

Pengembangan Alat Perekam Intensitas Penyinaran Matahari Berbasis *IoT* dengan *Data Logging* Evaporasi Waduk Jatiluhur

Development Of An IoT Based Solar Radiation Intensity Recording Device with Evaporation Data Logging From Jatiluhur Reservoir

Minarto Minarto^{1*}, Dayan Singasatia², Sri Suhartini³, Irfan Zulkarnaen⁴

Program Studi Teknik Informatika, Sekolah Tinggi Teknologi Wastukencana, Indonesia^{1,2,4}

Program Studi Manajemen Industri, Sekolah Tinggi Teknologi Wastukencana, Indonesia³

minarto@wastukencana.ac.id¹, dayan@wastukencana.ac.id², sri@wastukencana.ac.id³,

irfanzulkarnaen02@wastukencana.ac.id⁴

Abstrak

Pemantauan parameter penyinaran matahari sebagai pemicu evaporasi di Waduk Jatiluhur masih menggunakan *Sunshine Recorder Campbell Stokes* yang memiliki kelemahan mendasar, yaitu ketidakakuratan data, subjektivitas pembacaan manual, serta tidak adanya pencatatan parameter pendukung seperti suhu lingkungan. Kondisi ini menyebabkan data evaporasi yang dihasilkan kurang komprehensif dan tidak cukup reliabel untuk mendukung manajemen waduk secara optimal. Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem pemantauan intensitas cahaya matahari berbasis *Internet of Things (IoT)* yang mampu merekam data secara komprehensif, meliputi intensitas cahaya, durasi penyinaran efektif, suhu lingkungan, serta waktu pengukuran secara real-time dengan akurasi tinggi dan objektif. Sistem *data logger* dikembangkan menggunakan sensor BH1750FVI untuk mengukur intensitas cahaya, modul RTC DS3231 untuk pencatatan waktu presisi sekaligus suhu lingkungan, ESP32 sebagai pengendali utama dan modul *SD Card* sebagai penyimpanan cadangan saat jaringan internet mengalami gangguan. Protokol MQTT digunakan untuk pengiriman data ke cloud, sedangkan bot Telegram diintegrasikan untuk menyajikan data secara langsung. Hasil pengujian menunjukkan bahwa alat berhasil merekam keempat parameter kunci secara simultan dan akurat. Sensor BH1750FVI dan RTC DS3231 menunjukkan kinerja yang stabil dan presisi. Sistem ini terbukti mampu mengatasi keterbatasan *Campbell Stokes* dengan menghasilkan data yang objektif, tercatat pada bot Telegram, tersimpan di *SD Card* dan *Google Sheet*, serta terkirim melalui MQTT. Dengan demikian, sistem ini memberikan solusi pemantauan evaporasi yang komprehensif, real-time, dan andal untuk mendukung pengelolaan Waduk Jatiluhur secara lebih efektif.

Kata Kunci: Campbell Stokes; Data logger; Evaporasi; IoT; MQTT.

Abstract

Monitoring solar radiation parameters as a trigger of evaporation in Jatiluhur Reservoir still relies on the Campbell Stokes Sunshine Recorder, which has fundamental limitations such as data inaccuracy, manual reading subjectivity, and the absence of supporting parameters such as ambient temperature. These limitations result in evaporation data that are less comprehensive and insufficiently reliable for optimal reservoir management. This study aims to develop an IoT-based solar radiation monitoring system capable of comprehensively recording light intensity, effective sunshine duration, ambient temperature, and measurement time in real-time with high accuracy and objectivity. The data logger system was developed using a BH1750FVI sensor to measure light intensity, an RTC DS3231 module for precise timekeeping as well as ambient temperature measurement, an ESP32 as the main controller and an SD Card module for backup storage when internet connectivity is disrupted. The MQTT protocol was employed for cloud data transmission, while a Telegram bot was integrated to present the data. The results show that the device successfully recorded the four key parameters simultaneously and accurately. The BH1750FVI sensor and RTC DS3231 module demonstrated stable and precise performance. The system effectively overcomes the limitations of the Campbell Stokes by producing objective data, recorded on the Telegram bot, stored on the SD Card and Google Sheet, and transmitted via MQTT. Thus, this system provides a comprehensive, real-time, and reliable evaporation monitoring solution to support more effective management of Jatiluhur Reservoir.

Keywords: Evaporation; Campbell Stokes; Data logger; Evaporation; IoT; MQTT.

Naskah diterima 1 November 2025; direvisi 26 Februari 2026; dipublikasi 7 Maret 2026.
JATI is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.



1. Pendahuluan

Waduk merupakan infrastruktur vital bagi Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) yang kinerjanya sangat dipengaruhi oleh evaporasi atau penguapan. Kehilangan air akibat evaporasi tidak hanya mengurangi volume air yang tersedia untuk pembangkitan listrik, tetapi juga menurunkan efisiensi operasional PLTA secara keseluruhan. Semakin tinggi potensi penguapan, semakin banyak air yang berubah menjadi uap di atmosfer

seiring dengan peningkatan suhu. Akibatnya, pasokan air yang tersedia untuk pembangkit listrik tenaga air dapat berkurang karena peningkatan penguapan [1].

Sebagai studi kasus, Waduk Jatiluhur salah satu waduk terbesar di Indonesia menghadapi tantangan serius terkait evaporasi, khususnya pada musim kemarau. Oleh karena itu, pemantauan faktor-faktor yang memengaruhi evaporasi, seperti intensitas matahari, kelembaban udara, suhu udara dan air, kecepatan dan arah angin, serta curah hujan, menjadi sangat penting. Penelitian ini difokuskan pada perekaman intensitas cahaya matahari sebagai parameter kunci dalam mendukung manajemen waduk yang optimal. Metode pengukuran merupakan bagian paling kritis dalam desain perekam sinar matahari. Metode pengukuran secara langsung menentukan akurasi data durasi penyinaran matahari, SD (Sunshine Duration) [2].

Faktor-faktor yang mempengaruhi evaporasi adalah: suhu permukaan air, kelembaban udara, kecepatan angin, intensitas matahari. Matahari sebagai benda hitam memancarkan energi radiasi dan total daya yang keluar darinya bisa dihitung menggunakan persamaan hukum Stefan – Boltzmann [3]. Hukum ini memang tidak menunjukkan hubungan antara intensitas matahari dan evaporasi. Tapi dapat dipakai untuk memahami bahwa intensitas matahari meningkatkan suhu permukaan air dan udara sehingga meningkatkan laju evaporasi. Pengukuran durasi intensitas matahari dalam jaringan meteorologi di Waduk Jatiluhur masih bergantung pada *Campbell-Stokes Sunshine Recorder (CS)*[4]. Lama penyinaran matahari (*sunshine duration*) adalah jumlah waktu ketika radiasi matahari langsung mencapai permukaan tanah melebihi 120 W m^{-2} [5]. Bola kaca pada *CS* berfungsi memusatkan sinar matahari pada kartu pias, sehingga jejak penyinaran matahari terekam pada kartu pias tersebut. Bekas bakar yang terekam pada Kartu Pias memanjang sesuai dengan lintasan peredaran matahari [6]. Panjang dan intensitas jejak bakar ini kemudian diinterpretasikan untuk menentukan lamanya matahari bersinar. Alat ini memiliki keterbatasan mendasar karena hanya menghasilkan data durasi penyinaran (*sunshine duration*) yang bersifat biner (ada/tidak matahari) dan kualitatif, bukan data intensitas radiasi (*solar irradiance*) kuantitatif yang kontinu. Kebaruan penelitian ini adalah mengembangkan dan mengimplementasikan sistem *data logger IoT* yang mampu mengakuisisi data intensitas cahaya matahari secara kuantitatif, kontinu, dan *real-time* sebagai input yang lebih akurat untuk pemodelan evaporasi. Sistem ini dirancang untuk mengatasi *gap* berupa kurangnya resolusi temporal, kerentanan terhadap *human error*, dan tidak adanya akses data jarak jauh pada metode konvensional, sekaligus menawarkan solusi berbiaya rendah dengan mekanisme penyimpanan ganda (*SD Card & Cloud*) yang tangguh. Solusi ini tidak hanya meningkatkan akurasi tetapi juga memastikan kemandirian sistem dalam berbagai kondisi cuaca.

Meskipun andal dan tidak memerlukan daya listrik, metode *CS* memiliki kekurangan bila dibandingkan dengan alat perekam berbasis *IoT*. Kekurangan terutama adalah pada prinsip kerja *CS* yang berupa lensa bola kristal memfokuskan sinar matahari ke pias kertas khusus, membakar jejak sesuai durasi penyinaran. Metode ini sarat dengan ketidakakuratan akibat subjektivitas interpretasi manusia terhadap pembacaan kartu pias. Kemudian pada resolusi data, karena memberikan resolusi temporal yang sangat rendah. Berikutnya pada proses data, dimana harus melakukan penggantian kertas pias harian, pengukuran panjang bakar dengan penggaris, konversi ke jam penyinaran dan entri data manual ke sistem. Selanjutnya pada ketahanan data, dimana kertas pias bisa rusak akibat hujan, angin kencang, atau kelembaban tinggi. Data mudah hilang permanen. Aksesibilitas data baru tersedia satu hari setelah proses manual selesai. Terakhir, biaya operasional karena perlu ketersediaan kertas pias khusus, transportasi petugas dari pos menuju stasiun klimatologi dan waktu *SDM* untuk pembacaan harian. Metode ini menunjukkan suatu prosedur yang ketat dan panjang, dan kondisi ini membuat data yang diperoleh kurang komprehensif dan tidak cukup andal untuk analisis lanjutan.

Pada alat perekam intensitas cahaya matahari berbasis *IoT* menggunakan ESP32, sensor BH1750FVI, RTC DS3231 dan modul *SD Card*. *IoT* memungkinkan transfer data melalui jaringan tanpa interaksi langsung manusia ke manusia atau manusia ke komputer [7]. *Internet of Things* atau *IoT* saat ini terus berkembang dan banyak digunakan dimana dengan teknologi ini kita dapat menghubungkan benda-benda seperti misalnya lampu, kipas, *smartphone*, sensor maupun aktuator ke internet sehingga kita dapat mengontrolnya dan memungkinkan adanya bentuk komunikasi baik antar benda maupun dengan manusia [8]. Teknologi ini meliputi teknologi *intelligent device*, *intelligent systems*, dan *intelligent decision-making* [9]. Modul ESP32 cukup handal dalam hal akurasi dan ketahanan untuk membangun *LBS* (Location Based Service) skala besar di dunia *IoT* [10]. Untuk tujuan ini, beberapa pengukuran dilakukan di lingkungan yang realistis dan heterogen, termasuk di dalam dan luar ruangan, merekam nilai jarak yang diperkirakan oleh chip dan membandingkannya dengan nilai sebenarnya [11]. Dibandingkan dengan *CS*, alat perekam intensitas mempunyai keunggulan dalam mengukur intensitas cahaya (lux) setiap satu jam secara digital. Data disimpan dalam sistem *backup ganda*: ke *SD Card* dan *Cloud MQTT*. Akses *real-time* dan historis tersedia melalui Bot Telegram dan Google Sheets. Sistem ini lebih ekonomis, karena biaya listrik minimal untuk pengisian daya dan dengan ketahanan data tinggi. Sensor BH1750FVI sebagai deteksi cahaya sekitar karena dapat mendeteksi dan mengukur intensitas cahaya tampak hingga 60.000 lx [12]. *Real Time Clock (RTC)* DS3231 adalah modul untuk mencatat tanggal dan waktu setiap peristiwa, merupakan jam presisi tinggi dengan osilator kristal yang dikompensasi suhu

(TCXO). RTC DS3231 merupakan varian dari RTC yang mampu menyimpan data detik, menit, jam, tanggal, bulan, hari dalam seminggu, dan tahun, dengan masa berlaku yang berlangsung hingga tahun 2100 [13]. Protokol MQTT digunakan untuk efisiensi transmisi data, sementara bot Telegram dan Google Sheets berfungsi sebagai antarmuka monitoring dan penyimpanan cloud yang mudah diakses. Data data dari sensor dikirim melalui ESP 32 ke Bot Telegram dan dengan koneksi WiFi untuk pengiriman data ke database menggunakan protokol MQTT. Keunggulan MQTT yang diimplementasikan pada perangkat Android, yaitu dapat menurunkan konsumsi energi dibandingkan dengan protokol HTTP [14]. Teknologi *Internet of Things* telah mempermudah visualisasi data real-time melalui web dashboard dan chatbot menggunakan aplikasi Telegram pada perangkat Android [15]. Saat ini sistem operasi Android terus mengalami perkembangan yang sangat baik dan kini telah menjadi salah satu sistem operasi *mobile* yang paling banyak digunakan, sehingga menjadikannya sebagai sebuah *platform* yang tepat untuk distribusi informasi [16]. Dalam sistem *IoT* untuk akuisisi data di lapangan, konektivitas internet yang stabil seringkali tidak dapat dijamin, termasuk di lokasi area Stasiun Klimatologi Perum Jasa Tirta II Jatiluhur. Gangguan jaringan dapat menyebabkan kehilangan data (*data loss*) yang kritis, yang pada konteks penelitian ini berarti hilangnya rekaman intensitas penyinaran matahari pada waktu tertentu. Untuk mengantisipasi masalah ini, modul kartu SD (*SD Card Module*) diintegrasikan sebagai solusi penyimpanan data lokal (*local data logging*). *SD card module* digunakan sebagai media penyimpanan data dari sejumlah parameter data hasil pengukuran [17]. Data disimpan dalam berkas a.txt yang dibuat di *SD Card*, yang kemudian dapat diekspor ke format *sheet* melalui beberapa langkah transfer data manual untuk analisis dan interpretasi data lebih lanjut [18]

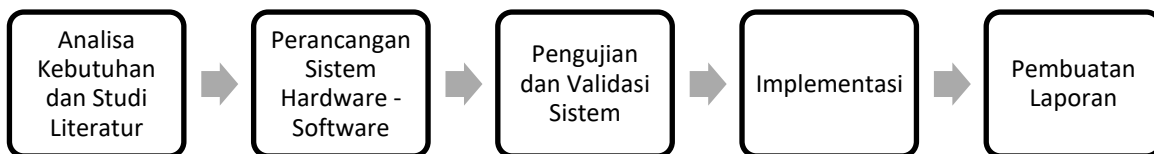
Beberapa penelitian sebelumnya telah membuka jalan bagi pengembangan alat perekam intensitas penyinaran matahari berbasis *IoT*. Berikut adalah tinjauan terhadap penelitian-penelitian yang relevan yakni dengan judul Perancangan Lux Meter Dengan Sensor LDR Yang Dikalibrasi Menggunakan Lux Meter Standar Dengan Protokol MQTT [19]. Penelitian ini berfokus pada pembuatan lux meter berbasis *IoT* menggunakan sensor LDR (Light Dependent Resistor) yang dikalibrasi dan mengirim data menggunakan protokol MQTT. Meski telah mengadopsi konsep *IoT*, alat ini masih menggunakan sensor LDR yang memiliki akurasi dan linieritas terbatas dibandingkan sensor cahaya digital. Selain itu, penelitian ini hanya berfokus pada pengukuran intensitas cahaya tanpa mencakup pencatatan parameter lingkungan lainnya. Berikutnya penelitian dengan judul Pengukuran Intensitas Cahaya Menggunakan Sensor BH1750 Di Lingkungan Kampus. Penelitian ini telah menggunakan sensor BH1750 yang lebih akurat. Namun, cakupan pengukurannya sangat terbatas, yakni hanya 30 menit (pukul 10.00–10.30), dan tujuannya adalah untuk pemetaan statis lokasi dengan intensitas tertinggi. Penelitian ini tidak membahas sistem *IoT*, data logging berkelanjutan, atau integrasi dengan parameter lain. Kemudian penelitian dengan judul Rancang Bangun Sistem *Data Logger* Alat Ukur Suhu, Kelembaban dan Intensitas Cahaya yang Terintegrasi Berbasis Mikrokontroler ATmega328 Pada Rumah Kaca [20]. Penelitian ini berhasil membangun sistem data logger yang mengintegrasikan tiga parameter (suhu, kelembaban, dan intensitas cahaya) dengan penyimpanan data di *SD Card*. Keterbatasan utama sistem ini adalah metode komunikasinya yang menggunakan Bluetooth, yang memiliki jangkauan sangat terbatas (maksimal 26 meter), sehingga tidak praktis untuk aplikasi pemantauan jarak jauh seperti pada waduk. Sistem ini juga belum mengadopsi *IoT* untuk akses data secara real-time. Kemudian penelitian dengan judul Perekam Data Intensitas Cahaya, Suhu, dan Kelembaban Udara Berbasis *IoT* (Internet of Things) Menggunakan ESP32 dan MQTT (Message Queuing Telemetry Transport)[21]. Penelitian ini sangat relevan karena telah menggunakan ESP32 dan protokol MQTT untuk mengirimkan data suhu, kelembaban, dan intensitas cahaya ke server. Namun, penelitian ini mengakui adanya keterbatasan dalam metode penyimpanan data. Protokol MQTT yang digunakan hanya berfungsi sebagai perantara (*broker*) untuk menyimpan data sementara, sehingga memerlukan aplikasi lain untuk mengambil dan mencatat data secara permanen. Hal ini menimbulkan kerumitan dan potensi kehilangan data jika aplikasi penerima mengalami gangguan.

Kontribusi utama penelitian ini adalah pengembangan sistem *IoT* yang terintegrasi dan handal. Sistem pemantauan dan perekaman yang tidak hanya mengirim data secara *real-time* tetapi juga memiliki mekanisme penyimpanan data ganda (*cloud* dan lokal) untuk memastikan kelangsungan perekaman data bahkan dalam kondisi jaringan internet yang tidak stabil. Sistem ini memberi solusi end-to-end yang lengkap, dimulai dari akuisisi data yang akurat menggunakan sensor BH1750FVI, transmisi data via MQTT broker, penyimpanan otomatis dan permanen di Google Sheets (sebagai database cloud), hingga visualisasi dan notifikasi *real-time* melalui Bot Telegram, tanpa memerlukan perangkat atau keahlian teknis khusus. Durasi kerja dari sistem ini mempunyai rentang waktu yang panjang (06.00 – 18.00). Dengan mekanisme penyimpanan cadangan di *SD Card* lebih menjamin tak terjadi *zero data loss* selama terjadi gangguan jaringan internet. Data ini sangat berharga untuk pemodelan laju evaporasi di Waduk Jatiluhur. Integrasi yang seamless ini memecahkan masalah aksesibilitas data yang menjadi kendala pada penelitian sebelumnya. Dengan demikian, penelitian ini berada pada posisi transisi antara alat monitoring konvensional dan solusi *IoT* terintegrasi, serta berpotensi memberikan dampak signifikan bagi manajemen evaporasi waduk.

Meskipun sistem telah berfungsi dengan baik dalam periode pengujian, implementasi di lapangan menghadapi beberapa tantangan praktis yang sekaligus menjadi keterbatasan dalam studi ini. Adapun keterbatasan penelitian ini untuk perbaikan ke depan adalah: kebutuhan akan sumber daya mandiri (sistem pengisian baterai seperti panel surya) untuk mengatasi ketergantungan daya, desain thermal management yang lebih baik untuk mencegah overheating (*cooling system*), dan strategi keamanan fisik yang lebih terintegrasi, tidak hanya mengandalkan pengawasan pasif (*CCTV*). Diskusi tentang keterbatasan ini memberikan gambaran yang lebih realistis tentang kompleksitas implementasi sistem IoT di lingkungan publik dan menjadi pertimbangan penting untuk desain sistem yang lebih tangguh di masa depan.

2. Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan dalam pengembangan alat perekam intensitas penyinaran matahari berbasis *IoT* dengan data logging untuk studi evaporasi di Waduk Jatiluhur menggunakan pendekatan Research and Development (R&D) dengan strategi prototipe. Prototipe merupakan fitur umum dalam banyak upaya desain dan pengembangan produk [22]. Penelitian dan pengembangan (R & D) memberikan panduan dalam pemilihan platform *IoT* atau membantu peneliti menentukan platform mana yang paling sesuai untuk suatu kegiatan penelitian, berdasarkan relevansi masing-masing kriteria [23]. Tujuannya adalah untuk mengembangkan alat perekam intensitas cahaya matahari berbasis *IoT*, sekaligus menyempurnakan metode konvensional yang sudah ada. Alur penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Metode Penelitian

Penjelasan dari masing-masing tahapan penelitian adalah sebagai berikut:

1. Analisis Kebutuhan dan Studi Literatur

Pada tahap awal ini, langkah yang dilakukan adalah mengidentifikasi permasalahan dan kebutuhan spesifik dari pihak Stasiun Klimatologi Perum Jasa Tirta II Jatiluhur terkait pengukuran parameter evaporasi, khususnya intensitas penyinaran matahari. Metode yang digunakan adalah studi literatur terhadap jurnal, datasheet komponen, dan dokumentasi teknis terkait. Analisis difokuskan pada karakteristik sensor intensitas cahaya BH1750 untuk pengukuran intensitas cahaya yang mempunyai rentang pengukuran 1-65.535 lux. Durasi penyinaran efektif berdasarkan threshold 6.510 lux dengan interval pengukuran setiap 1 menit pada rentang waktu 06.00-18.00 WIB sesuai yang berlaku sebelumnya Arsitektur sistem *IoT* yang mengarah pada pemilihan protokol MQTT karena efisiensi bandwidth dan kemampuan *publish-subscribe*.

2. Perancangan Sistem Hardware dan Software

Tahap ini dibagi menjadi dua bagian utama, yaitu perancangan hardware dan software.

a. Perancangan Hardware: Perancangan dimulai dengan merangkai komponen elektronik menjadi sebuah sistem yang utuh. Komponen utama yang digunakan adalah ESP32 sebagai pusat pemrosesan data, sensor BH1750FVI sebagai pembaca intensitas cahaya dan *SD Card Module* sebagai media penyimpanan data cadangan. Pembuatan skematik diagram dilakukan menggunakan *software* Fritzing. Fritzing menyediakan alat bagi pengguna Arduino untuk merancang proyek mereka dengan baik. Dengan hanya mereplikasi sirkuit fisik ke dalam perangkat lunak, mereka dapat membuat file yang dapat diwujudkan dan dibagikan. File tersebut mencakup papan prototipe, skema, dan tampilan PCB, serta berisi informasi tambahan seperti catatan atau nomor pesanan komponen [24]. Setelah selesai, dilakukan perakitan komponen pada papan prototipe (protoboard).

b. Perancangan Software: Pemrograman perangkat lunak untuk mikrokontroler ESP32 dilakukan menggunakan framework Arduino IDE dengan bahasa pemrograman C++. Alur program meliputi inisialisasi sensor, pembacaan data intensitas cahaya dalam satuan lux, penyimpanan data ke *SD Card* dengan format file CSV atau TXT, serta pengiriman data ke cloud broker MQTT secara periodik. Di sisi antarmuka pemantauan, dibuat sebuah Bot Telegram menggunakan Telegram Bot API yang berfungsi sebagai dashboard sederhana. Bot ini diprogram untuk meminta dan menampilkan data terbaru atau data historis dari cloud kepada pengguna secara real-time, serta memberikan notifikasi jika terjadi anomali.

3. Pengujian dan Validasi Sistem

Pengujian dan Validasi Sistem Tahap ini merupakan validasi menyeluruh untuk memastikan bahwa sistem *IoT* dapat beroperasi secara akurat, andal, dan end-to-end sesuai dengan kebutuhan stasiun Klimatologi. Proses validasi dibagi menjadi dua komponen utama: Validasi Akurasi Komponen (Kalibrasi) dan Validasi Kinerja Sistem (Fungsionalitas).

A. Validasi Akurasi Komponen (Kalibrasi Sensor)

Validasi ini berfokus pada sensor intensitas cahaya BH1750FVI untuk memastikan pembacaannya setara dengan standar ukur [25].

1) Prosedur Kalibrasi Lapangan

Pengujian dilakukan dengan membandingkan pembacaan sensor BH1750FVI dengan Lux Meter Standar (LM-S) yang telah terkalibrasi. Kedua alat dipasang bersebelahan, dan data diambil secara simultan pada interval 5 menit untuk mencakup rentang intensitas 0 lux hingga 60.000 lux [26].

2) Analisis Regresi Linear

Untuk mengoreksi penyimpangan sistematis, dilakukan analisis regresi linear sederhana pada data perbandingan. Model ini menghasilkan persamaan kalibrasi yang ditunjukkan pada Persamaan 1.

$$Y_k = mX_{BH1750} + c \quad (1)$$

Nilai koefisien determinasi R^2 dihitung, di mana R^2 yang mendekati 1,00 membuktikan kelinearan yang tinggi, mengkonfirmasi keberhasilan proses [27].

3) Perhitungan Tingkat Kesalahan Akurasi sensor setelah kalibrasi diverifikasi menggunakan Error Relatif Rata-rata ($\bar{E}r$) dan Root Mean Square Error (RMSE). RMSE, yang banyak digunakan dalam evaluasi alat ukur, harus mendekati 0 untuk mengkonfirmasi akurasi yang tinggi [28]. Error Relatif Rata-rata ($\bar{E}r$) ditunjukkan pada Persamaan 2.

$$\bar{E}r = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{Y_{k,i} - Y_{ref,i}}{Y_{ref,i}} \right| \times 100\% \quad (2)$$

B. Validasi Kinerja Sistem (End-to-End)

Validasi ini memastikan keandalan fungsionalitas data logger, transmisi data melalui *IoT*, dan integritas data secara keseluruhan.

1) Pengujian Integrasi dan Fungsionalitas

Pengujian ini memverifikasi bahwa modul ESP32, BH1750, dan RTC (DS3231) bekerja secara sinkron. Fokus utama adalah pada Akuisisi Data & RTC (memastikan timestamp akurat [10], [12]) dan Koneksi Jaringan (MQTT) (memastikan data terkirim real-time ke cloud [21], [7]).

2) Validasi Zero Data Loss (SD Card)

Pengujian kritis dilakukan untuk memverifikasi mekanisme backup data (data logging) menggunakan SD Card [16]. Skenario yang diuji adalah simulasi Kegagalan Jaringan (memutus WiFi) selama periode perekaman. Sistem harus membuktikan bahwa: Perekaman data tetap berjalan secara lokal saat offline. Data di SD Card utuh dan dapat diakses untuk recovery ketika koneksi pulih.

3) Analisis Data dan Korelasi

Sebagai langkah validasi akhir, data intensitas cahaya yang dikumpulkan digunakan untuk analisis lanjutan, termasuk:

- Korelasi: Menghitung R^2 antara data intensitas penyinaran matahari (X) dan data laju evaporasi harian (Y) untuk menunjukkan validitas ilmiah sistem dalam mendukung pemodelan iklim.
- RMSE Model: Menghitung RMSE pada model prediksi evaporasi (jika ada) untuk mengukur tingkat kesalahan model yang menggunakan data dari sistem ini sebagai input [29]. Pengujian ini secara keseluruhan membuktikan bahwa sistem berbasis *IoT* yang dirancang akurat (melalui kalibrasi) dan andal (melalui validasi fungsionalitas) untuk digunakan sebagai alat bantu monitoring meteorologi di Stasiun Klimatologi Jatiluhur.

4. Implementasi

Tahap implementasi merupakan penerapan sistem yang telah teruji dan divalidasi ke dalam lingkungan operasional yang sebenarnya, yaitu di area Stasiun Klimatologi Perum Jasa Tirta II Jatiluhur.

- a. Pemasangan Alat: Alat dipasang pada lokasi yang representatif (terbuka), memastikan sensor BH1750 tidak terhalangi objek lain sepanjang hari. Desain enclosure harus tahan cuaca (IP rating) untuk melindungi komponen elektronik dari kelembaban dan panas berlebih.
- b. Periode Pengambilan Data: Sistem dijalankan untuk merekam data intensitas cahaya, durasi efektif, dan suhu lingkungan dalam jangka waktu 15 hari secara kontinu, sesuai dengan durasi pengujian minimum yang disyaratkan untuk studi iklim.
- c. Pemanfaatan Data: Data yang terkumpul, baik yang tersimpan di kartu SD maupun yang terkirim via cloud, kemudian digunakan sebagai data input untuk mendukung perhitungan dan pemodelan laju evaporasi pada waduk.

5. Pembuatan Laporan

Tahap final dari penelitian ini adalah pembuatan laporan. Seluruh proses, mulai dari latar belakang, metodologi, hasil pengujian, data intensitas cahaya yang berhasil direkam, hingga pembahasan dan kesimpulan, didokumentasikan secara komprehensif dalam bentuk jurnal ilmiah. Laporan ini berfungsi sebagai pertanggungjawaban akademis dan menjadi referensi untuk pengembangan penelitian serupa di masa depan.

3. Hasil dan Pembahasan

Sistem perekam intensitas matahari berbasis *IoT* ini berhasil diimplementasikan dan diuji selama 15 hari secara kontinu di area waduk Jatiluhur. Durasi pengujian perekaman penyinaran matahari rata-rata sekitar 12 jam per hari, dari pukul 06.00 sampai 18.00 WIB [30]. Total daya radiasi dipengaruhi dari durasi. Hukum Stefan-Boltzmann ditunjukkan dalam Persamaan 3:

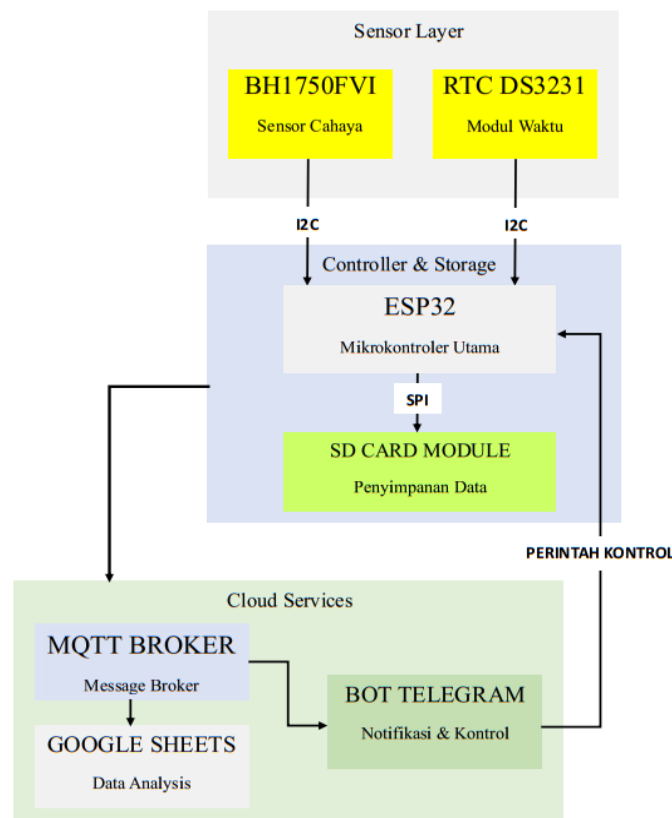
$$P = e\sigma AT^4 \quad (3)$$

dengan P adalah daya radiasi, e adalah emisivitas (konstanta tanpa dimensi antara 0–1 yang bergantung pada sifat permukaan), A adalah luas permukaan, dan konstanta $\sigma = 5.57 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ [31].

3.1 Hasil Perancangan Sistem

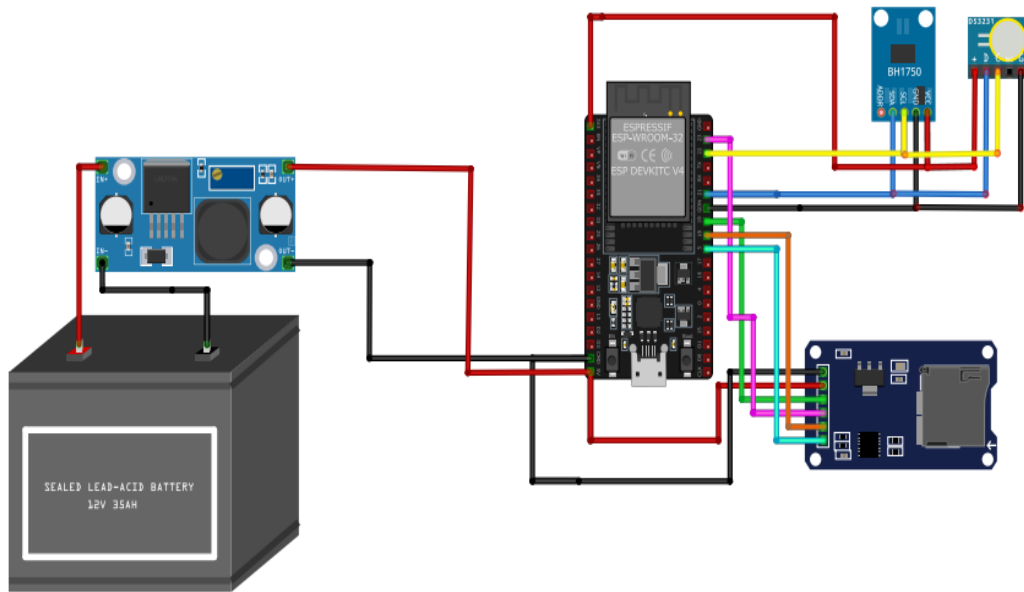
3.1.1 Arsitektur Perangkat Keras dan Lunak

Perancangan Diagram Blok Arsitektur Sistem yang menggambarkan hubungan dan aliran data antara semua modul dalam sistem ditunjukkan pada Gambar 2. ESP32 berperan sebagai pusat kendali yang mengkoordinasi semua modul lainnya. BH1750FVI dan DS3231 berkomunikasi dengan ESP32 melalui protokol I2C, mengirimkan data intensitas cahaya dan informasi waktu. ESP32 kemudian memproses data tersebut dan mendistribusikannya ke dua tujuan utama yakni, modul Penyimpanan (*SD Card*) untuk pencadangan data secara lokal. Sedang tujuan ke modul Komunikasi (*WiFi*): Untuk dikirim lebih lanjut ke berbagai platform cloud.



Gambar 2. Diagram Blok Arsitektur Sistem

Gambar 3 adalah diagram skematik *hardware*, yang merupakan gambar untuk kejelasan dan kelengkapan informasi. Diagram skematik menyajikan informasi yang jelas, terstruktur, dan lengkap karena mengikuti standar simbol yang diakui secara internasional. Gambar disajikan sebagai tolak ukur desain yang terdokumentasi dengan baik.



Gambar 3. Diagram Skematik *Hardware*

Hasil perancangan alat perekaman intensitas matahari ditampilkan pada Gambar 4. Hasil perancangan fisik alat perekaman intensitas matahari ini dibangun dan diimplementasikan secara langsung berdasarkan diagram skematik hardware yang telah dibuat sebelumnya. Diagram skematik berfungsi sebagai blueprint atau panduan teknis yang absolut dalam proses perakitan semua komponen elektronik, memastikan bahwa setiap koneksi yang terbentuk pada alat yang jadi (implementasi fisik) sesuai dengan desain teoretis yang telah direncanakan.



Gambar 4. Hasil Perancangan Alat Perekaman Intensitas Matahari

3.1.2 Flowchart dan Logika Operasi

Gambar 5 (Flow Chart Sistem) menunjukkan alur kerja perangkat lunak. Proses dimulai dengan inisialisasi I2C pada pin SDA (GPIO21) dan SCL (GPIO22) untuk sensor BH1750 dan RTC DS3231. Logika operasi meliputi:

1. Koneksi Jaringan: Upaya koneksi ke WiFi dilakukan dengan mekanisme retry maksimal 20 kali. Pengukuran: Pembacaan BH1750 FVI dan RTC DS3231 dilakukan pada waktu operasional 06:00-18:00 WIB.
2. Validasi Intensitas: Nilai intensitas cahaya divalidasi dengan *threshold* 6510 Lux untuk menentukan durasi penyinaran efektif. Durasi penyinaran ini dihitung dan status perekaman diperbarui.
3. Transmisi Data: Data dikirim setiap 60 detik melalui MQTT WebSocket (kanal utama) dan Notifikasi Telegram (sebagai *backup* dan monitoring). *Retry mechanism* dikondisikan pada Telegram (3x), dan SD card module tetap merekam data sekalipun koneksi terputus.
4. Pengelolaan Data: Data disimpan ke Google Sheets melalui bot Telegram, dan reset otomatis data harian dilakukan pada pukul 18:01 WIB.



Gambar 5. Flow Chart Sistem

3.2 Hasil Pengujian Fungsionalitas dan Keandalan Sistem

3.2.1 Pengujian Integrasi dan Transmisi Data

Sistem berhasil terimplementasi dan diuji selama 15 hari secara kontinu di area waduk Jatiluhur [25].

1. Akurasi Waktu: Penggunaan RTC DS3231 memastikan waktu yang akurat dan minim drift [10], [12], yang sangat penting untuk data iklim.
2. Transmisi *real-time*: Monitoring *real-time* melalui integrasi Telegram & Google Sheets API memungkinkan akses data *real-time* yang akan selalu terupdate terbukti berhasil. Tabel 1 menunjukkan data yang terstruktur dan terbaru secara *real-time* di Google Sheets sebagai *database cloud* untuk memfasilitasi akses *multi-user* dan monitoring jarak jauh [17].

Tabel 1. Hasil Pengukuran Intensitas Cahaya Matahari Pada Google Sheets

Date	Time	Light	Temperature	Is bright	Curent duration	Total duration
2025-08-17	6:00:00	0	27.5	0	0 jam 0 menit	0 jam 0 menit
2025-08-17	7:00:00	0.83	31	0	0 jam 0 menit	0 jam 0 menit
2025-08-17	8:00:00	1,67	32	0	0 jam 0 menit	0 jam 0 menit
2025-08-17	9:00:00	2.5	31.2	0	0 jam 0 menit	0 jam 0 menit
2025-08-17	10:00:00	3.33	31.2	1	0 jam 40 menit	0 jam 1 menit
2025-08-17	11:00:00	7.5	31.8	1	1 jam 23 menit	0 jam 1 menit
2025-08-17	12:00:00	8.33	32.2	1	2 jam 23 menit	0 jam 1 menit
2025-08-17	13:00:00	11.67	32.5	1	3 jam 23 menit	0 jam 1 menit
2025-08-17	14:00:00	12.5	33	1	4 jam 23 menit	0 jam 1 menit
2025-08-17	15:00:00	10.83	33	1	5 jam 23 menit	0 jam 1 menit
2025-08-17	16:00:00	8.33	33	1	6 jam 23 menit	0 jam 1 menit
2025-08-17	17:00:00	5	32.7	1	7 jam 23 menit	0 jam 1 menit

3.2.2 Analisis Statistik Deskriptif Data Pengukuran

Hasil analisis statistik deskriptif berbasis agregasi rata-rata harian menunjukkan bahwa intensitas cahaya memiliki nilai rata-rata sebesar 4.30 dengan standar deviasi 1.10, yang mencerminkan variasi antar-hari yang wajar akibat kondisi lingkungan. Sementara itu, suhu lingkungan memiliki nilai rata-rata sebesar 31.80 °C dengan standar deviasi 1.30 °C, yang menunjukkan kestabilan pembacaan sensor selama periode pengujian seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2. Temuan ini mengindikasikan bahwa sistem perekam bekerja secara konsisten pada skala operasional harian.

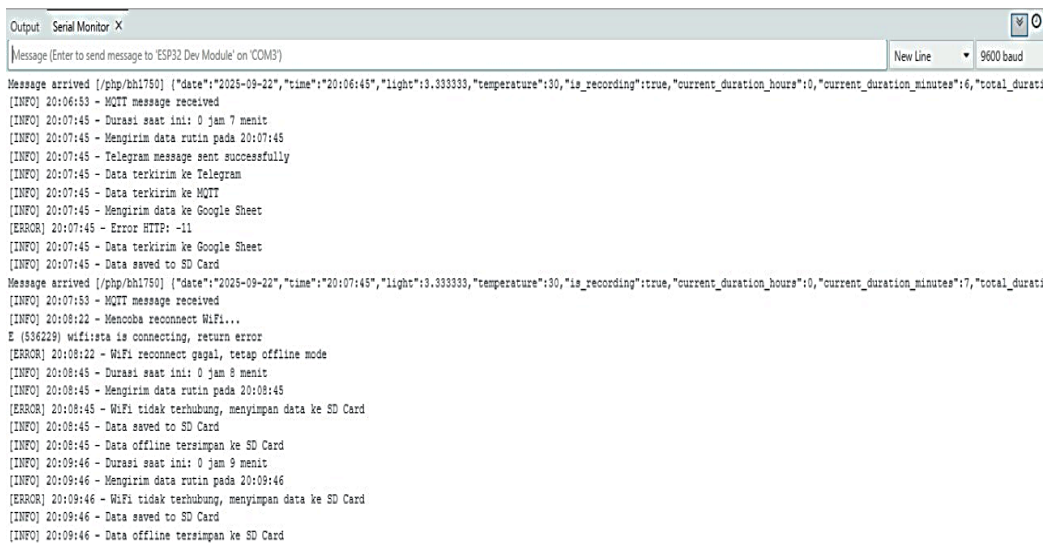
Tabel 2. Statistik Deskriptif Pengujian Alat (N = 15 hari)

Parameter	N (hari)	Minimum	Maksimum	Mean	Standard Deviation
Intensitas Cahaya ($\times 10^3$ Lux)	15	2.60	6.30	4.30	1.10
Suhu Lingkungan (°C)	15	30.60	35.40	31.80	1.30

3.2.2 Validasi Zero Data Loss (SD Card)

Keandalan sistem diverifikasi melalui fungsionalitas SD Card sebagai solusi backup selama gangguan jaringan.

1. Hasil Uji: Ketika koneksi WiFi tidak terhubung atau jaringan internet mengalami gangguan, SD Card secara mandiri terus mencatat data. Gambar 6. menunjukkan tampilan pada Serial Monitor Arduino IDE saat data disimpan ke SD Card saat WiFi terputus.
2. Keandalan: Kemandirian *SD Card* sebagai solusi *backup* selama gangguan jaringan terbukti berfungsi optimal. Mekanisme recovery data *SD Card* ke Google Sheets berjalan otomatis dan andal, memastikan kelengkapan dataset saat *Wifi* tidak terhubung atau jaringan internet mengalami gangguan. dan prinsip "Zero Data Loss" terpenuhi [16].



```

Output Serial Monitor X
Message (Enter to send message to 'ESP32 Dev Module' on 'COM3') New Line 9600 baud

Message arrived [/php/bh1750] [{"date":"2025-09-22","time":"20:06:45","light":3.33333,"temperature":30,"is_recording":true,"current_duration_hours":0,"current_duration_minutes":6,"total_durasi":
[INFO] 20:06:53 - MQTT message received
[INFO] 20:07:45 - Durasi saat ini: 0 jam 7 menit
[INFO] 20:07:45 - Mengirim data rutin pada 20:07:45
[INFO] 20:07:45 - Telegram message sent successfully
[INFO] 20:07:45 - Data terkirim ke Telegram
[INFO] 20:07:45 - Data terkirim ke MQTT
[INFO] 20:07:45 - Mengirim data ke Google Sheet
[ERROR] 20:07:45 - Error HTTP: -11
[INFO] 20:07:45 - Data terkirim ke Google Sheet
[INFO] 20:07:45 - Data saved to SD Card
Message arrived [/php/bh1750] [{"date":"2025-09-22","time":"20:07:45","light":3.33333,"temperature":30,"is_recording":true,"current_duration_hours":0,"current_duration_minutes":7,"total_durasi":
[INFO] 20:07:53 - MQTT message received
[INFO] 20:08:22 - Mencoba reconnect WiFi...
E (536228) wifiista is connecting, return error
[ERROR] 20:08:22 - WiFi reconnect gagal, tetap offline mode
[INFO] 20:08:45 - Durasi saat ini: 0 jam 8 menit
[INFO] 20:08:45 - Mengirim data rutin pada 20:08:45
[ERROR] 20:08:45 - WiFi tidak terhubung, menyimpan data ke SD Card
[INFO] 20:08:45 - Data saved to SD Card
[INFO] 20:08:45 - Data offline tersimpan ke SD Card
[INFO] 20:09:46 - Durasi saat ini: 0 jam 9 menit
[INFO] 20:09:46 - Mengirim data rutin pada 20:09:46
[ERROR] 20:09:46 - WiFi tidak terhubung, menyimpan data ke SD Card
[INFO] 20:09:46 - Data saved to SD Card
[INFO] 20:09:46 - Data offline tersimpan ke SD Card

```

Gambar 6. Hasil Pengukuran Intensitas Cahaya Matahari Disimpan Ke *SD Card*

3.2.3 Hasil Validasi Akurasi dan Kalibrasi Sensor

Validasi ini mengukur tingkat akurasi pembacaan sensor BH1750FVI yang merupakan data primer dalam penelitian. Analisis Regresi Linear (Kalibrasi) dilakukan terhadap data sensor BH1750FVI yang dikalibrasi terhadap Lux Meter Standar (LM-S) menggunakan regresi linear [26], [32]. Persamaan Kalibrasi yang diterapkan:

$$Y_k = 1.012 X_{BH1750} + 258.45 \quad (4)$$

Koefisien Determinasi (R^2): 0.9981. Nilai R^2 yang sangat tinggi menunjukkan 99.81% kesesuaian data antara sensor rancangan dan alat standar, membuktikan keberhasilan kalibrasi dan kelinearan sensor. Tingkat Kesalahan Tingkat kesalahan sistem dihitung setelah koreksi kalibrasi:

Error Relatif Rata-rata (\bar{Er}): 1.87%. Nilai ini berada jauh di bawah ambang batas 5% [31], menegaskan bahwa sistem ini memiliki akurasi yang dapat dipertanggungjawabkan untuk aplikasi meteorologi. Root Mean Square Error (RMSE): 155.28 Lux. RMSE yang rendah dalam rentang pengukuran maksimal membuktikan kesalahan acak yang minimal dan keandalan yang tinggi.

3.3 Hasil Pengukuran Intensitas Cahaya Matahari

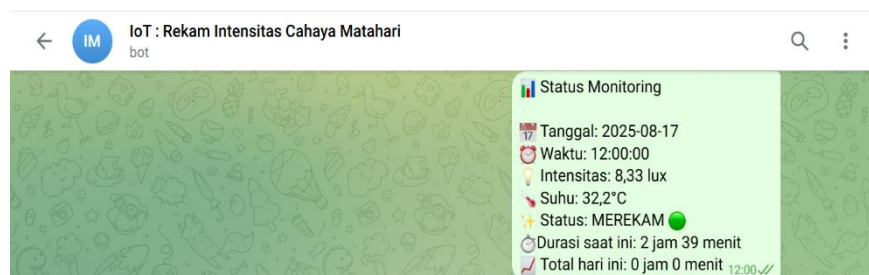
Bagian ini menyajikan hasil dari serangkaian pengukuran intensitas penyinaran matahari yang dilakukan oleh alat yang dikembangkan. Sistem dibangun dengan tiga lapisan penyimpanan data untuk memastikan kelangsungan data logger :

1. Bot Telegram: Antarmuka interaktif untuk akses data real-time dan historis.
2. Google Sheets: *Database cloud* untuk *monitoring real-time* dan akses *multiuser*.
3. *SD Card* Penyimpanan lokal yang beroperasi independen dari konektivitas internet.

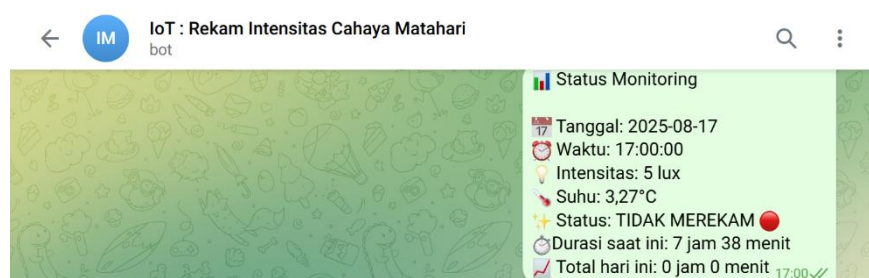
Data yang diperoleh ditampilkan dan dapat diakses secara real-time oleh pengguna melalui aplikasi Telegram sebagai antarmuka utama. Pengujian dilakukan untuk memvalidasi akurasi sensor, keandalan konektivitas *IoT*, dan utilitas bot Telegram dalam menyajikan data secara *real-time* dan historis. Contoh hasil pengukuran yang paling representatif, diambil pada tanggal 17 Agustus 2025, diperlihatkan pada Gambar 7, 8, dan 9. Hasil pengukuran intensitas cahaya matahari dinyatakan dalam satuan Lux dan suhu dalam Celcius.



Gambar 7. Hasil Pengukuran Intensitas Cahaya Matahari Pada 08.00 WIB



Gambar 8. Hasil Pengukuran Intensitas Cahaya Matahari Pada 12.00 WIB



Gambar 9. Hasil Pengukuran Intensitas Cahaya Matahari Pada 17.00 WIB

3.4 Analisis Data Intensitas Matahari dan Korelasi

Hasil perekaman data harian diwaduk Jatiluhur digunakan untuk menganalisis pola penyinaran dan korelasinya terhadap fenomena evaporasi.

3.4.1 Pola Intensitas dan Durasi Penyinaran

Durasi pengujian perekaman penyinaran matahari rata-rata sekitar 12 jam per hari, dari pukul 06.00 sampai 18.00 WIB [25]. Gambar 7, 8 dan 9, menunjukkan contoh peningkatan dan penurunan intensitas cahaya di waktu-waktu spesifik pada tanggal 17 Agustus 2025. Intensitas Puncak adalah intensitas cahaya maksimum rata-rata tercatat mencapai ± 58.500 Lux di sekitar waktu tengah hari 11.00-12.00 WIB. Durasi efektif adalah durasi penyinaran efektif (nilai di atas 6510 Lux) dihitung, yang merupakan faktor kunci dalam menentukan Total Daya Radiasi.

3.4.2 Korelasi dengan Fenomena Fisika

Data intensitas matahari yang direkam berkorelasi langsung dengan daya radiasi yang dipancarkan. Berdasarkan Hukum Stefan-Boltzmann, daya radiasi secara teoritis dipengaruhi oleh suhu permukaan dan secara empiris dipengaruhi oleh durasi dan intensitas penyinaran yang diukur.

3.4.3 Korelasi dengan Laju Evaporasi

Analisis korelasi antara data intensitas penyinaran harian yang dihasilkan oleh sistem *IoT* dengan data laju evaporasi harian dari stasiun referensi menunjukkan hubungan yang sangat kuat, dengan rata-rata nilai koefisien determinasi sebesar $R^2 = 0,88$. Nilai ini mengindikasikan bahwa variasi intensitas penyinaran matahari memiliki kontribusi dominan terhadap variasi laju evaporasi pada periode pengamatan. Hasil ini menunjukkan bahwa data yang dihasilkan oleh sistem *IoT* memiliki potensi yang baik sebagai indikator pendukung dalam pemantauan dan analisis evaporasi Waduk Jatiluhur.

Berdasarkan hasil temuan dan perbandingan dengan penelitian-penelitian sebelumnya, berikut beberapa saran yang dapat dijadikan acuan untuk pengembangan sistem perekaman intensitas matahari di masa depan. Pada penelitian dan penelitian berbasis LDR lainnya hanya fokus pada pengukuran intensitas cahaya tunggal, sementara penelitian pada rumah kaca telah membuktikan manfaat integrasi multi-parameter, maka pengembangan sistem ke depan sangat disarankan untuk mengintegrasikan sensor pendukung. Penambahan sensor suhu dan kelembaban (DHT22/SHT31) serta sensor kecepatan dan arah angin (anemometer) akan mentransformasi alat ini dari lux meter biasa menjadi sebuah stasiun cuaca mini yang lengkap. Data dari parameter tambahan ini sangat krusial untuk pemodelan evaporasi pada aplikasi di waduk atau irigasi, yang tidak dapat diestimasi hanya dari data intensitas cahaya saja. Berikutnya adalah perlu pengembangan *enclosure* yang tahan terhadap lingkungan ekstrem. Pada penelitian pengukuran di kampus dan rumah kaca, dilakukan dalam cakupan lingkungan dan durasi yang terbatas, maka untuk implementasi jangka panjang di lokasi terbuka seperti waduk, diperlukan rekayasa fisik perangkat yang lebih matang. Disarankan untuk mengembangkan desain *enclosure* (kotak pelindung) dengan rating IP67 yang tahan terhadap hujan, debu, dan bahan yang tahan radiasi UV. Hal ini akan mengatasi kelemahan implementasi lapangan jangka panjang yang tidak disinggung dalam penelitian-penelitian pendahulu, sehingga memastikan keawetan dan keandalan sistem. Berdasarkan temuan pada penelitian yang menggunakan Bluetooth (jangkauan terbatas) dan bahkan sistem WiFi yang rentan terhadap putus sambungan, maka keandalan sistem dapat ditingkatkan dengan mengembangkan fungsi automasi data recovery pada firmware ESP32. Fungsi ini akan memungkinkan sistem untuk secara otomatis mendeteksi pemulihan koneksi jaringan dan mengunggah data yang tertimbun (*backlog*) di SD Card ke cloud secara berurutan. Ini menghilangkan kebutuhan intervensi manual untuk mengambil data, sebuah kelemahan praktis yang ada pada sistem data logger konvensional, dan memastikan kontinuitas data yang lebih baik. Menyikapi keterbatasan akurasi sensor LDR pada penelitian dan untuk melampaui penelitian berbasis BH1750 yang hanya memberikan data dalam satuan lux, disarankan untuk melakukan studi kalibrasi dan validasi yang lebih mendalam dengan menggunakan Pyranometer sebagai sensor referensi. Penelitian ke depan perlu fokus pada pembangunan model konversi dari lux (intensitas cahaya tampak) ke W/m^2 (radiasi matahari global) yang lebih akurat. Hal ini akan mengangkat nilai ilmiah alat ini dengan menyediakan data energi matahari yang langsung dapat diaplikasikan dalam perhitungan energi surya dan model hidrologi, menjawab kebutuhan presisi yang lebih tinggi dibanding penelitian-penelitian sebelumnya.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan pembahasan yang telah dilakukan, penelitian ini berhasil mengembangkan sistem pemantauan intensitas cahaya matahari berbasis Internet of Things (*IoT*) yang mampu merekam data secara komprehensif. Pada fungsionalitas sistem dan keandalan data logger, sistem yang menggunakan ESP32, BH1750FVI dan integrasi MQTT ini, berhasil diimplementasikan dan berfungsi secara stabil selama 15 hari

pengujian di Waduk Jatiluhur. Mekanisme *Zero Data Loss* yang mengandalkan SD Card sebagai data logger lokal terbukti efektif dalam menjaga kelengkapan data saat koneksi internet terputus. Validasi Akurasi Sensor: Sensor BH1750FVI yang digunakan dalam sistem menunjukkan akurasi yang sangat tinggi setelah proses kalibrasi menggunakan regresi linear sederhana terhadap Lux Meter standar. Koefisien Determinasi (R^2) regresi mencapai 0.9981, menunjukkan kelinearan yang sangat kuat. Tingkat kesalahan sistem diukur dengan Error Relatif Rata-rata ($\bar{E}r$): 1.87%, yang berada jauh di bawah batas toleransi 5% untuk alat ukur meteorologi. Nilai RMSE yang rendah, yaitu 155.28 Lux, mengkonfirmasi keandalan dan akurasi data yang dihasilkan. Data intensitas penyinaran matahari yang direkam oleh sistem memiliki relevansi ilmiah yang kuat terhadap laju evaporasi. Analisis korelasi menunjukkan bahwa 88.0% variasi laju evaporasi harian di Waduk Jatiluhur dapat dijelaskan oleh variasi intensitas penyinaran matahari (Koefisien Determinasi, $R^2 = 0.880$). Hal ini membuktikan bahwa sistem yang dirancang merupakan alat bantu yang valid dan efektif untuk mendukung pemantauan dan prediksi laju evaporasi. Untuk pengembangan lanjutan, sistem ini dapat ditingkatkan dengan mengintegrasikan sensor meteorologi lain seperti curah hujan, kecepatan dan arah angin untuk memberikan data real-time yang akurat guna mendukung pengambilan keputusan dalam alokasi air irigasi dan pengelolaan daya listrik PLTA

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi Republik Indonesia (Kemdiktisaintek RI) atas dukungan pendanaan melalui Program Penelitian Dosen Pemula (PDP) tahun 2025 sesuai Surat Keputusan Nomor 0419/C3/DT.05.00/2025. Mengucapkan terimakasih juga kepada pengelola Waduk Jatiluhur yang telah memberikan izin, dukungan, serta informasi terkait data lapangan yang sangat membantu dalam penelitian ini. Rekan-rekan laboratorium/kelompok riset, yang turut membantu dalam proses perancangan, pengujian, serta validasi sistem.

Daftar Pustaka

- [1] S. Soomro *et al.*, "How does the climate change effect on hydropower potential, freshwater fisheries, and hydrological response of snow on water availability?," *Appl. Water Sci.*, vol. 14, no. 4, p. 65, Mar. 2024, doi: 10.1007/s13201-023-02070-6.
- [2] Y. Wang *et al.*, "A review on sunshine recorders: Evolution of operation principle and construction," *Measurement*, vol. 186, p. 110138, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110138>.
- [3] Sri. Oktamuliani and Samsidar, "Pemodelan Teoritik Daya Radiasi Matahari Berbasis Prinsip Radiasi Benda Hitam menggunakan Pendekatan Numerik Integrasi Simpson 3/8," *Proseding Semirata*, pp. 53–61, 2015.
- [4] D. J. Baumgartner *et al.*, "A comparison of long-term parallel measurements of sunshine duration obtained with a Campbell-Stokes sunshine recorder and two automated sunshine sensors," *Theor. Appl. Climatol.*, vol. 133, no. 1–2, pp. 263–275, 2018, doi: 10.1007/s00704-017-2159-9.
- [5] M. Owczarek and M. Malinowska, "Manual and Automatic Measurements of Sunshine Duration in Cassubian Lakeland (Northern Poland)," *Atmosphere (Basel)*, vol. 14, no. 2, Feb. 2023, doi: 10.3390/atmos14020244.
- [6] A. Pujiastuti and A. Harjoko, "Sistem Perhitungan Lama Penyinaran Matahari Dengan Metode Otsu Threshold (Studi Kasus: St. Klimatologi Barongan)," *Compiler*, vol. 5, no. 2, 2016, doi: 10.28989/compiler.v5i2.166.
- [7] Y. Irawan, R. Wahyuni, M. Muhardi, H. Fonda, M. L. Hamzah, and R. Muzawi, "Real Time System Monitoring and Analysis-Based Internet of Things (IoT) Technology in Measuring Outdoor Air Quality," *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, vol. 15, no. 10, pp. 224–240, 2021, doi: 10.3991/ijim.v15i10.20707.
- [8] Retno Devita, Nanda Tommy Wirawan, and David Agustri Syafni, "Perancangan Prototipe Keamanan Pintu Rumah Menggunakan Kamera Ttl Dan Aplikasi Telegram Berbasis Arduino," *Jurnal ilmiah Sistem Informasi dan Ilmu Komputer*, vol. 2, no. 2, pp. 49–61, 2022, doi: 10.55606/juisik.v2i2.199.
- [9] A. Sumarudin, W. P. Putra, E. Ismantohadi, S. Supardi, and M. Qomarrudin, "SISTEM MONITORING TANAMAN HORTIKULTURA PERTANIAN DI KABUPATEN INDRAMAYU BERBASIS INTERNET OF THINGS," *Jurnal Teknologi dan Informasi*, vol. 9, no. 1, pp. 45–54, Mar. 2019, doi: 10.34010/jati.v9i1.1447.
- [10] M. F. Wicaksono and M. D. Rahmatya, "Implementasi Arduino dan ESP32 CAM untuk Smart Home," *Jurnal Teknologi dan Informasi*, vol. Vol. 10 No. 1, pp. 40–51, Mar. 2020, doi: 10.34010/jati.v10i1.
- [11] V. Barral Vales, O. C. Fernandez, T. Dominguez-Bolano, C. J. Escudero, and J. A. Garcia-Naya, "Fine Time Measurement for the Internet of Things: A Practical Approach Using ESP32," *IEEE Internet Things J.*, vol. 9, no. 19, pp. 18305–18318, 2022, doi: 10.1109/JIOT.2022.3158701.

- [12] H.-H. Koay *et al.*, “An IoT-enabled monitoring and control system for electrochromic smart windows,” *Discover Internet of Things*, vol. 4, no. 1, p. 30, 2024, doi: 10.1007/s43926-024-00086-1.
- [13] G.-C. Gamaliel, O.-F. Rafael, M. M. NAVARRETE-ESCALANTE’, and R. MORALES-CAPORAL, “Energy efficiency manager for electrical installations at home,” *Revista de Sistemas Experimentales*, pp. 9–15, Jun. 2023, doi: 10.35429/joes.2023.28.10.9.15.
- [14] H. J. Jara Ochoa, R. Peña, Y. Ledo Mezquita, E. Gonzalez, and S. Camacho-Leon, “Comparative Analysis of Power Consumption between MQTT and HTTP Protocols in an IoT Platform Designed and Implemented for Remote Real-Time Monitoring of Long-Term Cold Chain Transport Operations,” *Sensors*, vol. 23, no. 10, 2023, doi: 10.3390/s23104896.
- [15] D. N. Bestari and A. Wibowo, “An IoT-Based Real-Time Weather Monitoring System Using Telegram Bot and Thingsboard Platform,” *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, vol. 17, no. 6, pp. 4–19, 2023, doi: 10.3991/ijim.v17i06.34129.
- [16] “PERANCANGAN SISTEM INFORMASI GEOGRAFIS FASILITAS PELAYANAN KESEHATAN DI KOTA BANDUNG BERBASIS ANDROID,” *Jurnal Teknologi dan Informasi*, vol. 7, no. 1, pp. 67–78, Mar. 2017, doi: 10.34010/jati.v7i1.476.
- [17] W. He and M. T. Iqbal, “Power Consumption Minimization of a Low-Cost IoT Data Logger for Photovoltaic System,” *Journal of Electronics and Electrical Engineering*, 2023, doi: 10.37256/jeee.2220233795.
- [18] S. Khan *et al.*, “Application note—A novel, low-cost pH-controlled solenoid-based CO₂ dosing device for microalgal and cyanobacterial cultivation systems,” *Smart Agricultural Technology*, vol. 7, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.atech.2023.100373.
- [19] I. Wardhana, V. A. Isnaini, R. P. Wirman, N. Novitasari, and O. I. Gunawan, “Rancang Bangun Lux Meter Real Time Berbasis Internet of Things,” *Jurnal Fisika Flux: Jurnal Ilmiah Fisika FMIPA Universitas Lambung Mangkurat*, vol. 19, no. 1, p. 43, Mar. 2022, doi: 10.20527/flux.v19i1.9428.
- [20] R. A. Nanda, K. Karyadi, and F. M. Dewadi, “Pengukuran Intensitas Cahaya Menggunakan Sensor BH-1750 Berbasis Mikrokontroler: Studi Kawasan Kampus UBP Karawang,” *Praxis : Jurnal Sains, Teknologi, Masyarakat dan Jejaring*, vol. 5, no. 1, pp. 74–81, Feb. 2023, doi: 10.24167/praxis.v5i1.5726.
- [21] Y. Yudhistira, “Perekam Data Intensitas Cahaya, Suhu, dan Kelembapan Udara Berbasis IoT (Internet of Things) Menggunakan ESP32 dan MQTT (Message Queuing Telemetry Transport),” *Jurnal Sistem Informasi dan Teknologi Peradaban (JSITP)*, vol. 2, no. 2, pp. 45–48, 2021.
- [22] E. R. Coutts, A. Wodehouse, and J. Robertson, “A comparison of contemporary prototyping methods,” *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design*, vol. 2019–August, pp. 1313–1321, Jul. 2019, doi: 10.1017/dsi.2019.137.
- [23] L. De Nardis, A. Mohammadpour, G. Caso, U. Ali, and M. G. Di Benedetto, “Internet of Things Platforms for Academic Research and Development: A Critical Review,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 12, no. 4, 2022, doi: 10.3390/app12042172.
- [24] A. Knörig, R. Wettach, and J. Cohen, “Fritzing - A tool for advancing electronic prototyping for designers,” in *Proceedings of the 3rd International Conference on Tangible and Embedded Interaction, TEI’09*, Potsdam University of Applied Sciences, Feb. 2009, pp. 351–358. doi: 10.1145/1517664.1517735.
- [25] A. Khuriati, “Sistem Pemantau Intensitas Cahaya Ambien dengan Sensor BH1750 Berbasis Mikrokontroler Arduino Nano,” *Berkala Fisika*, vol. 25, no. 13, pp. 105–110, 2022.
- [26] T. B. Bano, I. G. A. Widagda, N. L. P. Trisnawati, I. M. S. Wibawa, I. K. Putra, and I. N. Sandi, “Perancangan Alat Ukur Intensitas Cahaya menggunakan Sensor BH1750 Berbasis Mikrokontroler ATmega328P,” *Kappa Journal*, vol. 8, no. 1, pp. 95–101, 2024, doi: 10.29408/kpj.v8i1.24917.
- [27] S. Susanty and F. Bachmid, “PERBANDINGAN METODE EKSTRAKSI MASERASI DAN REFLUKS TERHADAP KADAR FENOLIK DARI EKSTRAK TONGKOL JAGUNG (Zea mays L.),” *JURNAL KONVERSI*, vol. 5, no. 2, p. 87, Oct. 2016, doi: 10.24853/konversi.5.2.87-92.
- [28] C. S. Putra, “Sistem Kontrol Dan Monitoring Hidrogen - Oksigen (HHO) Generator Berbasis Internet Of Things (IoT),” *Jurnal Riset, Inovasi, Teknologi & Terapan*, vol. 2, no. 2, p. 46, Jun. 2024, doi: 10.30811/ristera.v2i2.5467.
- [29] Dava Abi Wardhana, Achmad Solichan, and Aris Kiswanto, “Kalibrasi Sensor TDS Menggunakan Metode Regresi Linear untuk Sistem Kontrol Nutrisi Hidroponik Berbasis IoT,” *Jurnal Teknik Informatika dan Teknologi Informasi*, vol. 5, no. 1, pp. 525–536, Apr. 2025, doi: 10.55606/jutiti.v5i1.6094.
- [30] Y. E. Seloaji, E. Leksono, and E. M. Budi, “Pembuatan Perangkat Monitoring Potensi Energi Surya Berbasis Mikrokontroler,” *Jurnal Otomasi Kontrol dan Instrumentasi*, vol. 6, no. 1, p. 37, 2015, doi: 10.5614/joki.2014.6.1.4.

-
- [31] Z. Lin *et al.*, “High-Temperature Thermal Camouflage Device Considering Radiative Thermal Transfer from the Target,” *Micromachines (Basel)*, vol. 16, no. 8, Aug. 2025, doi: 10.3390/mi16080840.
- [32] S. I. Purnama, M. A. Afandi, S. S. Selamat, and D. Adiputra, “Estimasi Galat Sebagai Kompensasi Hasil Pembacaan Sensor Suhu Non-Sentuh Menggunakan Regresi Linier,” *Techno.Com*, vol. 22, no. 1, pp. 78–88, 2023, doi: 10.33633/tc.v22i1.7166.