PERANCANGAN SISTEM INSTRUMENTASI PENGUKURAN TINGKAT PENGUAPAN MENGGUNAKAN SENSOR *LOADCELL* BERBASIS *INTERNET OF THINGS*

Adharullah[*1,2], Elin Yusibani[2]
[1]Stasiun Meteorologi Kelas I Sultan Iskandar Muda, BMKG, Banda Aceh Indonesia
[2]Magister Fisika, Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Syiah Kuala
(Received: Juli 2026 / Revised: September 2026 / Accepted: Oktober 2026)
[*]Email: adharullah@bmkg.go.id

ABSTRAK

Penguapan merupakan parameter klimatologi penting untuk analisis irigasi dan bendungan. Saat ini, evaporimeter di Unit Pelaksana Teknis Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (MKG) mayoritas masih berupa alat analog yang memerlukan pembacaan manual. Penelitian ini bertujuan merancang sistem otomatisasi pengukuran penguapan menggunakan sensor *loadcell* SEN-10245 berbasis mikrokontroler ATmega328. Sistem ini mengukur berat air dalam panci evaporasi secara kontinu kemudian diolah dan dikirimkan ke platform ThingSpeak melalui modul WiFi ESP8266. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem dapat memonitoring nilai penguapan harian dan menampilkannya pada antarmuka web, sehingga mempermudah pengamat dalam memperoleh data secara *real-time*.
Kata Kunci: *Evaporimeter, Loadcell, ATmega328, IoT, ThingSpeak.*

1. PENDAHULUAN

Penguapan (*evaporation*) adalah proses perubahan molekul air dari bentuk cair menjadi gas akibat perbedaan tekanan uap antara permukaan air dan udara di atasnya. Faktor-faktor seperti radiasi matahari, suhu, kelembapan, dan kecepatan angin sangat mempengaruhi proses ini. Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) bertanggung jawab dalam pengamatan parameter ini untuk kebutuhan analisis irigasi dan manajemen sumber daya air. Saat ini, peralatan operasional di BMKG sedang bertransformasi dari sistem analog ke digital sesuai dengan standar WMO [1,2]. Namun, sebagian besar evaporimeter yang digunakan masih bertipe analog (Panci Kelas A) yang memiliki risiko kesalahan manusia (*human error*) dalam pembacaan manual menggunakan *hook gauge*. Permasalahan utama pada pengukuran evaporasi secara konvensional tidak hanya berkaitan dengan proses pembacaan secara manual, tetapi juga dengan keterbatasan dalam memperoleh data secara kontinu dan terdokumentasi. Pembacaan menggunakan hook gauge dilakukan pada waktu tertentu oleh pengamat, sehingga perubahan tinggi muka air yang terjadi di antara waktu pengamatan tidak dapat direkam secara langsung. Selain itu, proses pencatatan manual dapat menyebabkan keterlambatan dalam pengolahan data dan meningkatkan kemungkinan terjadinya kesalahan pencatatan. Pedoman pengamatan meteorologi menempatkan pengukuran evaporasi sebagai salah satu pengamatan penting, sedangkan laju evaporasi dipengaruhi oleh kondisi atmosfer dan lingkungan [6], [7].

Penggunaan sensor elektronik dalam sistem pengukuran evaporasi dapat menjadi salah satu pendekatan untuk mengatasi keterbatasan tersebut. Sensor loadcell memiliki kemampuan untuk mendeteksi perubahan gaya atau massa secara elektrik sehingga perubahan massa air pada panci dapat direkam secara berkala. Data tersebut selanjutnya dapat diproses oleh mikrokontroler dan dikonversi menjadi tinggi penguapan berdasarkan hubungan antara massa, massa jenis air, dan luas permukaan panci evaporasi. Pengembangan sistem pengukuran evaporasi otomatis menggunakan load cell juga telah dilaporkan dalam penelitian terdahulu, termasuk sistem panci evaporasi otomatis yang dievaluasi terhadap metode konvensional [8], [9].

Integrasi sistem instrumentasi dengan teknologi Internet of Things memberikan fungsi tambahan berupa pengiriman dan visualisasi data secara jarak jauh. Pada penelitian ini, data pengukuran yang diperoleh dari loadcell diproses oleh mikrokontroler ATmega328 dan dikirimkan menggunakan ESP8266 menuju platform ThingSpeak. Pendekatan tersebut diharapkan dapat menghasilkan sistem pengukuran evaporasi yang lebih praktis, terdokumentasi, dan dapat dipantau secara jarak jauh dibandingkan pengamatan yang sepenuhnya dilakukan secara manual. Selain itu, hujan lebat seringkali mengganggu validitas data karena risiko luapan air pada panci. Oleh karena itu, diperlukan sistem yang mampu mengukur penguapan secara otomatis dan dapat dipantau dari jarak jauh melalui jaringan internet. Pengiriman data melalui platform IoT memungkinkan data sensor disimpan dan diakses melalui kanal daring menggunakan antarmuka komunikasi yang tersedia [17].

Telah dilakukan penelitian sebuah perancangan sebuah sistem alat pengukur yang mampu melakukan proses penimbangan gula dengan cepat dan presisi menggunakan sensor loadcell berbasis mikrokontroler ATMEGA16 [3]. Penelitian lain membahas perancangan, mambangun dan menguji Wireless Sensor Network menggunakan ESP8266 untuk mengukur, mencatat dan menampilkan data melalui halaman web. Perancangan perangkat keras terdiri dari rangkaian modul ESP8266 berfungsi sebagai pemancar sinyal Wi-Fi menggunakan catu daya 3,3 Volt, rangkaian sensor DS18B20 sebagai pembaca suhu ruangan menggunakan catu daya 5 Volt, yang diperoleh dari port Arduino Uno, dan

Arduino Uno bertindak sebagai otak pengontrol kerja sistem menggunakan catu daya 9-12 Volt. Perancangan perangkat lunak yang digunakan sebuah server yang terdiri dari Apache, MySQL dan PHP [4]. Penelitian serupa telah dilakukan untuk menganalisis pengukuaran penguapan pada panci penguapan kelas A yang digunakan BMKG seluruh indonesia [5]. Berdasarkan latar belakang diatas, maka penelitian ini akan memaparkan integrasi sensor loadcell untuk menghitung nilai pengupan berbasis *internet of thing*. Penelitian terkait timbangan digital berbasis load cell dan IoT menunjukkan pentingnya pengujian respons sensor, kalibrasi, serta pencatatan data digital [10], [11].

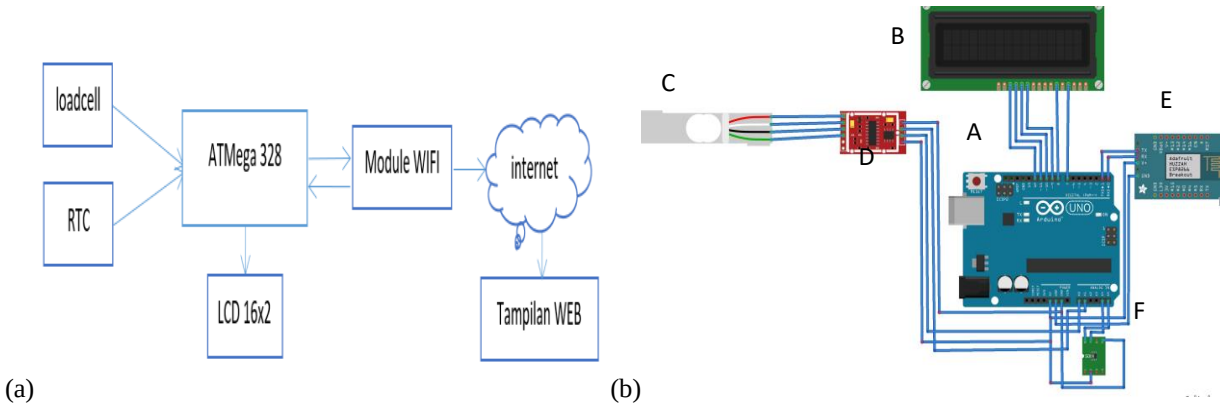
2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode rancang bangun perangkat keras dan perangkat lunak untuk menciptakan sistem pengukuran tingkat penguapan pada panci evaporasi secara otomatis. Tahapan dimulai dengan perancangan sistem mekanik dan elektronik menggunakan sensor loadcell tipe SEN-10245 berkapasitas 50 kg sebagai instrumen utama untuk mendeteksi perubahan berat air. Sensor ini dihubungkan dengan modul ADC HX711 yang berfungsi memperkuat sinyal analog dari sensor sebelum diproses oleh mikrokontroler Arduino Uno ATmega328. Secara umum, proses pengukuran dimulai ketika sensor loadcell menerima beban dari panci evaporasi beserta air yang berada di dalamnya. Perubahan beban akibat berkurangnya massa air akan menghasilkan perubahan sinyal listrik pada loadcell. Karena sinyal keluaran sensor relatif kecil, sinyal tersebut dibaca menggunakan modul HX711 yang berfungsi sebagai penguat sekaligus analog-to-digital converter. Data digital dari HX711 selanjutnya diproses oleh Arduino Uno ATmega328 untuk memperoleh nilai massa berdasarkan faktor kalibrasi sensor. Arduino Uno R3 menggunakan mikrokontroler ATmega328P, sedangkan HX711 merupakan konverter analog-ke-digital yang dirancang untuk aplikasi penimbangan berbasis load cell [15], [18].

Nilai massa yang diperoleh dibandingkan antara waktu pengukuran awal dan waktu pengukuran berikutnya. Selisih massa digunakan sebagai indikator perubahan jumlah air di dalam panci. Dengan asumsi bahwa kehilangan massa terutama berasal dari proses evaporasi, perubahan massa tersebut dapat dikonversi menjadi volume air yang hilang menggunakan massa jenis air. Volume air yang hilang kemudian dibagi dengan luas permukaan panci evaporasi untuk mendapatkan tinggi penguapan ekuivalen. Pendekatan ini sesuai dengan prinsip pengukuran evaporasi menggunakan panci, yaitu perubahan jumlah air dikonversi menjadi kedalaman air ekuivalen berdasarkan luas permukaan panci [6]–[8].

RTC DS3231 digunakan sebagai penanda waktu sehingga setiap data pengukuran dapat dikaitkan dengan waktu tertentu. Selanjutnya, data hasil pengolahan dikirimkan melalui ESP8266 menggunakan jaringan Wi-Fi menuju platform ThingSpeak. Data yang telah diterima oleh ThingSpeak ditampilkan dalam bentuk grafik sehingga perubahan massa dan nilai penguapan dapat dipantau secara berkala melalui jaringan internet. Selain itu, sistem dilengkapi dengan RTC DS3231 sebagai penanda waktu presisi agar data penguapan dapat dicatat secara *real-time*. Blok diagram penelitian ini terlihat pada Gambar 1(a) dan rangkaian instrumentasi terlihat pada Gambar 1(b). Dokumentasi ThingSpeak menjelaskan bahwa data kanal dapat dikirim melalui REST API atau MQTT dan disimpan sebagai data bertanda waktu [17].

Dari sisi perangkat lunak, pengembangan dilakukan menggunakan Arduino IDE untuk mengatur logika pemrograman alat dan perhitungan konversi berat menjadi satuan milimeter penguapan. Integrasi teknologi *Internet of Things* (IoT) diterapkan dengan menggunakan modul WiFi ESP8266 yang bertugas mengirimkan data hasil pengukuran ke platform ThingSpeak. Hal ini memungkinkan data penguapan tidak hanya ditampilkan pada LCD 16x2 di lokasi alat, tetapi juga dapat dimonitor secara jarak jauh melalui antarmuka web. Keseluruhan metode ini bertujuan untuk menghasilkan sistem pengamatan klimatologi yang lebih efisien dibandingkan metode manual. Spesifikasi dan batasan komunikasi perangkat perlu mengacu pada dokumentasi resmi mikrokontroler dan modul Wi-Fi yang digunakan [16], [18].



Gambar 1. (a) Blok diagram instrumentasi (b) rangkaian instrumentasi (keterangan (A) Arduino Uno, (B) LCD 16x2, (C) sensor Load Cell, (D) I2C, (E) modul wifi ESP8266 (F) HX711)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sistem yang dirancang bekerja dengan menimbang berat total panci berisi air. Nilai penguapan didapatkan dari selisih berat awal dan berat akhir dalam kurun waktu tertentu setelah memperhitungkan faktor eksternal. Data dari sensor diolah oleh ATmega328 dan diteruskan oleh modul ESP8266 ke jaringan WiFi network. Melalui platform ThingSpeak, data divisualisasikan dalam bentuk grafik yang dapat diakses oleh pengguna melalui alamat web https://thingspeak.com/channels/330313 secara *real-time*. Penggunaan loadcell tipe half-bridge memberikan sensitivitas sebesar 1,0±0,1 mV/V, yang cukup presisi untuk mendeteksi pengurangan massa air akibat penguapan. Proses pengujian alat terhadap alat operasional dilakukan di Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika dan pengukuran penguapan dilakukan pada pukul 10.00 WIB selama periode waktu tersebut sensor loadcell dipasang dibawah panci penguapan simetris dengan dudukannya. Alat pembanding yang digunakan untuk mengukur penguapan adalah hook gauge untuk mengukur perubahan nilai ketinggian air. Penggunaan hook gauge dalam pengujian lapangan berfungsi sebagai metode pembanding terhadap sistem pengukuran berbasis loadcell. Hook gauge mengukur perubahan tinggi muka air secara langsung, sedangkan loadcell mengukur perubahan massa total panci akibat perubahan jumlah air. Perbedaan besaran fisis yang diukur menyebabkan diperlukan proses konversi pada sistem loadcell agar perubahan massa dapat dinyatakan sebagai tinggi penguapan dalam satuan milimeter. Sistem panci evaporasi otomatis berbasis pengukuran massa telah dikembangkan sebelumnya dan dibandingkan dengan pengamatan konvensional, sehingga pendekatan ini memiliki dasar teknis untuk pemantauan evaporasi [8], [9].

Kelebihan utama sistem loadcell adalah kemampuannya melakukan pengukuran tanpa memerlukan pembacaan manual pada permukaan air. Perubahan massa dapat direkam oleh sistem secara elektronik dan dikirimkan ke platform ThingSpeak. Sebaliknya, hook gauge masih membutuhkan keterlibatan pengamat dalam menentukan posisi permukaan air. Oleh karena itu, sistem loadcell memiliki potensi untuk meningkatkan efisiensi proses akuisisi data penguapan.

Namun demikian, hasil pengukuran loadcell juga dipengaruhi oleh kondisi mekanik sistem. Distribusi beban pada panci, kestabilan dudukan, getaran, dan perubahan temperatur dapat memengaruhi pembacaan sensor. Sementara itu, pengukuran menggunakan hook gauge dapat dipengaruhi oleh riak permukaan air dan ketelitian operator. Oleh karena itu, perbandingan kedua metode perlu dilakukan pada kondisi pengamatan yang relatif sama agar perbedaan hasil dapat digunakan untuk mengevaluasi kinerja sistem secara lebih objektif. Faktor-faktor tersebut merupakan sumber potensial variasi dan ketidakpastian pengukuran; evaluasi hasil perlu mempertimbangkan karakteristik alat, standar referensi, kondisi lingkungan, serta prosedur kalibrasi [12]–[14].

Steel Well untuk menstabilkan permukaan air agar tidak timbul adanya riak-riak air yang dapat menggangu pembacaan nilai ketinggian air. Data dari hasil pengujian lapangan sensor loadcell yang ditempatkan di bawah panci penguapan. Sketsa rancangan 3D dari logger serta komponen yang ada di dalamnya, dapat dilihat pada Gambar 2. Tampilan data pengukuran tampak di platform ThingSpeak dapat dilihat pada Gambar 3(a). Pengujian Sensor loadcell dilakukan sebanyak 10 kali dengan dimulai dengan berat 1 kg sampai 10 kg dengan kenaikan sebesar 1 kg. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor loadcell memberikan respons terhadap perubahan beban pada rentang 1–10 kg. Pengujian dilakukan dengan memberikan beban secara bertahap sebesar 1 kg, 2 kg, 3 kg, hingga 10 kg. Nilai pembacaan sensor kemudian dibandingkan dengan massa referensi untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mengikuti perubahan beban.

Perbedaan antara massa referensi dan massa hasil pembacaan sensor menunjukkan adanya error pengukuran. Secara umum, error absolut dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$E_a = |M_s - M_r|$$

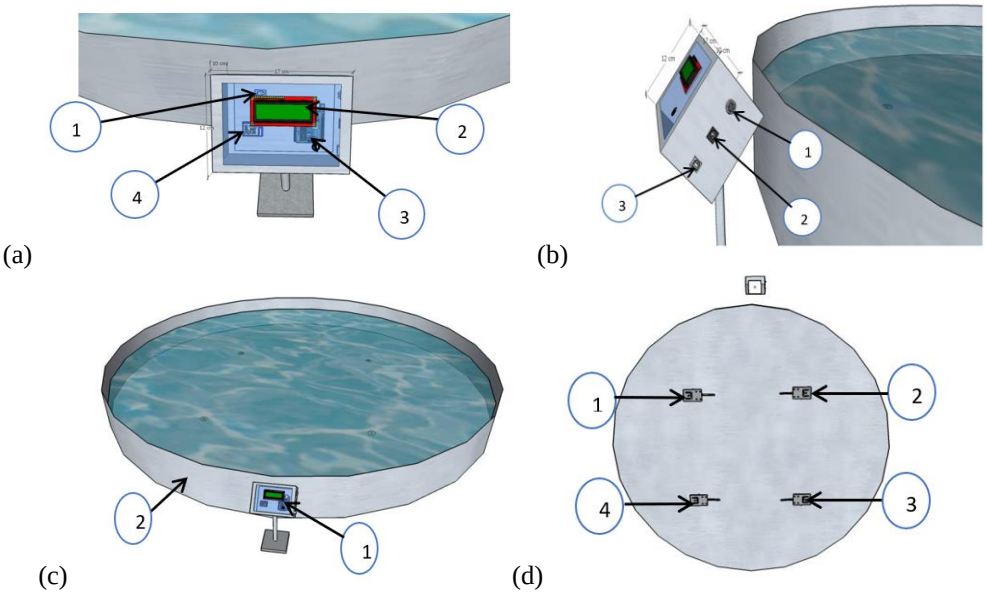
dengan (Ea) adalah error absolut, (Ms) adalah massa hasil pembacaan sensor, dan (Mr) adalah massa referensi. Persentase error dapat ditentukan menggunakan:

$$E_r = \frac{|M_s - M_r|}{M_r} \times 100\%$$

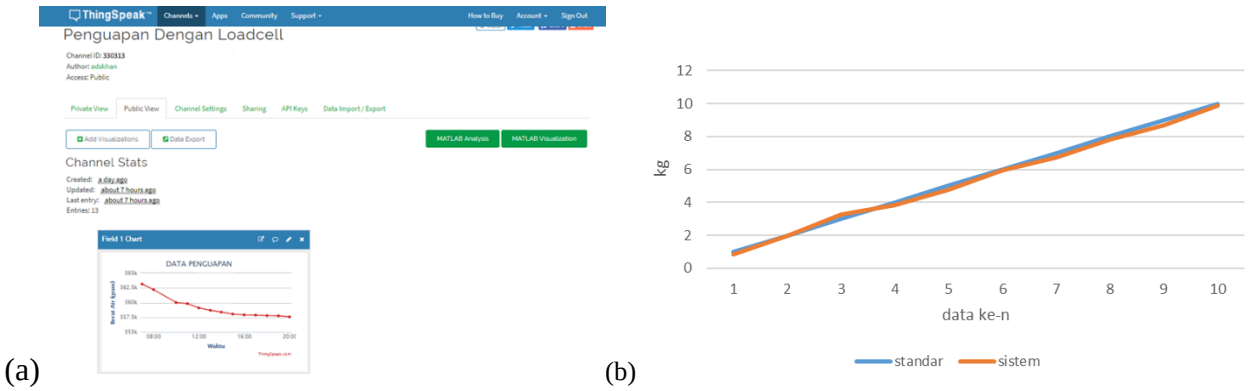
Analisis tersebut dapat digunakan untuk menentukan tingkat kesesuaian sensor terhadap alat pembanding. Berdasarkan pengujian yang dilakukan, diperoleh deviasi pengukuran sebesar 0,16 kg. Nilai ini menunjukkan bahwa masih terdapat perbedaan antara pembacaan sensor dan nilai referensi. Perbedaan tersebut dapat berasal dari karakteristik loadcell, faktor kalibrasi, kestabilan mekanik dudukan panci, serta perubahan distribusi beban pada sistem. Penilaian kesesuaian terhadap nilai referensi sebaiknya didukung oleh data kalibrasi dan evaluasi ketidakpastian, bukan hanya satu nilai deviasi [12]–[14].

Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa proses kalibrasi menjadi tahap penting sebelum sensor digunakan untuk pengukuran evaporasi di lapangan. Kalibrasi diperlukan untuk memperoleh hubungan yang lebih akurat antara keluaran digital HX711 dengan massa aktual. Dengan demikian, kesalahan pada tahap pengukuran massa dapat diminimalkan sebelum data dikonversi menjadi tinggi evaporasi. Kalibrasi membangun hubungan antara indikasi instrumen dan nilai acuan serta membantu mengidentifikasi bias dan ketidakpastian pengukuran [12]–[14].

Gambar 3(b) merupakan hasil perbandingan antara sensor loadcell dan instrumen pengukur berat badan standar. Deviasi pengukuran sebesar 0.16 kg.



Gambar 2. (a) Data logger tampak dari depan (keterangan (1) Letak RTC pada data logger, (2) Letak LCD pada data logger (3) Letak Mikrokontroler Arduino uno (4) Letak Modul Wifi ESP8266) (b) Data logger tampak dari samping (keterangan (1) Letak port Sensor Loadcell pada data logger (2) Letak port Power supply ke data logger (3) Letak port serial ke Arduino pada data logger) (c) peletakan Data logger pada panci penguapan (keterangan (1) Data logger (2) Panci penguapan) (d) peletakan Sensor Loadcell pada panci penguapan tampak bawah (keterangan (1) Sensor Loadcell 1 (2) Sensor Loadcell 2 (3) Sensor Loadcell 3 (4) Sensor Loadcell 4)



Gambar 3. (a) Tampilan data sensor pada ThingSpeak (b) Hasil pengujian sensor loadcell dengan pengukur berat badan

Perhitungan evaporasi dilakukan berdasarkan perubahan massa air yang diperoleh dari data pengukuran. Pada pukul 10.00 WIB diperoleh massa sebesar 363163 g, sedangkan pada pukul 23.00 WIB massa yang terukur sebesar 357605 g. Penggunaan panci evaporasi dan interpretasi kehilangan air perlu mempertimbangkan pedoman pengamatan evaporasi serta faktor meteorologi yang memengaruhinya [6], [7].

$$\Delta m = m_{\text{awal}} - m_{\text{akhir}}$$

Substitusi data pengukuran :

$$\Delta m = 363163 - 357605 = 5558 \text{ g}$$

Perubahan massa tersebut kemudian dikonversi menjadi volume air yang hilang menggunakan hubungan:

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\rho}$$

dengan (ΔV) adalah perubahan volume air, (Δm) adalah perubahan massa air, dan (ρ) adalah massa jenis air. Selanjutnya, tinggi penguapan dihitung dengan membagi perubahan volume terhadap luas penampang panci:

$$h = \frac{\Delta m}{\rho A}$$

Panci evaporasi yang digunakan memiliki diameter 121,9 cm. Dengan menggunakan luas penampang panci dan massa jenis air sebagaimana digunakan pada perhitungan penelitian, perubahan massa sebesar 5558 g menghasilkan tinggi air ekuivalen sebesar 0,47 cm atau 4,7 mm. Nilai tersebut menunjukkan besarnya kehilangan massa air yang direpresentasikan sebagai tinggi air selama periode pengamatan. Konversi massa menjadi kedalaman air merupakan hasil model pengukuran tidak langsung; asumsi massa jenis air dan luas penampang harus dinyatakan agar hasil dapat ditelusuri [7], [13].

Hasil ini menunjukkan bahwa sensor loadcell dapat digunakan untuk mendeteksi perubahan massa air pada panci evaporasi. Meskipun demikian, perubahan massa yang terukur perlu diinterpretasikan dengan memperhatikan kondisi lingkungan selama periode pengamatan. Apabila terjadi hujan, percikan air, atau perubahan kondisi mekanik pada sistem, perubahan massa yang terbaca loadcell tidak seluruhnya dapat dianggap sebagai akibat proses evaporasi. Oleh sebab itu, pengujian dalam periode yang lebih panjang dengan pencatatan parameter meteorologi diperlukan untuk memperoleh evaluasi kinerja yang lebih komprehensif. Hujan dan kondisi lingkungan dapat memengaruhi hasil pengukuran panci, sedangkan penelitian sistem otomatis terdahulu juga melaporkan perlunya memperhatikan kondisi panci dan karakteristik sistem saat membandingkan hasil dengan metode manual [8], [9].

Selisih berat untuk data penguapan diambil dari data berat pada pukul 10.00 yaitu sebesar 363163 g dikurang dengan data berat pada pukul 23.00 yaitu sebesar 357605 g. Selisih yang diperoleh adalah 5558 g, sehingga didapat ketinggian penguapan adalah 5558/11683,94 yaitu sebesar 0.47 cm atau sebesar 4.7 mm.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan dan pengujian, sistem instrumentasi pengukuran evaporasi berbasis Internet of Things menggunakan sensor loadcell telah berhasil dikembangkan. Sistem terdiri atas sensor loadcell, HX711, Arduino Uno ATmega328, RTC DS3231, ESP8266, dan platform ThingSpeak. Sistem mampu mendeteksi perubahan massa air pada panci evaporasi, mengolah data hasil pengukuran, serta mengirimkan data untuk ditampilkan secara daring sehingga proses monitoring dapat dilakukan secara lebih praktis dibandingkan pembacaan manual.

Pengujian sensor loadcell dilakukan menggunakan variasi pembebanan 1–10 kg dengan kenaikan 1 kg. Hasil pengujian menunjukkan adanya deviasi pengukuran sebesar 0,16 kg. Data perubahan massa kemudian digunakan untuk menghitung tinggi penguapan berdasarkan massa jenis air dan luas penampang panci. Pada contoh pengukuran, perubahan massa sebesar 5558 g menghasilkan tinggi penguapan ekuivalen sebesar 0,47 cm atau 4,7 mm.

Meskipun sistem telah mampu melakukan pengukuran dan monitoring secara daring, beberapa faktor masih perlu diperhatikan, terutama kestabilan mekanik, karakteristik sensor, presipitasi, percikan air, dan kondisi lingkungan selama pengamatan. Penelitian selanjutnya disarankan melakukan kalibrasi yang lebih komprehensif, pengujian dalam periode pengamatan yang lebih panjang, serta integrasi sensor parameter meteorologi untuk meningkatkan akurasi dan interpretasi pengukuran evaporasi.

5. DAFTAR PUSTAKA

1. Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 31 Tahun 2009 tentang Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika, Jakarta, Indonesia, 2009.
2. Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika, *Peraturan Kepala Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika Nomor 7 Tahun 2014 tentang Standar Teknis dan Operasional Pemeliharaan Peralatan Pengamatan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika*, Jakarta, Indonesia, 2014.
3. R.Alvian, " Prototipe Penimbang Gula Otomatis Menggunakan Sensor Berat Berbasis ATMEGA16," 2014,
4. M.U. Mustafa, "Monitoring Suhu Ruangan Melalui Jaringan Wi-Fi Dengan ESP8266 Berbasis Arduino" 2015
5. W. Trinah dan Fatkhuroyan, "Evaluasi Tiga Model Pendugaan Evaporasi Panci (Epan) DiWilayah Bali," 2017.
6. World Meteorological Organization (WMO), Guide to Instruments and Methods of Observation (WMO-No. 8), Volume I, Chapter 10: Measurement of Evaporation. Geneva: WMO, edisi 2018/2021. Tersedia: https://community.wmo.int/site/knowledge-hub/programmes-and-initiatives/instruments-and-methods-of-observation-programme-imop/guide-instruments-and-methods-observation-wmo-no-8
7. R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes, dan M. Smith, Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: FAO, 1998. https://www.fao.org/4/x0490e/x0490e00.htm
8. T. L. Chow, "Design and Performance of a Fully Automated Evaporation Pan," Agricultural and Forest Meteorology, vol. 68, pp. 187–200, 1994. https://doi.org/10.1016/0168-1923(94)90035-3
9. M. da S. Amorim Neto dan N. A. Villa Nova, "A New Evaporation Measurement System for the Class 'A' Pan," Pesquisa Agropecuaria Brasileira, vol. 18, no. 7, pp. 695–702, 1983. https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab1983.v18.15344

10. C. Habiba dan A. Prayogo, "Characterizing Positional Sensitivity of Low-Cost Load Cells for IoT-Based Weighing Systems," Internet of Things and Artificial Intelligence Journal, vol. 5, no. 3, 2025. https://doi.org/10.31763/iota.v5i3.1002
11. B. Y. W. Pradita, A. B. P. Bayu, dan H. Haryono, "Design and Build Mini Digital Scale using Internet of Things," Sinkron: Jurnal dan Penelitian Teknik Informatika, vol. 7, no. 2, 2022. https://doi.org/10.33395/sinkron.v7i2.11345
12. S. D. Phillips, W. T. Estler, T. D. Doiron, K. Eberhardt, dan M. Levenson, "A Careful Consideration of the Calibration Concept," Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, vol. 106, no. 2, 2001. https://www.nist.gov/publications/careful-consideration-calibration-concept-0
13. Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), Evaluation of Measurement Data—Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, JCGM 100:2008. https://doi.org/10.59161/JCGM100-2008E
14. C. M. Croarkin, NIST/SEMATECH Engineering Statistics Handbook, Chapter 2: Measurement Process Characterization. Gaithersburg, MD: NIST/SEMATECH, 2003. https://www.nist.gov/publications/nistsematech-engineering-statistics-handbook-chapter-2-measurement-process
15. Avia Semiconductor, "HX711: 24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales," datasheet. (Gunakan revisi/tahun yang sesuai dengan datasheet modul yang digunakan.)
16. Espressif Systems, ESP8266EX Datasheet. Espressif Systems. Tersedia: https://espressif.com/en/support/download/documents
17. MathWorks, "ThingSpeak REST API" dan "Write Data to Channel," dokumentasi daring. Tersedia: https://www.mathworks.com/help/thingspeak/rest-api.html dan https://www.mathworks.com/help/thingspeak/write-data.html
18. Arduino, "Arduino UNO R3—Documentation and Datasheet," dokumentasi resmi Arduino. Tersedia: https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3/