*), kemudian benda yang sama ditempatkan pada dudukan load cell. Nilai faktor kalibrasi yang diperoleh kemudian dimasukkan ke dalam firmware ESP32 sebagai konstanta tetap pada proses pengukuran. Faktor kalibrasi yang diperoleh pada penelitian ini adalah $-1026,08$.



Gambar 7. Proses penentuan faktor kalibrasi

```

=====
Raw Reading ADC : -186042 | Faktor Kalibrasi Baru: -893.86
-> Pembacaan Alat Sekarang: 238.94 gram
=====
CATAT angka 'Faktor Kalibrasi Baru' di atas!
Masukkan angka tersebut ke codingan utama website/IoT Anda.
=====
Raw Reading ADC : -213561 | Faktor Kalibrasi Baru: -1026.08
-> Pembacaan Alat Sekarang: 208.13 gram
=====
CATAT angka 'Faktor Kalibrasi Baru' di atas!
Masukkan angka tersebut ke codingan utama website/IoT Anda.
=====
Raw Reading ADC : -213537 | Faktor Kalibrasi Baru: -1025.97
-> Pembacaan Alat Sekarang: 208.08 gram
=====
CATAT angka 'Faktor Kalibrasi Baru' di atas!
Masukkan angka tersebut ke codingan utama website/IoT Anda.

```

Gambar 8. Hasil faktor kalibrasi

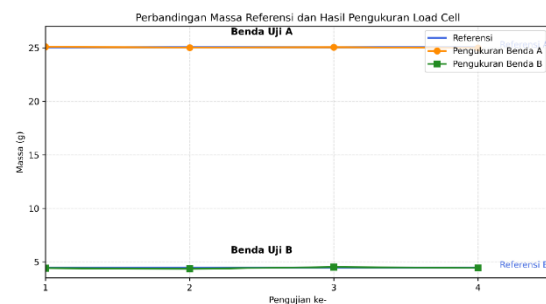
Selanjutnya masuk pada tahap komparasi. Pengujian komparasi dilakukan dengan tujuan untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian hasil pengukuran massa yang diperoleh dari load cell terhadap nilai massa yang ditunjukkan oleh timbangan analitik.. Pengujian dilakukan dengan menyiapkan sejumlah beban uji yang sama untuk diukur menggunakan dua instrumen, yaitu timbangan analitik sebagai alat referensi dan sensor load cell sebagai alat uji. Benda yang akan diuji adalah benda A dengan berat 25,0306 gram dan benda B dengan berat 4,4516 gram.



Gambar 9. Proses komparasi

Tabel 1. Hasil pengujian load cell

Pengujian	Benda A (g)	Benda B (g)
1	25,08	4,41
2	25,02	4,35
3	25,05	4,51
4	24,98	4,43
Error (%)	0,01	0,55



Gambar 9. Grafik pengujian load cell

4.2 Hasil pengukuran evaporasi

Pengambilan data evaporasi dilakukan menggunakan sistem digitalisasi Piche evaporimeter yang telah melalui tahap pengujian. Sensor load cell melakukan pembacaan massa air secara otomatis setiap 10 detik, kemudian data diproses menggunakan *Median Filter* untuk menghilangkan *spike noise* dan *Exponential Moving Average (EMA)* untuk mengurangi fluktuasi sinyal. Data hasil penyaringan selanjutnya digunakan untuk menghitung perubahan massa air pada setiap interval dua jam, kemudian diakumulasikan menjadi nilai evaporasi harian yang digunakan

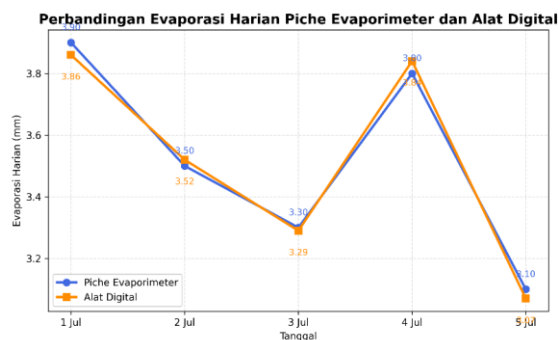
sebagai dasar perhitungan evapotranspirasi referensi (ET_0).



Gambar 10. Pengambilan data

Tabel 2. Perbandingan data manual dengan data digital

Tanggal	Evaporasi harian (mm)	
	Piche evaporimeter	Alat digital
2026-07-01	3,9	3,86
2026-07-02	3,5	3,52
2026-07-03	3,3	3,29
2026-07-04	3,8	3,84
2026-07-05	3,1	3,07



Gambar 11. Grafik perbandingan evaporasi data manual dengan data digital

Berdasarkan Tabel 2 dan Gambar 11, hasil pengukuran evaporasi menggunakan sistem digital menunjukkan pola yang sejalan dengan hasil pengamatan Piche evaporimeter manual BMKG selama periode 1–5 Juli 2026. Selisih pengukuran pada setiap hari relatif kecil, yang menunjukkan bahwa sistem mampu merepresentasikan hasil pengamatan manual dengan tingkat kesesuaian yang baik. Nilai evaporasi harian juga mengalami fluktuasi, dengan nilai tertinggi terjadi pada 1 Juli dan 4

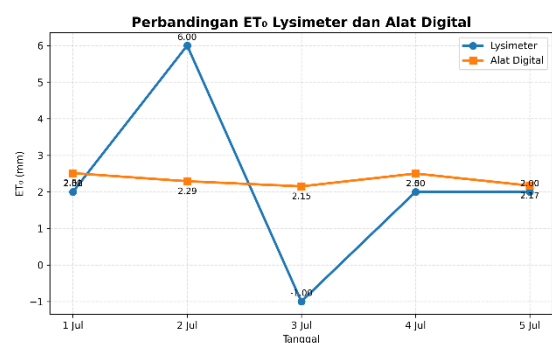
Juli, sedangkan nilai terendah tercatat pada 5 Juli. Perubahan tersebut menunjukkan bahwa laju evaporasi dipengaruhi oleh kondisi atmosfer yang berubah selama periode pengamatan. Secara keseluruhan, rata-rata evaporasi harian yang dihasilkan sistem digital sama dengan hasil pengamatan manual, sehingga menunjukkan bahwa sistem digitalisasi Piche evaporimeter mampu menghasilkan data evaporasi yang konsisten dan layak digunakan sebagai dasar perhitungan evapotranspirasi referensi (ET_0)

4.3 Hasil estimasi ET_0

Nilai evapotranspirasi referensi (ET_0) yang dihasilkan sistem digital dibandingkan dengan data hasil pengamatan lysimeter berumput di Stasiun Klimatologi Jawa Timur sebagai data pembanding. Pemilihan lysimeter berumput didasarkan pada karakteristik permukaan pengukurannya yang menggunakan vegetasi rumput pendek sehingga mendekati konsep *reference crop* sebagaimana dijelaskan dalam FAO-56 [14].

Tabel 3. Perbandingan data manual dengan data digital

Tanggal	ET_0 (mm)	
	Lysimeter (tanah berumput)	Alat digital
2026-07-01	2,00	2,51
2026-07-02	6,00	2,29
2026-07-03	-1,00	2,14
2026-07-04	2,00	2,50
2026-07-05	2,00	2,17



Gambar 12. Grafik perbandingan evapotranspirasi data manual dengan data digital

Berdasarkan Tabel 3 dan Gambar 9, nilai ETo yang dihasilkan sistem digital berada pada kisaran 2,15–2,51 mm/hari. Secara umum, pola perubahan ETo hasil sistem mengikuti kecenderungan data pembandingan pada sebagian besar periode pengamatan, meskipun terdapat perbedaan nilai pada beberapa hari. Perbedaan tersebut disebabkan oleh perbedaan prinsip pengukuran antara kedua metode. Pada penelitian ini, ETo diperoleh melalui konversi data evaporasi Piche menggunakan persamaan empiris, sedangkan lysimeter mengukur perubahan neraca air pada media vegetasi. Oleh karena itu, perbedaan nilai yang muncul tidak dapat diartikan sebagai kesalahan sistem, melainkan merupakan konsekuensi dari karakteristik masing-masing metode pengukuran.

Estimasi ETo pada sistem dihitung menggunakan persamaan konversi empiris dengan koefisien $\alpha = 0,27$ dan $\beta = 2,41$ sehingga menghasilkan faktor konversi sebesar 0,6507. Faktor tersebut menyebabkan nilai ETo yang dihasilkan sistem lebih kecil dibandingkan nilai evaporasi hariannya. Meskipun demikian, sistem telah mampu menghitung ETo secara otomatis berdasarkan data evaporasi hasil pengukuran sensor load cell. Hasil ini sejalan dengan penelitian Owusu-Sekyere *et al.* [17] yang menyatakan bahwa evaporimeter dapat digunakan sebagai metode empiris untuk mengestimasi evapotranspirasi referensi, dengan tingkat akurasi yang dipengaruhi oleh kondisi iklim dan persamaan konversi yang digunakan.

4.4 Evaluasi kinerja sistem

Untuk mengevaluasi kinerja sistem digitalisasi Piche evaporimeter yang dikembangkan, dilakukan analisis menggunakan parameter *Mean Absolute Error* (MAE), *Root Mean Square Error* (RMSE), dan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE). Ketiga parameter tersebut digunakan untuk menilai tingkat kesesuaian hasil pengukuran evaporasi yang diperoleh sistem digital terhadap hasil pengamatan Piche evaporimeter manual sebagai data acuan. Nilai MAE menunjukkan rata-rata selisih absolut antara hasil pengukuran sistem dan data acuan, RMSE menggambarkan besarnya penyimpangan hasil pengukuran dengan mempertimbangkan pengaruh galat yang besar, sedangkan MAPE

menunjukkan tingkat kesalahan relatif dalam bentuk persentase. Persamaan yang digunakan untuk menghitung MAE, RMSE, dan MAPE ditunjukkan pada Persamaan (4)–(6)..

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (4)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (5)$$

$$\text{MAPE} = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \quad (6)$$

Dimana :

y_i : nilai evaporasi hasil pengamatan manual

$\hat{y}_i$: nilai evaporasi hasil sistem digital

n : jumlah data

Tabel 4. Hasil evaluasi kinerja sistem menggunakan MAE, RMSE, dan MAPE.

Parameter	Nilai
MAE	0,028 mm
RMSE	0,030 mm
MAPE	0,784 %

Berdasarkan hasil evaluasi pada Tabel 4, diperoleh nilai MAE sebesar 0,028 mm, RMSE sebesar 0,030 mm, dan MAPE sebesar 0,784%. Nilai MAE yang relatif kecil menunjukkan bahwa rata-rata selisih absolut antara hasil pengukuran sistem digital dan Piche evaporimeter manual hanya sebesar 0,028 mm. Selanjutnya, nilai RMSE yang hanya sedikit lebih besar dibandingkan MAE mengindikasikan bahwa selama periode pengamatan tidak terdapat penyimpangan yang besar (*outlier*), sehingga hasil pengukuran sistem dapat dikatakan stabil dan konsisten. Selain itu, nilai MAPE yang berada di bawah 1% menunjukkan bahwa tingkat kesalahan relatif sistem sangat rendah terhadap data acuan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem digitalisasi Piche evaporimeter memiliki tingkat kesesuaian yang sangat baik terhadap metode pengamatan manual sehingga mampu menghasilkan data evaporasi yang layak digunakan sebagai dasar perhitungan evapotranspirasi referensi (ETo).

5. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan sistem digitalisasi Piche evaporimeter berbasis sensor load cell untuk mengukur evaporasi secara otomatis dan mengestimasi nilai evapotranspirasi referensi (ET₀) menggunakan pendekatan koefisien Piche. Sistem yang dikembangkan mampu mengakuisisi data secara otomatis, melakukan penyaringan sinyal menggunakan *Median Filter* dan *Exponential Moving Average* (EMA), serta menyimpan dan menampilkan hasil pengukuran melalui antarmuka web. Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai evaporasi yang dihasilkan sistem memiliki tingkat kesesuaian yang baik dengan hasil pengamatan Piche evaporimeter manual BMKG. Hal ini menunjukkan bahwa sistem mampu mendukung proses digitalisasi pengamatan evaporasi sekaligus menyediakan data yang dapat digunakan sebagai dasar estimasi evapotranspirasi referensi (ET₀). Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Sistem digitalisasi Piche evaporimeter berbasis sensor load cell berhasil dikembangkan dan mampu melakukan pengukuran evaporasi secara otomatis.
2. Penerapan *Median Filter* dan *Exponential Moving Average* (EMA) mampu menghasilkan data pengukuran yang lebih stabil sehingga dapat digunakan untuk perhitungan evaporasi harian.
3. Hasil pengukuran evaporasi sistem digital memiliki tingkat kesesuaian yang baik terhadap hasil pengamatan Piche evaporimeter manual BMKG, dengan nilai MAE sebesar 0,028 mm, RMSE sebesar 0,030 mm, dan MAPE sebesar 0,784%.
4. Sistem mampu menghitung nilai evapotranspirasi referensi (ET₀) secara otomatis menggunakan pendekatan koefisien Piche serta menyajikan hasil pengukuran melalui antarmuka web.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak terkait yang telah memberi dukungan terhadap penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. S. Siregar, B. Oktaviana Sembiring, E. Rahayu, H. Hasdiana, and R. Franchitika, "Pemanfaatan Aplikasi MySQL untuk Membantu Siswa SMK Swasta Nur Azizi dalam Pengolahan Data," *J. Pengabd. Masy.*, vol. 3, no. 2, pp. 229–240, 2024, doi: 10.70340/japamas.v3i2.185.
- [2] T. K. Manik, R. B. Rosadi, and A. Karyanto, "Evaluasi Metode Penman-Monteith dalam Menduga Laju Evapotranspirasi Standar (ET₀) di Dataran Rendah Propinsi Lampung, Indonesia Evaluation of Penman-Monteith Method in Estimating Standard Evapotranspiration (ET₀) in Lowland Area of Lampung Province, I," *J. Keteknikan Pertan.*, vol. 26, no. 2, pp. 121–128, 2012.
- [3] S. W. Smith, *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*, 2nd ed. San Diego, CA: California Technical Publishing, 1997.
- [4] D. L. Koc, "Assessment of pan coefficient models for the estimation of the reference evapotranspiration in a Mediterranean environment in Turkey," *PeerJ*, vol. 10, 2022, doi: 10.7717/peerj.13554.
- [5] A. Laaboudi and A. Slama, "Potential evapotranspiration estimation from Piche evaporimeter measurements based on adaptive neuro-fuzzy inference system technique," *Ponte*, vol. 75, no. 2, pp. 92–107, 2019, doi: 0.21506/j.ponte.2019.10.14.
- [6] H. Dhean, "Automatic Smart Water Control (Auswaco) Menggunakan Logika Fuzzy Berbasis Internet Of Things," *Jma.*, vol. 3, no. 7, pp. 3031–5220, 2025.
- [7] A. Wilnaldo, Y. S. Putra, and R. Adriat, "Perbandingan Metode Perhitungan Evapotranspirasi Potensial di Paloh Kabupaten Sambas Kalimantan Barat," *Prism. Fis.*, vol. 8, no. 3, p. 165, 2020, doi: 10.26418/pf.v8i3.43618.
- [8] A. F. G. Jacobs and E. E. L. Arriëns- Bekker, "Evaporation data from a Piche evaporimeter," *J. Hydrol.*, vol. 60, no. 1–4, pp. 367–380, 1983, doi: 10.1016/0022-1694(83)90032-X.
- [9] B. Nugroho, R. -, and R. Kristiyono, "Aplikasi Esp8266 Sebagai Pengendali Smart Room," *Teknika*, vol. 8, no. 1, pp. 55–64, 2023, doi: 10.52561/teknika.v8i1.248.
- [10] K. L. Toruan and V. Satya Prayoga, "Digitalisasi Piche Evaporimeter," *J. Instrumentasi Dan Teknol. Kebumian*, vol. vol 1, no, pp. 1–18, 2022, [Online]. Available: <https://stmkg.balai2bmkg.id/index.php/jitb/article/view/1>
- [11] M. D. Religi, N. N. Z. Cholidah, R. R. A. Sari, V. Azizah, F. Masitoh, and F. S. Yuliano,

- “Analisis evapotranspirasi pada Waduk Bening di SubDAS Brantas Muhammad,” *Geomedia*, vol. 21, no. 1, pp. 10–18, 2023.
- [12] BMKG, “Peraturan Kepala Badan Meteorologi Dan Geofisika Tentang Tata Cara Tetap Pelaksanaan Pengamatan Dan Pelaporan Data Iklim Dan Agroklimat,” no. 2, pp. i3–i5, 2006, [Online]. Available: www.bmg.go.id
- [13] N. E. Onwuegbunam, D. O. Onwuegbunam, and A. Dare, “Estimation and comparison of reference evapotranspiration within Kaduna Central District, Nigeria, using four different methods,” *Niger. J. Technol.*, vol. 39, no. 1, pp. 306–314, 2020, doi: 10.4314/njt.v39i1.34.
- [14] R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements—FAO Irrigation and Drainage Paper 56*. Rome, Italy: FAO, 1998. [Online]. Available: <http://www.kimberly.uidaho.edu/water/fao56/fao56.pdf>
- [15] A. Salsabila and I. L. Nugraheni, “Annisa salsabila irma lusi nugraheni,” *Pengantar Hidrol.*, p. 134, 2020, [Online]. Available: <http://repository.lppm.unila.ac.id/26780/1/PE-NGANTAR-HIDROLOGI.pdf>
- [16] J. Tanny, “Evapotranspiration Measurements and Modeling,” *Water (Switzerland)*, vol. 14, no. 16, pp. 16–18, 2022, doi: 10.3390/w14162474.
- [17] J. D. Owusu-sekyere, E. A. Ampofo, and O. Asamoah, “Comparison of five different methods in estimating reference evapotranspiration in Cape Coast , Ghana,” vol. 12, no. 40, pp. 2976–2985, 2017, doi: 10.5897/AJAR2017.12594.
- [18] U. Mahanin Tyas, A. Apri Buckhari, P. Studi Pendidikan Teknologi Informasi, and P. Studi Pendidikan Teknologi dan Kejuruan, “Implementasi Aplikasi Arduino IDE Pada matakuliah Digit,” vol. 1, no. 1, 2023, [Online]. Available: <https://jurnal-fkip-uim.ac.id/index.php/teknos/article/download/40/42>
- [19] World Meteorological Organization, *Guide to Instruments and Methods of Observation, Volume III: Observing Systems*, WMO-No. 8. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2023
- [20] M. Casanova, I. Messing, A. Joel, and A. Cañete, “Methods to estimate lettuce evapotranspiration in greenhouse conditions in the central zone of Chile,” *Chilean J. Agric. Res.*, vol. 69, no. 1, pp. 60–70, 2009.
- [21] W. O. D. M. Ella, F. Biabdillah, A. Wajiansyah, and A. Mulia, “SMARTSOIL: Sistem Monitoring Kelembaban Tanah Berbasis Internet of Things (IoT) Menggunakan ESP32 dan Sensor Soil Moisture,” *J. Inform. dan Tek. Elektro Terapan*, vol. 14, no. 1, 2026, doi: 10.23960/jitet.v14i1.8788