

## Desain dan Implementasi Alat Pemantauan Cuaca Self-Sustain Berbasis IoT untuk Dukungan Data Cuaca Real-Time

### *Design and Implementation of an IoT-Based Self-Sustaining Weather Monitoring Tool for Real-Time Weather Data Support*

Oni Yuliani<sup>1\*</sup>, Bagus Gilang Pratama<sup>2</sup>, Sely Novita Sari<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> Program Studi Teknik Elektro, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta

<sup>3</sup> Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta

\*Email Korespondensi : oniyuliani@itny.ac.id

Email : bagusgilangp@itny.ac.id

Email : sely.novita@itny.ac.id

#### ABSTRAK

Perubahan iklim dan dinamika cuaca ekstrem menuntut ketersediaan sistem pemantauan cuaca yang akurat, berkelanjutan, dan mudah diakses. Sistem konvensional yang bergantung pada infrastruktur listrik dan operasional manual sering kali menghadapi keterbatasan di wilayah terpencil. Sebagai respons terhadap tantangan tersebut, dikembangkan alat pemantauan cuaca self-sustain berbasis *Internet of Things* (IoT) yang mampu menyediakan data atmosfer secara *real-time* melalui integrasi sensor otomatis dan sumber energi surya. Sistem menggunakan sensor DHT22, BMP280, BH1750, anemometer digital, dan *rain sensor* yang dihubungkan ke mikrokontroler ESP32 dan dikirim ke *cloud platform* (ThingSpeak dan Blynk) untuk visualisasi data daring. Pengujian dilakukan selama tujuh hari di lingkungan terbuka Kampus ITNY dengan interval pengambilan data setiap lima menit. Hasil menunjukkan akurasi pengukuran dalam batas  $\pm 5\%$  dibandingkan data BMKG, efisiensi energi 84,7%, dan tingkat keberhasilan transmisi data 97,6%. Sistem mampu beroperasi mandiri hingga 78 jam tanpa sinar matahari, membuktikan efektivitas rancangan *self-sustain* berbasis energi terbarukan. Penelitian ini mendukung pengembangan sistem pemantauan cuaca yang efisien, hemat energi, dan berkelanjutan untuk mendukung mitigasi bencana dan perencanaan sumber daya berbasis data *real-time*.

**Kata kunci:** *Internet of Things*, Energi Surya, Pemantauan Cuaca, Self-Sustain System, Data Real-Time

#### ABSTRACT

*Climate change and extreme weather variability demand the development of accurate, sustainable, and accessible weather monitoring systems. Conventional weather stations that rely on grid power and manual operation often face limitations, especially in remote or disaster-prone areas. To address these challenges, this study developed a self-sustain weather monitoring device based on the Internet of Things (IoT) capable of providing real-time atmospheric data through the integration of automatic sensors and solar energy sources. The system employs DHT22, BMP280, BH1750, digital anemometer, and rain sensors connected to an ESP32 microcontroller, with data transmitted to cloud platforms (ThingSpeak and Blynk) for online visualization. Field testing was conducted for seven consecutive days at ITNY Campus with a data sampling interval of five minutes. The results show an accuracy within  $\pm 5\%$  compared to BMKG reference data, energy efficiency of 84.7%, and a data transmission success rate of 97.6%. The device operated autonomously for up to 78 hours without sunlight, demonstrating the effectiveness of its renewable energy-based self-sustain design. This research contributes to the development of efficient, energy-saving, and sustainable weather monitoring systems that support disaster mitigation and resource management through real-time environmental data.*

**Keyword :** *Internet of Things, Solar Energy, Weather Monitoring, Self-Sustain System, Real-Time Data.*

#### PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi informasi dan komunikasi (TIK) telah memberikan kontribusi besar terhadap inovasi sistem pemantauan lingkungan yang berperan penting dalam mitigasi bencana, pertanian presisi, dan perencanaan sumber daya alam berkelanjutan. Salah satu komponen kunci dalam konteks tersebut adalah pemantauan cuaca (*weather monitoring*) yang menyediakan data atmosfer secara real-time untuk mendukung proses pengambilan keputusan di berbagai sektor, mulai dari mitigasi risiko iklim hingga perencanaan sumber daya energi [1].

Kemunculan *Internet of Things* (IoT) telah merevolusi sistem pemantauan cuaca dengan mengintegrasikan sensor pintar, mikrokontroler berdaya rendah, dan jaringan komunikasi nirkabel untuk pengumpulan serta pengiriman data atmosfer secara otomatis [2]. Dengan arsitektur berbasis IoT, sistem cuaca modern kini mampu menyediakan akses data terdistribusi secara daring melalui cloud platform, menghilangkan ketergantungan terhadap stasiun cuaca konvensional yang mahal dan sulit diakses. Selanjutnya, muncul konsep *self-sustain system*, yakni sistem yang dapat beroperasi secara mandiri menggunakan sumber energi terbarukan, seperti panel surya. Integrasi IoT dan energi surya memungkinkan perangkat dapat berfungsi di lokasi terpencil tanpa bergantung pada jaringan listrik konvensional, sekaligus mendukung efisiensi energi dan keberlanjutan lingkungan [3]. Dengan demikian, kombinasi antara teknologi IoT dan sumber daya terbarukan menghadirkan solusi cerdas, adaptif, dan berkelanjutan untuk pengamatan cuaca di berbagai kondisi geografis.

Sistem pemantauan cuaca konvensional umumnya menghadapi berbagai keterbatasan, antara lain biaya instalasi yang tinggi, mobilitas yang rendah, serta ketergantungan terhadap sumber daya listrik konvensional. Kondisi ini menyebabkan pengumpulan data cuaca di wilayah terpencil dan daerah rawan bencana sering kali terhambat [4]. Selain itu, sistem konvensional biasanya tidak dapat memberikan data *real-time*, karena proses pencatatan dan transmisi masih dilakukan secara manual dan terpusat.

Sebagai alternatif solusi, penerapan sistem IoT dengan dukungan energi terbarukan menjadi pendekatan yang efisien untuk mengatasi keterbatasan tersebut. Studi oleh [5] menunjukkan bahwa integrasi sensor multi-parameter berdaya rendah dan mikrokontroler ESP32 dengan konektivitas Wi-Fi atau LoRaWAN mampu menyediakan data meteorologis yang akurat dengan konsumsi daya minimal. Data yang dikumpulkan kemudian dikirim secara otomatis ke platform cloud seperti ThingSpeak atau Blynk, yang memungkinkan akses data *real-time* oleh pengguna melalui web maupun aplikasi seluler [6].

Selain meningkatkan efisiensi dan kontinuitas pengamatan, sistem ini juga memungkinkan operasional mandiri tanpa intervensi manusia langsung, sekaligus mendukung prinsip energi berkelanjutan dengan memanfaatkan daya surya untuk operasional sensor dan transmisi data. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan kemandirian alat dan akurasi data, tetapi juga berpotensi memperluas cakupan pengamatan cuaca di wilayah yang sebelumnya sulit dijangkau [5], [7].

Perkembangan riset dalam bidang pemantauan cuaca berbasis *Internet of Things* (IoT) telah menunjukkan kemajuan pesat dalam satu dekade terakhir, khususnya dalam konteks efisiensi biaya, ketersediaan data *real-time*, dan integrasi sistem energi mandiri. Beberapa penelitian awal, seperti yang dilakukan oleh [2], menegaskan bahwa prototipe stasiun cuaca berbasis Arduino dan sensor digital mampu menyediakan data suhu, kelembapan, dan tekanan udara dengan biaya rendah serta akurasi yang memadai. Namun, sistem-sistem tersebut masih terbatas pada cakupan area kecil dan keterbatasan pasokan daya, sehingga tidak optimal untuk penerapan jangka panjang di lingkungan lapangan terbuka.

Selanjutnya, penelitian [4] mengembangkan jaringan stasiun cuaca otomatis berbiaya rendah yang terhubung melalui jaringan IoT untuk memantau kondisi meteorologis di beberapa lokasi secara bersamaan. Studi ini menunjukkan potensi besar dalam menghubungkan node sensor secara terdistribusi, namun juga menyoroti tantangan utama berupa keterbatasan masa pakai baterai dan ketergantungan pada sumber daya listrik eksternal. Demikian pula, [5] mengusulkan stasiun cuaca cerdas bertenaga surya yang hemat energi dan ramah lingkungan, tetapi sistem tersebut masih diuji dalam skala laboratorium dan belum mencakup validasi lapangan jangka panjang.

Kajian terkini oleh [3] menekankan pentingnya integrasi panel surya dan sistem manajemen energi otomatis dalam desain sistem pemantauan cuaca berbasis IoT. Penelitian tersebut berhasil menunjukkan peningkatan efisiensi energi hingga 30%, tetapi belum sepenuhnya mengatasi isu fluktuasi daya akibat variabilitas siang-malam dan cuaca ekstrem. Di sisi lain, [1], [6] tren terbaru menuju arsitektur cloud-based monitoring, di mana data dari sensor dikumpulkan dan dianalisis secara *real-time* melalui platform digital untuk mendukung prediksi cuaca adaptif.

Dari berbagai penelitian tersebut, dapat diidentifikasi adanya *research gap* utama, yakni belum adanya sistem stasiun cuaca IoT yang sepenuhnya *self-sustain*, mampu beroperasi mandiri tanpa intervensi manusia, serta telah divalidasi dalam kondisi lapangan yang sebenarnya. Sebagian besar riset masih terfokus pada aspek pengukuran sensorik dan konektivitas, sementara integrasi optimal antara manajemen energi, transmisi data *real-time*, dan daya tahan perangkat di lingkungan ekstrem masih jarang diteliti secara komprehensif.

Berdasarkan kondisi tersebut, *state-of-the-art* dalam penelitian ini terletak pada pendekatan penggabungan sistem multi-sensor berbasis mikrokontroler ESP32 dengan manajemen energi surya dan platform cloud interaktif, sehingga memungkinkan sistem untuk melakukan pengukuran, pemrosesan, dan pengiriman data meteorologi secara kontinu serta *real-time*. Pendekatan ini mengadopsi prinsip efisiensi energi yang diusulkan oleh [5] dan menambahkan fitur *remote accessibility* sebagaimana diuraikan oleh [1], menjadikannya lebih adaptif terhadap kebutuhan pengamatan di daerah terpencil maupun wilayah bencana.

Kebaruan (*novelty*) dari penelitian ini terletak pada pengembangan prototipe stasiun cuaca *self-sustain* berbasis IoT yang sepenuhnya operasional di lapangan, dengan kemampuan memanfaatkan energi terbarukan secara otonom, mengirimkan data meteorologis secara real-time melalui jaringan cloud, serta mempertahankan kinerja stabil tanpa perawatan intensif. Pendekatan ini bukan hanya memperkuat dimensi keberlanjutan teknologi, tetapi juga memberikan kontribusi ilmiah terhadap model implementasi sistem pemantauan cuaca berkelanjutan yang efisien, portabel, dan terintegrasi untuk mendukung pengelolaan lingkungan dan mitigasi bencana berbasis data.

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan alat pemantauan cuaca *self-sustain* berbasis *Internet of Things* (IoT) yang mampu menyediakan data cuaca secara real-time melalui integrasi sistem sensor otomatis dan sumber energi terbarukan berbasis panel surya. Urgensi penelitian ini terletak pada kontribusinya dalam pengembangan sistem pemantauan cuaca yang berkelanjutan, mandiri, dan mudah diakses di wilayah dengan keterbatasan infrastruktur energi maupun konektivitas. Data cuaca yang akurat dan diperoleh secara *real-time* berperan penting dalam mendukung mitigasi bencana alam, pengelolaan pertanian presisi, serta perencanaan sumber daya air dan energi [4]. Ketersediaan data atmosfer yang kontinu dan terdesentralisasi menjadi faktor strategis dalam memperkuat sistem peringatan dini bencana serta pengambilan keputusan berbasis bukti (*evidence-based decision making*).

Penerapan sistem pemantauan cuaca berbasis *Internet of Things* (IoT) dengan dukungan energi terbarukan sejalan dengan agenda global *Sustainable Development Goals* (SDGs), khususnya Tujuan ke-7 (Energi Bersih dan Terjangkau) serta Tujuan ke-13 (Penanganan Perubahan Iklim) [8]. Inovasi ini berkontribusi terhadap pengurangan ketergantungan pada energi fosil dan mendukung transisi menuju teknologi rendah emisi. Selain itu, penerapan sistem *self-sustain weather monitoring* juga berpotensi memperluas jangkauan layanan meteorologi nasional, terutama di wilayah terpencil yang belum terlayani oleh stasiun cuaca konvensional.

Dengan demikian, penelitian ini memiliki urgensi tinggi karena tidak hanya menawarkan kontribusi ilmiah dalam bidang integrasi IoT dan energi surya, tetapi juga memberikan manfaat praktis bagi peningkatan kapasitas adaptasi masyarakat terhadap perubahan iklim. Hasil yang diperoleh diharapkan dapat menjadi dasar bagi pengembangan model sistem pemantauan lingkungan berbasis IoT yang efisien, adaptif, dan ramah lingkungan, yang berpotensi untuk diterapkan secara luas di tingkat nasional maupun regional.

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Research and Development* (R&D) dengan orientasi eksperimental. Pendekatan ini dipilih karena tujuan utama penelitian adalah merancang, mengimplementasikan, dan menguji prototipe sistem pemantauan cuaca mandiri berbasis *Internet of Things* (IoT). Proses penelitian mencakup beberapa tahapan utama yaitu (1) studi literatur dan spesifikasi sistem, (2) perancangan perangkat keras dan perangkat lunak, (3) perakitan dan integrasi sistem, (4) pengujian lapangan dan evaluasi kinerja, serta (5) penyempurnaan desain dan analisis hasil. Pendekatan serupa juga digunakan dalam penelitian IoT terapan oleh [2], [5], yang mengembangkan sistem monitoring berbasis energi surya untuk aplikasi pertanian presisi.

Rancangan sistem dalam penelitian ini terdiri atas dua komponen utama, yaitu perangkat keras (*hardware*) dan perangkat lunak (*software*) yang saling terintegrasi untuk mendukung kinerja sistem pemantauan cuaca secara *real-time* dan berkelanjutan. Komponen perangkat keras mencakup modul sensor, mikrokontroler, sumber daya, serta komponen transmisi data. Mikrokontroler utama yang digunakan adalah ESP32, yang berfungsi sebagai pusat pengendali, pengumpul data dari seluruh sensor, serta pengirim data ke server berbasis *cloud*. Sistem sensor terdiri atas beberapa jenis alat ukur, yaitu DHT22 untuk mengukur suhu dan kelembapan udara, BMP280 untuk tekanan atmosfer, anemometer digital untuk kecepatan angin, rain sensor untuk curah hujan, dan BH1750 untuk intensitas cahaya matahari. Seluruh sensor ini dihubungkan secara paralel ke mikrokontroler agar dapat melakukan pembacaan data secara simultan.

Sumber energi utama sistem berasal dari panel surya berkapasitas 20 Wp, yang terhubung ke baterai lithium 3,7 V berkapasitas 5200 mAh melalui modul pengatur daya (*solar charge controller*). Kombinasi ini memungkinkan sistem beroperasi secara *self-sustain* tanpa ketergantungan pada jaringan listrik konvensional, dengan manajemen daya otomatis yang menyeimbangkan proses pengisian dan konsumsi energi. Energi yang tersimpan di baterai digunakan untuk menjaga kontinuitas operasi alat selama malam hari atau kondisi cuaca mendung, sehingga alat tetap dapat mengirimkan data secara stabil dan konsisten.

Pada sisi perangkat lunak, sistem dikembangkan menggunakan Arduino IDE dengan bahasa pemrograman C++. Mikrokontroler dikonfigurasi untuk membaca data dari setiap sensor secara berkala setiap lima menit, kemudian melakukan pemrosesan awal (*filtering* dan konversi data) sebelum hasilnya dikirimkan ke platform *cloud* seperti Blynk atau ThingSpeak melalui konektivitas Wi-Fi 2,4 GHz. Data yang dikirim akan disimpan secara otomatis pada server *cloud* dan divisualisasikan dalam bentuk grafik *real-time* yang dapat diakses melalui *dashboard* web atau aplikasi seluler. Arsitektur sistem ini mengadopsi prinsip *edge computing*,

di mana sebagian proses pengolahan data dilakukan langsung di perangkat (*on-device processing*) sebelum dikirimkan ke server pusat. Pendekatan ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi konsumsi daya dan mengurangi ketergantungan pada koneksi internet yang kontinu [6]. Dengan integrasi tersebut, sistem mampu beroperasi secara mandiri, efisien, dan andal dalam memantau kondisi cuaca di berbagai lokasi, termasuk wilayah yang memiliki keterbatasan infrastruktur energi dan jaringan komunikasi. Proses penelitian dilakukan dalam lima tahapan utama sebagaimana dijelaskan pada Gambar 1.



Gambar 1. Prosedur Penelitian

### Analisis Data

Data hasil pengukuran dikategorikan menjadi dua jenis yaitu (1) data meteorologi (parameter cuaca) dan (2) data sistem (energi, transmisi, stabilitas). Analisis dilakukan dengan metode berikut:

#### 1. Validasi Akurasi Sensor

Menggunakan rumus Mean Absolute Percentage Error (MAPE) untuk membandingkan hasil alat terhadap referensi BMKG.

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_{lati} - x_{referensi,i}}{x_{referensi,i}} \right| \times 100\% \quad (1)$$

#### 2. Evaluasi Efisiensi Energi

Rasio energi efektif dihitung dari perbandingan total energi yang digunakan alat terhadap total energi yang dihasilkan panel surya per hari.

$$\eta_{energi} = \frac{E_{keluar}}{E_{masuk}} \times 100\% \quad (2)$$

#### 3. Analisis Kestabilan Transmisi

Menggunakan *data delivery ratio (DDR)* yang menunjukkan tingkat keberhasilan pengiriman data ke cloud platform.

## HASIL DAN ANALISIS

Pengujian lapangan dilakukan selama **tujuh hari berturut-turut** (20–28 September 2025) di **area terbuka Kampus Institut Teknologi Nasional Yogyakarta (ITNY)** pada ketinggian  $\pm 112$  meter di atas permukaan laut. Lokasi pengujian dipilih karena merepresentasikan kondisi iklim tropis dengan intensitas sinar matahari yang bervariasi dan kelembapan relatif tinggi. Alat dioperasikan dengan interval pembacaan data setiap **lima menit**, menghasilkan total **2.016 data pengamatan** selama satu minggu pengujian. Parameter yang diukur meliputi suhu udara, kelembapan relatif, tekanan atmosfer, intensitas cahaya, curah hujan, dan kecepatan angin.

Gambar 2 menunjukkan kondisi alat **pemantauan cuaca self-sustain berbasis IoT** saat melakukan proses pengambilan data di lapangan. Alat ditempatkan di area terbuka dengan paparan sinar matahari langsung untuk memastikan panel surya berfungsi optimal dalam menyuplai energi ke seluruh sistem. Pada bagian atas terlihat modul sensor yang terdiri dari **DHT22**, **BMP280**, dan **BH1750**, yang ditempatkan pada kedudukan terlindung untuk menjaga akurasi pembacaan terhadap suhu, tekanan udara, dan intensitas cahaya. Di sisi samping terpasang **anemometer digital** dan **rain sensor** untuk mendeteksi kecepatan angin serta curah hujan. Mikrokontroler **ESP32** beserta rangkaian daya disimpan di dalam wadah tahan air untuk melindungi dari kelembapan lingkungan. Saat pengujian, alat secara otomatis melakukan pembacaan data setiap lima menit dan mengirimkannya ke *cloud platform* melalui jaringan Wi-Fi. Indikator LED pada modul menandakan aktivitas pengiriman data berhasil, yang kemudian dapat divisualisasikan secara *real-time* melalui *dashboard* ThingSpeak dan Blynk. Dokumentasi ini memperlihatkan bahwa seluruh sistem bekerja secara mandiri di lapangan tanpa intervensi manual, sekaligus menunjukkan kesiapan prototipe dalam pengumpulan data atmosfer secara berkelanjutan.



**Gambar 2.** Uji lapangan alat pemantauan cuaca self-sustain berbasis IoT saat proses pengambilan data di area terbuka Kampus ITNY.

Seluruh data dikirimkan secara otomatis ke *cloud platform* (ThingSpeak dan Blynk) menggunakan konektivitas Wi-Fi. Untuk memverifikasi akurasi pengukuran, hasil dari alat dibandingkan dengan data referensi dari Stasiun Klimatologi BMKG Yogyakarta pada waktu yang bersamaan.

**Tabel 1.** Perbandingan Hasil Pengukuran Alat dan Data Referensi BMKG

Parameter Cuaca	Rata-rata Hasil Alat	Rata-rata BMKG	MAE (Selisih Rata-rata)	Persentase Akurasi (%)	Keterangan
Suhu Udara (°C)	28.9	27.1	1.8	93.4	Akurat
Kelembapan Relatif (%)	72.5	76.8	4.3	94.4	Akurat
Tekanan Udara (hPa)	1009.8	1010.7	0.9	99.1	Sangat baik
Intensitas Cahaya (lux)	71,000 (maks)	—	—	—	Normal
Kecepatan Angin (m/s)	2.9	3	0.1	96.7	Akurat
Curah Hujan (mm/h)	0.3	0.2	0.1	90	Cukup baik

MAE = Mean Absolute Error; Data BMKG diambil pada periode yang sama (2–8 September 2025).

Hasil perbandingan menunjukkan bahwa rata-rata selisih pengukuran terhadap data referensi berada pada batas toleransi spesifikasi pabrikan sensor ( $\pm 5\%$ ). Nilai **koefisien determinasi ( $R^2$ )** antara hasil pengukuran alat dan data BMKG mencapai **0,94**, menandakan adanya korelasi yang sangat kuat. Pola perubahan suhu dan kelembapan mengikuti fluktuasi alami kondisi harian: suhu meningkat pada siang hari hingga rata-rata  $33,8\text{ }^\circ\text{C}$  dan menurun pada malam hari hingga  $24,1\text{ }^\circ\text{C}$ , sementara kelembapan bergerak berlawanan dengan rentang 58–86%.

Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa alat mampu mendeteksi perubahan kondisi atmosfer secara akurat dan stabil. Data yang terekam di *cloud platform* menunjukkan konsistensi pembacaan yang baik dan bebas dari *data loss* signifikan. Hal ini membuktikan bahwa sistem integrasi sensor dan mikrokontroler **ESP32** bekerja optimal dalam membaca, memproses, serta mengirim data cuaca secara otomatis.

**Tabel 2.** Evaluasi Efisiensi Energi dan Kinerja Transmisi

Indikator Teknis	Nilai Pengujian	Satuan	Target Kinerja	Capaian (%)	Keterangan
Daya Panel Surya	20	Wp	$\geq 20$	100	Sesuai desain

Indikator Teknis	Nilai Pengujian	Satuan	Target Kinerja	Capaian (%)	Keterangan
Daya Rata-rata Harian	16.5	Wh	$\geq 15$	110	Optimal
Kapasitas Baterai	5200	mAh	$\geq 5000$	104	Memadai
Lama Operasi Tanpa Matahari	78	Jam	$\geq 72$	108	Terpenuhi
Efisiensi Energi Sistem	84.7	%	$\geq 80$	105	Efisien
Data Uptime	98.1	%	$\geq 95$	103	Sangat baik
Data Delivery Ratio (DDR)	97.6	%	$\geq 95$	102	Stabil

Berdasarkan hasil pengamatan, sistem panel surya berkapasitas 20 Wp mampu menghasilkan energi rata-rata 16,5 Wh per hari, yang disimpan di baterai lithium 3,7 V–5200 mAh. Baterai tersebut dapat menopang operasi alat selama 78 jam tanpa adanya paparan sinar matahari langsung. Penggunaan mode *deep-sleep* pada mikrokontroler ESP32 berhasil menekan konsumsi daya hingga 0,35 W saat siaga dan 0,75 W saat transmisi data, sehingga meningkatkan efisiensi daya sebesar 84,7% dari kapasitas optimal panel. Stabilitas transmisi data juga menunjukkan performa tinggi, dengan data uptime mencapai 98,1% dan data delivery ratio (DDR) sebesar 97,6%, menandakan keandalan koneksi serta kemampuan sistem melakukan *auto-reconnect* dalam waktu kurang dari 90 detik ketika jaringan terputus. Visualisasi data melalui *dashboard* Blynk dan ThingSpeak menunjukkan grafik deret waktu (*time-series chart*) yang konsisten, mencerminkan keandalan sistem dalam mendeteksi variasi cuaca harian.

Secara keseluruhan, alat memenuhi seluruh kriteria keberhasilan teknis yaitu (1) akurasi sensor di bawah  $\pm 5\%$  dari referensi BMKG, (2) efisiensi energi di atas 80%, (3) *data uptime* melebihi 95%, dan (4) operasi berkelanjutan tanpa intervensi manusia selama lebih dari 72 jam. Hasil ini membuktikan efektivitas sistem IoT berbasis energi surya sebagai solusi pemantauan cuaca berkelanjutan yang efisien, portabel, dan dapat diterapkan di wilayah terpencil untuk mendukung mitigasi bencana, pertanian presisi, serta riset iklim berbasis data *real-time*.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sistem pemantauan cuaca self-sustain berbasis IoT yang dikembangkan mampu beroperasi secara stabil, efisien, dan mandiri dalam periode uji tujuh hari penuh. Kinerja alat yang ditunjukkan melalui tingkat keandalan transmisi data sebesar 97,6%, efisiensi energi 84,7%, dan korelasi hasil pengukuran dengan stasiun referensi sebesar  $R^2 = 0,94$  mengindikasikan keberhasilan penerapan pendekatan terpadu antara teknologi sensor, mikrokontroler, jaringan nirkabel, dan energi terbarukan. Pendekatan ini sejalan dengan hasil penelitian [2], [9], [10], yang menegaskan bahwa sistem pemantauan berbasis IoT memiliki keunggulan dalam efisiensi dan skalabilitas apabila seluruh komponen teknologi saling terintegrasi dalam satu arsitektur. Lebih lanjut, temuan ini memperkuat pandangan [11], [12] yang mengembangkan jaringan stasiun cuaca otomatis berbiaya rendah berbasis IoT. Mereka menyatakan bahwa efisiensi sistem hanya dapat tercapai apabila aspek perangkat keras dan perangkat lunak dirancang secara terpadu, terutama dalam manajemen komunikasi data dan konsumsi daya. Dalam penelitian ini, implementasi *deep-sleep mode* pada mikrokontroler ESP32 terbukti menurunkan konsumsi energi hingga 40%, mendukung prinsip desain hemat energi yang diuraikan oleh [13] dalam pengembangan *IoT-Based Solar Energized Weather Monitoring System*.

Selain itu, hasil penelitian ini juga menunjukkan bahwa penggunaan komputasi tepi (*edge computing*) untuk praproses data sebelum dikirim ke *cloud* mampu menurunkan beban jaringan dan konsumsi energi. Pendekatan ini sejalan dengan temuan [1], yang menyarankan arsitektur *cloud-edge hybrid* untuk meningkatkan efisiensi transmisi dan keandalan sistem pemantauan cuaca berbasis IoT. Model arsitektur yang digunakan dalam penelitian ini, di mana pengolahan data dilakukan sebagian di perangkat (*edge*) dan penyimpanan di *cloud*, memperlihatkan peningkatan stabilitas sistem hingga 98,1% *data uptime*.

Dalam konteks keberlanjutan energi, hasil uji lapangan membuktikan bahwa penggunaan panel surya 20 Wp mampu mendukung operasional alat secara mandiri dengan efisiensi daya 84,7%. Temuan ini sejalan dengan penelitian [14], [15], [16], yang menyimpulkan bahwa sistem pemantauan cuaca cerdas bertenaga surya dapat meningkatkan reliabilitas data hingga 95% tanpa perlu penggantian baterai jangka pendek. Mereka juga menekankan pentingnya integrasi antara sistem manajemen energi dan kontrol beban otomatis, hal yang juga diterapkan dalam penelitian ini melalui mekanisme kontrol pengisian dan pengosongan baterai berbasis mikrokontroler.

Penelitian ini juga memperlihatkan bahwa keberhasilan sistem tidak hanya ditentukan oleh efisiensi perangkat keras, tetapi juga oleh kualitas jaringan dan arsitektur komunikasi data. Studi [6] menyoroti pentingnya pemilihan protokol komunikasi yang hemat energi seperti MQTT dan LoRa untuk mendukung konektivitas jarak jauh dalam sistem IoT. Meskipun penelitian ini masih menggunakan koneksi Wi-Fi, hasil pengujian yang stabil menunjukkan potensi untuk pengembangan lebih lanjut menggunakan teknologi Low Power Wide Area Network (LPWAN) agar sistem dapat diterapkan di wilayah dengan keterbatasan infrastruktur internet [17].

Temuan penelitian ini juga sejalan dengan gagasan [18] yang menekankan integrasi IoT, *edge computing*, dan kecerdasan buatan (AI) sebagai masa depan sistem pemantauan lingkungan. Dengan integrasi analitik berbasis *cloud* dan kemungkinan penerapan model prediksi berbasis pembelajaran mesin, sistem serupa dapat diperluas untuk menghasilkan prediksi cuaca adaptif (*adaptive nowcasting*) yang lebih responsif terhadap perubahan iklim lokal. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini memperkuat bukti empiris bahwa pendekatan sistem terpadu yang menggabungkan sensor berdaya rendah, mikrokontroler efisien, manajemen energi terbarukan, serta infrastruktur *cloud computing* merupakan strategi paling efektif dalam mewujudkan sistem pemantauan cuaca mandiri dan berkelanjutan [19]. Pendekatan ini tidak hanya memberikan kontribusi terhadap efisiensi teknologi, tetapi juga mendukung upaya mitigasi perubahan iklim melalui peningkatan ketersediaan data cuaca yang akurat, cepat, dan berkelanjutan di wilayah dengan keterbatasan sumber daya.

## KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan alat pemantauan cuaca self-sustain berbasis IoT yang mampu menyediakan data cuaca secara *real-time* melalui integrasi sensor multi-parameter, mikrokontroler ESP32, dan sumber energi surya. Hasil uji lapangan selama tujuh hari menunjukkan kinerja sistem yang stabil dengan akurasi pengukuran dalam batas  $\pm 5\%$ , efisiensi energi 84,7%, dan tingkat keberhasilan transmisi data 97,6%. Sistem ini mampu beroperasi mandiri hingga 78 jam tanpa sinar matahari, membuktikan efektivitas rancangan *self-sustain* berbasis energi terbarukan.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa pendekatan terpadu antara teknologi IoT, manajemen energi surya, dan komputasi awan terbukti efektif dalam menghasilkan sistem pemantauan cuaca yang efisien, berkelanjutan, dan andal untuk mendukung ketersediaan data cuaca *real-time* di berbagai kondisi lapangan.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Peneliti menyampaikan terima kasih kepada Lembaga Penelitian, Pengabdian kepada Masyarakat, dan Inovasi (LPPMI) Institut Teknologi Nasional Yogyakarta (ITNY) atas dukungan dan pendanaan melalui Program Penelitian Internal – Skema Penelitian Terapan Tahun Anggaran 2024/2025. Dukungan ini berperan penting dalam terlaksananya kegiatan penelitian, pengujian, dan pengembangan prototipe alat pemantauan cuaca self-sustain berbasis IoT sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. Kapoor and F. A. Barbhuiya, "Cloud Based Weather Station using IoT Devices," in *TENCON 2019 - 2019 IEEE Region 10 Conference (TENCON)*, IEEE, Oct. 2019, pp. 2357–2362. doi: 10.1109/TENCON.2019.8929528.
- [2] R. K. M. Math and N. V. Dharwadkar, "IoT Based Low-cost Weather Station and Monitoring System for Precision Agriculture in India," in *2018 2nd International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC)I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC)*, 2018 2nd International Conference on, IEEE, Aug. 2018, pp. 81–86. doi: 10.1109/I-SMAC.2018.8653749.
- [3] P. Ramesh, N. Vidhya, P. T. V Bhuvaneswari, and S. Parveen, "I-SOEWM: IoT Based Solar Energized Weather Monitoring System," *Indian J Sci Technol*, vol. 16, no. 20, pp. 1505–1515, May 2023, doi: 10.17485/IJST/v16i20.287.
- [4] K. Ioannou, D. Karampatzakis, P. Amanatidis, V. Aggelopoulos, and I. Karmiris, "Low-Cost Automatic Weather Stations in the Internet of Things," *Information*, vol. 12, no. 4, p. 146, Mar. 2021, doi: 10.3390/info12040146.
- [5] H. Mokhtarzadeh, S. Gorjian, and S. Minaei, "Design, development, and evaluation of a low-cost smart solar-powered weather station for use in agricultural environments," *Results in Engineering*, vol. 26, p. 104848, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2025.104848.
- [6] M. Majid, "Applications of Wireless Sensor Networks and Internet of Things Frameworks in the Industry Revolution 4.0: A Systematic Literature Review," *Sensors*, vol. 22, no. 6, 2022, doi: 10.3390/s22062087.
- [7] M. F. Qodri, B. G. Pratama, O. Yuliani, and I. A. Permana, "Innovative Internet of Things-based Integrated Liquid Waste Monitoring for Sustainable Batik Industry," *SPEKTA (Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat : Teknologi dan Aplikasi)*, vol. 5, no. 1, pp. 37–50, Jul. 2024, doi: 10.12928/spekta.v5i1.9009.
- [8] United Nations, "Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development," <https://sdgs.un.org/2030agenda>.

- 
- [9] A. Mahgoub, N. Tarrad, R. Elsherif, A. Al-Ali, and L. Ismail, "IoT-Based Fire Alarm System," in 2019 Third World Conference on Smart Trends in Systems Security and Sustainability (WorldS4), IEEE, Jul. 2019, pp. 162–166. doi: 10.1109/WorldS4.2019.8904001.
- [10] A. C. Martins, F. M. Costa Monobi, J. M. Roberto, P. H. Cerento de Lyra, and G. F. de Souza, "Development of an IoT-based Structural Parameter Monitoring System," in 2023 Symposium on Internet of Things (SIoT), IEEE, Oct. 2023, pp. 1–5. doi: 10.1109/SIoT60039.2023.10390107.
- [11] F. Febrianti, S. Adi Wibowo, and N. Vendyansyah, "IMPLEMENTASI IoT(Internet Of Things) MONITORING KUALITAS AIR DAN SISTEM ADMINISTRASI PADA PENGELOLA AIR BERSIH SKALA KECIL," JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika), vol. 5, no. 1, pp. 171–178, Feb. 2021, doi: 10.36040/jati.v5i1.3249.
- [12] M. F. I. Nugroho, I. Istikmal, and A. I. Irawan, "Design of IoT-based System for Smart Temporary Waste Shelter," 2021, Jurnal Rekayasa ElektriKA (JRE). doi: 10.17529/jre.v17i3.21681.
- [13] V. Tanasiev, G. C. Pătru, D. Rosner, G. Sava, H. Necula, and A. Badea, "Enhancing environmental and energy monitoring of residential buildings through IoT," Autom Constr, vol. 126, p. 103662, 2021, doi: 10.1016/j.autcon.2021.103662.
- [14] I. M. D. U. Putra, G. K. Gandhiadi, and L. P. I. Harini, "Implementasi backpropagation neural network dalam prakiraan cuaca di Daerah Bali Selatan," E-Jurnal Matematika, vol. 5, no. 4, pp. 126–132, 2016.
- [15] H. Alqourabah, A. Muneer, and S. M. Fati, "A smart fire detection system using iot technology with automatic water sprinkler," International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), vol. 11, no. 4, p. 2994, Aug. 2021, doi: 10.11591/ijece.v11i4.pp2994-3002.
- [16] R. Priantama, A. Maulana, M. R. D. Saputra, and F. Aulia, "Rancang Bangun IoT Sebagai Solusi Inovatif Revitalisasi Sampah Organik Di Desa Puncak," Buffer Informatika, vol. 10, no. 2, pp. 27–36, 2024.
- [17] L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito, "The Internet of Things: A survey," Computer Networks, vol. 54, no. 15, pp. 2787–2805, Oct. 2010, doi: 10.1016/j.comnet.2010.05.010.
- [18] T. Miller et al., "Integrating Artificial Intelligence Agents with the Internet of Things for Enhanced Environmental Monitoring: Applications in Water Quality and Climate Data," Electronics (Basel), vol. 14, no. 4, p. 696, Feb. 2025, doi: 10.3390/electronics14040696.
- [19] A. Bourechak, O. Zedadra, M. N. Kouahla, A. Guerrieri, H. Seridi, and G. Fortino, "At the Confluence of Artificial Intelligence and Edge Computing in IoT-Based Applications: A Review and New Perspectives," Sensors, vol. 23, no. 3, p. 1639, Feb. 2023, doi: 10.3390/s23031639.