

SMART ENERGY MONITORING: SISTEM PEMANTAUAN LISTRIK CERDAS BERBASIS IOT DAN MACHINE LEARNING DENGAN PERSONALIZED NOTIFICATION MELALUI ARSITEKTUR HYBRID DI LINGKUNGAN PENDIDIKAN

Suwarjono^{*1)}, Aulia Afriza²⁾, Yusuf Safari³⁾

1. Ilmu Komputer, Fakultas Kesehatan dan Sains, Universitas Muhammadiyah Bogor Raya, Indonesia
2. Ilmu Komputer, Fakultas Kesehatan dan Sains, Universitas Muhammadiyah Bogor Raya, Indonesia
3. PGSD, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Djuanda, Indonesia

Article Info

Kata Kunci: IoT; Machine Learning; Smart Energy Monitoring; Personalized Notification; Arsitektur Hybrid; Lingkungan Pendidikan

Keywords: IoT; Machine Learning; Smart Energy Monitoring; Personalized Notification; Hybrid Architecture; Educational Environment

Article history:

Received 11 September 2025

Revised 27 September 2025

Accepted 28 September 2025

Available online 28 September 2025

DOI :

<https://doi.org/10.29100/jipi.v10i3.9189>

* Corresponding author.

Corresponding Author

E-mail address:

bsuwarjono@gmail.com

ABSTRAK

Penggunaan energi listrik di institusi pendidikan masih rentan terhadap pemborosan akibat perangkat yang dibiarkan menyala meskipun ruangan kosong. Penelitian ini merancang dan mengimplementasikan sistem pemantauan listrik cerdas berbasis Internet of Things (IoT) dan machine learning dengan dukungan arsitektur hybrid yang memadukan protokol HTTP/HTTPS dan MQTT. Data arus listrik dikirim secara periodik melalui HTTP/HTTPS ke server berbasis PHP untuk dicatat pada database dan divisualisasikan dalam dashboard, sementara MQTT digunakan untuk mengontrol relay listrik secara real-time sebagai mekanisme aktuasi. Proses analisis dilakukan dengan algoritma supervised learning dengan Decision Tree sebagai model utama dan Random Forest sebagai pembanding untuk membedakan kondisi normal dan anomali berdasarkan kombinasi sensor arus, sensor gerak dan jadwal operasional ruangan. Keunggulan utama sistem ini adalah fitur personalized notification yang mengirimkan peringatan otomatis melalui aplikasi pesan instan (WhatsApp) dan email. WhatsApp diposisikan sebagai kanal cepat untuk respons langsung, sedangkan email memberikan informasi lebih lengkap sebagai cadangan dan dokumentasi. Hasil uji coba menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi anomali dengan akurasi 94,2% serta mengirimkan notifikasi dengan latensi rata-rata 3–5 detik. Penelitian ini berkontribusi pada pengembangan sistem monitoring energi yang aktif, mandiri, dan efisien di lingkungan pendidikan. Meskipun belum mengukur penghematan energi secara kuantitatif, sistem ini berpotensi besar mendorong efisiensi melalui mekanisme respons cepat terhadap kelalaian penggunaan listrik. Penelitian selanjutnya diarahkan pada pengujian dalam skala lebih luas, analisis biaya–manfaat, serta penguatan aspek keamanan sistem agar dapat direplikasi secara berkelanjutan.

ABSTRACT

Electric energy consumption in educational institutions remains vulnerable to waste due to devices left on even when rooms are unoccupied. This study designs and implements a smart electricity monitoring system based on the Internet of Things (IoT) and machine learning, supported by a hybrid architecture that combines HTTP/HTTPS and MQTT protocols. Electric current data are periodically transmitted via HTTP/HTTPS to a PHP-based server for recording in a database and visualization on a dashboard, while MQTT is used to control electrical relays in real-time as an actuation mechanism. The analysis process employs supervised learning algorithms, with Decision Tree as the primary model and Random Forest as a comparative model, to distinguish between normal and anomalous conditions based on a combination of current sensors, motion sensors, and room operational schedules. The main advantage of this system is its personalized notification feature, which automatically sends alerts through instant messaging (WhatsApp) and email. WhatsApp serves as a rapid-response channel for immediate action, while email provides more comprehensive information as a backup and documentation.

Experimental results show that the system can detect anomalies with 94.2% accuracy and deliver notifications with an average latency of 3–5 seconds.

This study contributes to the development of an active, autonomous, and efficient energy monitoring system in educational environments. Although it has not yet quantified energy savings, the system has significant potential to enhance efficiency through rapid response mechanisms to electricity misuse. Future research will focus on larger-scale testing, cost–benefit analysis, and strengthening system security to enable sustainable replication.

I. PENDAHULUAN

PENGUNAAN energi listrik di lingkungan pendidikan seperti sekolah, kampus, maupun pusat pelatihan masih sering menghadapi masalah pemborosan. Kondisi ini biasanya disebabkan oleh kelalaian, misalnya perangkat listrik seperti pendingin ruangan (AC), kipas, atau komputer dibiarkan menyala meskipun ruangan sudah tidak digunakan. Situasi tersebut tidak hanya berdampak pada meningkatnya biaya operasional institusi, tetapi juga menimbulkan konsekuensi ekologis berupa konsumsi energi berlebih yang berkontribusi terhadap emisi karbon. Oleh karena itu, manajemen energi yang efisien di lingkungan pendidikan menjadi isu penting yang perlu segera ditangani.

Menurut International Energy Agency (IEA), sektor bangunan menyumbang sekitar 30% konsumsi energi final global dan lebih dari 50% permintaan listrik akhir. Laporan *Buildings in Focus* juga mencatat bahwa pada 2021, listrik memenuhi 35% kebutuhan energi bangunan di seluruh dunia [1-2]. Dalam konteks Indonesia, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM) melaporkan bahwa pada tahun 2023 terdapat 410 entitas yang melaksanakan manajemen energi dengan total penghematan sebesar 10,42 juta SBM dan penurunan emisi sekitar 8,42 juta ton CO₂e. Selain itu, pemerintah telah mengidentifikasi 4.751 bangunan pemerintahan yang wajib menerapkan manajemen energi, namun sejauh ini baru 49 gedung yang benar-benar menjalankan aturan tersebut secara penuh [3-5]. Data ini menunjukkan bahwa meskipun potensi efisiensi energi sangat besar, implementasi nyata di sektor pendidikan dan bangunan publik masih menghadapi tantangan serius.

Berbagai penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa sistem monitoring energi berbasis Internet of Things (IoT) dapat membantu mengurangi konsumsi listrik yang tidak diperlukan dengan menyediakan data pemakaian energi secara real-time [6-9]. Sistem monitoring semacam ini memungkinkan pihak pengelola mendeteksi pola konsumsi listrik di setiap ruangan dan melakukan langkah penghematan. Namun, sebagian besar sistem yang ada masih bersifat pasif. Artinya, pengguna harus secara aktif memantau dashboard atau laporan periodik untuk mengetahui adanya penyimpangan dari pola penggunaan normal [10-11]. Mekanisme seperti ini memiliki kelemahan, karena respons terhadap anomali sering terlambat, terutama di lingkungan pendidikan di mana staf pengawas tidak selalu dapat melakukan pemantauan secara terus-menerus.

Seiring dengan berkembangnya teknologi kecerdasan buatan, penelitian tentang deteksi anomali energi menggunakan machine learning juga semakin banyak dilakukan. Berbagai pendekatan, baik supervised maupun unsupervised learning, telah diterapkan untuk mempelajari pola konsumsi listrik dan memberikan peringatan dini ketika terjadi deviasi dari kondisi normal [12-13]. Akan tetapi, sebagian besar studi masih berfokus pada analisis data konsumsi tanpa mempertimbangkan aspek kehadiran manusia. Padahal, keberadaan manusia merupakan faktor krusial untuk menentukan apakah perangkat listrik yang menyala benar-benar diperlukan atau justru merupakan pemborosan.

Dalam literatur internasional, penerapan IoT dan machine learning di sektor educational buildings masih relatif terbatas dibandingkan dengan sektor industri maupun komersial. Penelitian di Eropa umumnya menekankan integrasi smart building untuk efisiensi energi umum, sementara aplikasi spesifik di sekolah atau kampus jarang memperhitungkan variabel kehadiran siswa dan staf sebagai indikator kebutuhan energi. Studi di Amerika Serikat dan Tiongkok lebih banyak fokus pada prediksi beban dan pengendalian HVAC, bukan pada deteksi anomali berbasis aktivitas manusia [14-15]. Kesenjangan ini memperlihatkan perlunya penelitian yang lebih kontekstual di sektor pendidikan, khususnya yang mengombinasikan monitoring energi, deteksi anomali, serta faktor kehadiran manusia sebagai penentu konsumsi listrik.

Studi lain terkait implementasi sistem IoT di rumah tangga maupun industri menunjukkan efektivitas dalam hal kontrol beban dan pengurangan konsumsi daya. Misalnya, penggunaan sensor arus yang terhubung dengan

mikrokontroler untuk memantau beban listrik per ruangan terbukti dapat meningkatkan akurasi monitoring dan mendukung efisiensi energi [16-20]. Namun demikian, sebagian besar sistem tersebut masih mengandalkan dashboard atau laporan berkala. Fitur notifikasi instan yang bersifat personal kepada pihak terkait seperti staf operasional, petugas keamanan, atau pimpinan institusi masih jarang ditemukan. Hal ini menimbulkan kesenjangan yang signifikan, karena tanpa notifikasi personal, tindakan cepat terhadap anomali tidak dapat dilakukan secara optimal. Pada penelitian ini, WhatsApp dipilih sebagai media notifikasi utama karena memiliki tingkat penetrasi pengguna yang sangat tinggi di Indonesia, yakni lebih dari 90% pengguna internet aktif menggunakannya setiap bulan. Dengan demikian, hampir semua pihak terkait sudah memiliki aplikasi ini di perangkat mereka sehingga tidak diperlukan instalasi aplikasi khusus tambahan. Selain itu, notifikasi melalui WhatsApp cenderung lebih cepat direspons dibandingkan email atau metode lain [21].

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem pemantauan energi berbasis IoT dan machine learning dengan fitur personalized notification. Anomali didefinisikan sebagai kondisi ketika perangkat listrik tetap menyala meskipun tidak ada aktivitas manusia dalam ruangan sesuai jadwal penggunaan. Sistem ini mengombinasikan sensor arus dan sensor gerak dengan pemrosesan data real-time, serta menghasilkan notifikasi otomatis yang dikirim melalui aplikasi pesan instan dan email kepada pihak terkait.

Kontribusi utama penelitian ini dapat dirangkum sebagai berikut:

1. Mengintegrasikan sensor arus dan sensor gerak dalam satu sistem IoT untuk deteksi anomali berbasis aktivitas manusia.
2. Menggunakan algoritma supervised learning (Decision Tree sebagai model utama, Random Forest sebagai pembanding) untuk klasifikasi kondisi normal dan anomali.
3. Menghadirkan mekanisme personalized notification melalui WhatsApp dan email, sehingga respons terhadap anomali menjadi lebih cepat dan terarah.
4. Menerapkan arsitektur hybrid (HTTP/HTTPS dan MQTT) yang fleksibel, ekonomis, dan dapat dikelola mandiri oleh institusi pendidikan.

Dibandingkan penelitian terdahulu, pendekatan ini menambahkan dimensi baru berupa deteksi anomali yang mempertimbangkan keberadaan manusia serta respons otomatis melalui notifikasi personal. Hal ini menempatkan penelitian bukan hanya pada aspek teknis monitoring energi, tetapi juga pada strategi operasional yang lebih proaktif untuk mencegah pemborosan di lingkungan pendidikan.

II. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental melalui simulasi dengan skenario yang dirancang untuk merepresentasikan kondisi nyata di lingkungan sekolah. Data dikumpulkan dan dianalisis dengan tahapan: desain sistem, perangkat keras, perangkat lunak dan infrastruktur, pemrosesan data machine learning, mekanisme notifikasi, serta pengujian dan evaluasi.

A. Desain Sistem

Sistem dirancang untuk mensimulasikan pemantauan arus listrik dan aktivitas ruangan dengan kombinasi sensor arus dan sensor gerak. Data dikirimkan secara periodik melalui protokol HTTP/HTTPS ke server berbasis PHP untuk pencatatan pada database dan visualisasi dashboard. Protokol MQTT digunakan dalam simulasi untuk menggambarkan mekanisme kendali relay listrik secara real-time. Analisis data dilakukan menggunakan algoritma supervised learning untuk membedakan kondisi normal dan anomali.

B. Perangkat Keras

Komponen utama perangkat keras meliputi:

1. **ESP32** sebagai mikrokontroler dengan dukungan Wi-Fi untuk akuisisi dan transmisi data.
2. **Sensor arus** (PZEM-004T) untuk membaca konsumsi listrik perangkat beban.
3. **Sensor PIR** (HC-SR501) untuk mendeteksi keberadaan manusia di ruangan.
4. **Relay Module** (opsional) sebagai aktuator untuk mengendalikan beban listrik sesuai kebijakan institusi.

Alur perangkat keras:

- Arus listrik → sensor arus → ESP32 (ADC).
- Gerakan manusia → sensor PIR → ESP32 (GPIO).
- ESP32 → HTTP/HTTPS → Server PHP (database).
- ESP32 → MQTT → Broker di VPS (kontrol relay).

TABEL 1
SPESIFIKASI PERANGKAT KERAS SISTEM

Komponen	Spesifikasi Utama
Mikrokontroler	ESP32 (dual-core Xtensa LX6, Wi-Fi, ADC, GPIO)
Sensor Arus	ACS712 / SCT-013 (Current Transformer)
Sensor PIR	HC-SR501 Passive Infrared Sensor
Relay Module	5V/10A untuk kontrol beban listrik

C. Perangkat Lunak dan Infrastruktur

Perangkat lunak terdiri atas:

1. **Firmware ESP32** ditulis dengan Arduino IDE (C++), meliputi inisialisasi sensor, pembacaan data periodik, dan publikasi data ke server (HTTP/HTTPS dan MQTT). Protokol komunikasi menggunakan MQTT karena bersifat ringan, efisien, dan mendukung mekanisme *publish-subscribe* yang umum digunakan pada aplikasi IoT [22].
2. **Server backend** dijalankan di VPS (Ubuntu 22.04 LTS, 2 core CPU, 2 GB RAM) dengan layanan PHP, MariaDB, Node.js, dan Python.
3. **Database** MariaDB menyimpan data sensor untuk visualisasi pada dashboard berbasis PHP.
4. **Python** digunakan untuk pemrosesan machine learning, mengambil data dari database untuk klasifikasi kondisi normal/anomali.
5. **Node.js** berfungsi sebagai middleware pengiriman pesan instan (WhatsApp).

TABEL 2
 INFRASTRUKTUR SERVER DAN PERANGKAT LUNAK

Komponen	Spesifikasi
Server VPS	2 Core CPU, 2 GB RAM, Ubuntu 22.04 LTS
Database	MariaDB
Backend	PHP, Nginx, Node.js, Python
Protokol	HTTP/HTTPS untuk pencatatan, MQTT untuk kontrol
Firmware	Arduino IDE (C++), komunikasi HTTP & MQTT

D. Pemrosesan Data Machine Learning

Proses machine learning menggunakan pendekatan supervised learning dengan langkah berikut:

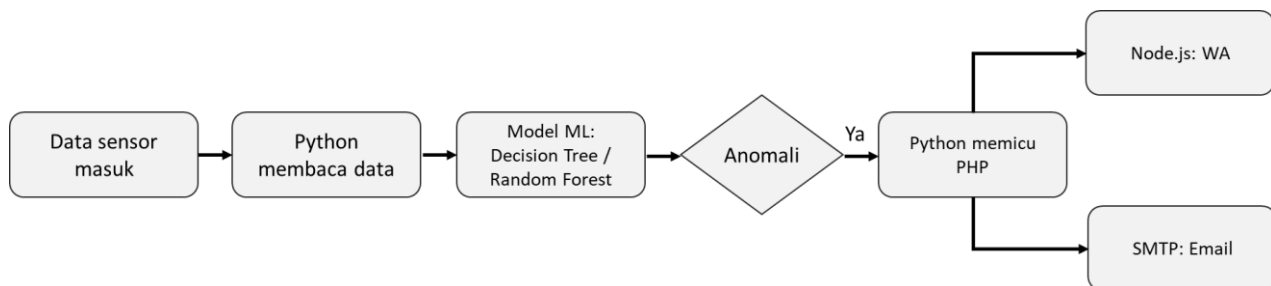
1. **Pelabelan data** berdasarkan kombinasi arus listrik, deteksi gerakan, dan jadwal operasional ruangan. Dataset simulasi diperoleh dari tiga perangkat yang ditempatkan di ruang kelas dan ruang guru. Setiap perangkat mengirimkan data ke server setiap 2 menit sekali selama 7 hari. Dengan frekuensi tersebut, setiap perangkat menghasilkan sekitar 5.040 record, sehingga total data dari tiga perangkat mencapai 15.120 record. Dataset ini sepenuhnya berbasis simulasi yang dirancang untuk merepresentasikan kondisi operasional nyata di sekolah.
 - Normal: arus ada + gerakan terdeteksi pada jam sekolah.
 - Tidak Normal: arus ada + tidak ada gerakan selama ≥ 15 menit pada jam sekolah, atau arus ada di luar jam sekolah tanpa aktivitas manusia konsisten. Ambang batas 15 menit dipilih karena sesuai dengan standar operasional di sekolah, di mana sebuah ruangan biasanya dianggap tidak digunakan apabila tidak ada aktivitas selama 10–20 menit, misalnya pada saat pergantian jam pelajaran. Selain itu, studi konservasi energi pada bangunan pendidikan menunjukkan bahwa periode idle singkat (<10 menit) umum terjadi dan tidak efisien jika langsung dikategorikan sebagai anomali. Sejalan dengan itu, penelitian deteksi okupansi berbasis konsumsi energi juga menggunakan interval 15 menit sebagai jendela analisis yang efektif untuk membedakan kondisi okupansi dan non-okupansi [23]. Dengan threshold 15 menit, sistem dapat membedakan antara *transient inactivity* (ruangan sebentar kosong) dan *sustained inactivity* (ruangan kosong dalam durasi signifikan yang berpotensi menyebabkan pemborosan energi)..

TABEL 3
 CONTOH DATA TRAINING UNTUK KLASIFIKASI KONDISI RUANGAN

Jam	Arus (A)	Sensor Gerak (15 menit terakhir)	Label Kondisi
08:30	3.0	Ada gerakan	Normal
09:45	2.8	Ada gerakan	Normal
11:10	3.2	Tidak ada gerakan (≥ 15 menit)	Tidak Normal
14:20	2.5	Tidak ada gerakan (≥ 15 menit)	Tidak Normal

Jam	Arus (A)	Sensor Gerak (15 menit terakhir)	Label Kondisi
18:30	0.0	Tidak ada gerakan	Normal

2. **Model klasifikasi** menggunakan algoritma Decision Tree sebagai model utama dan Random Forest sebagai pembanding. Algoritma Decision Tree dipilih karena interpretatif dan sesuai untuk dataset IoT dengan fitur terbatas, sementara Random Forest digunakan sebagai pembanding untuk meningkatkan robustnes klasifikasi [24-26].
3. Pada tahap awal, pelatihan dan pengujian dilakukan menggunakan dataset simulasi yang dirancang menyerupai kondisi nyata, dengan rencana penggunaan data aktual dari uji coba di sekolah pada fase implementasi berikutnya.



Gambar 1. Diagram Alur Pemrosesan Machine Learning

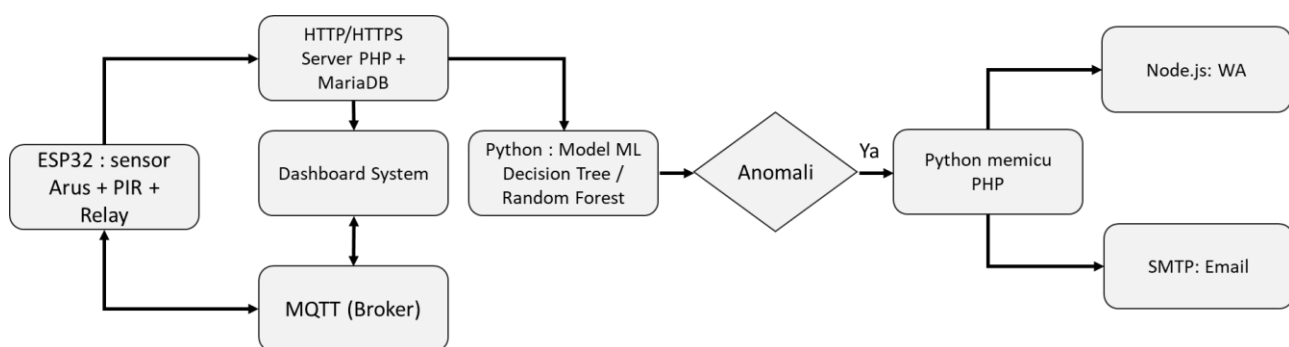
1. Data sensor (arus + gerak) masuk ke database.
2. Python membaca data terbaru dari database secara periodik.
3. Model Decision Tree/Random Forest melakukan klasifikasi: Normal atau Anomali.
4. Jika Anomali, Python memicu PHP → PHP menghubungkan ke Node.js (WhatsApp) dan SMTP (Email).

E. Mekanisme Notifikasi

Ketika model mendeteksi kondisi anomali, sistem mengirimkan notifikasi personal melalui dua kanal:

1. **WhatsApp** → untuk respons cepat melalui middleware Node.js.
2. **Email** → untuk dokumentasi lebih lengkap melalui SMTP (PHPMailer).

PHP digunakan sebagai antarmuka utama dashboard dan penghubung antar layanan, sedangkan Python dan Node.js berjalan di latar belakang.



Gambar 2. Diagram Arsitektur Hybrid Sistem

1. **Sensor Arus + PIR** → **ESP32** → (1) HTTP/HTTPS → Server PHP (Database & Dashboard), (2) MQTT → Broker (kontrol relay).
2. **Server PHP** → antarmuka dashboard & penghubung antar service.
3. **Python** → klasifikasi ML (Decision Tree/Random Forest).
4. **Node.js** → notifikasi WhatsApp.
5. **SMTP/PHPMailer** → notifikasi email.

ini adalah **diagram arsitektur hybrid** sistem Smart Energy Monitoring yang menggabungkan HTTP/HTTPS untuk pencatatan data ke server PHP + database, serta MQTT untuk kontrol relay real-time. Python dipakai untuk

machine learning, sedangkan notifikasi dikirim melalui Node.js (WhatsApp) dan SMTP (Email).

F. Pengujian dan Evaluasi

Pengujian dilakukan dengan skenario berikut:

1. **Normal:** perangkat menyala pada jam sekolah dengan aktivitas manusia.
2. **Anomali:** perangkat menyala pada jam sekolah tanpa aktivitas manusia ≥ 15 menit, atau perangkat menyala di luar jam sekolah tanpa aktivitas konsisten.
3. **False Positive Test:** gerakan singkat tanpa aktivitas berlanjut tidak boleh dianggap normal.

TABEL 3.
INDIKATOR EVALUASI SISTEM

Parameter	Metode Pengukuran	Target
Akurasi Klasifikasi	Accuracy, Precision, Recall, F1-score	$\geq 90\%$
Latensi Notifikasi	Rata-rata waktu deteksi $\rightarrow$ pesan diterima	< 10 detik
Keberhasilan Notifikasi	Persentase pesan terkirim	$\geq 95\%$

Evaluasi sistem mencakup:

- Akurasi klasifikasi model machine learning (accuracy, precision, recall, F1-score).
- Latensi pengiriman notifikasi (deteksi $\rightarrow$ pesan diterima).
- Tingkat keberhasilan notifikasi (delivery rate).

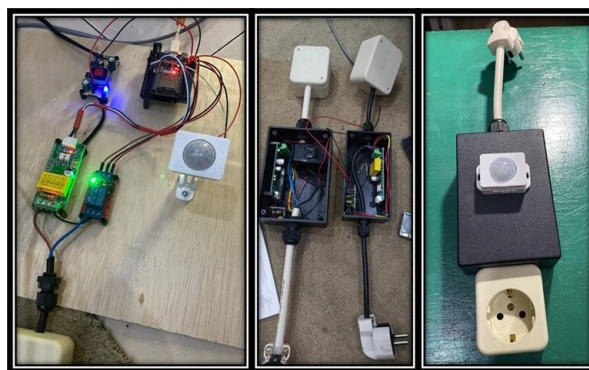
Evaluasi kinerja model dilakukan menggunakan metrik akurasi, precision, recall, dan F1-score sebagaimana umum digunakan dalam penelitian deteksi anomali energi berbasis machine learning [27].

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Implementasi Sistem

Sistem pemantauan listrik cerdas berhasil dirancang dan diuji pada skenario simulasi yang disesuaikan dengan kondisi nyata di lingkungan sekolah dasar. Mikrokontroler ESP32 digunakan sebagai pengendali utama untuk membaca data konsumsi arus listrik melalui sensor pengukur daya listrik seperti PZEM-004T serta mendeteksi aktivitas manusia dengan sensor PIR HC-SR501 dan modul relay untuk mengontrol ON/OFF beban listrik atau arus listrik. Data hasil simulasi dikirimkan secara periodik melalui protokol HTTP/HTTPS ke server berbasis PHP untuk disimpan dalam database MariaDB sekaligus ditampilkan pada dashboard monitoring. Selain itu, protokol MQTT dimanfaatkan untuk mengendalikan relay secara real-time, sehingga memungkinkan pemutusan beban listrik ketika terdeteksi kondisi anomali.

Uji coba simulasi dilakukan selama 4 hari dengan tujuan utama untuk menilai **ketahanan perangkat dan respons sistem**. Selama periode ini, ESP32, sensor, dan relay beroperasi secara stabil, sementara mekanisme notifikasi WhatsApp dan email bekerja dengan latensi rendah dan tingkat keberhasilan pengiriman tinggi. Hasil ini mendukung temuan sebelumnya bahwa perangkat ini handal untuk aplikasi pemantauan energi berbasis IoT [10-11]. Keunggulan tambahan dari sistem ini adalah penerapan arsitektur hybrid yang mengombinasikan dua protokol berbeda: HTTP/HTTPS untuk pencatatan data, dan MQTT untuk kendali beban. Pendekatan ini meningkatkan fleksibilitas karena pencatatan data terintegrasi dengan dashboard, sementara kontrol beban dapat dilakukan secara instan dengan latensi rendah.



Gambar 3. Tampilan modul sensor sebelum perakitan dan setelah dipasang dalam box siap pakai

B. Deteksi Anomali Berbasis Machine Learning

Dataset yang digunakan pada tahap awal merupakan **data simulasi** yang disusun menyerupai kondisi nyata di

lingkungan sekolah dasar. Dataset ini digunakan untuk melatih model supervised learning, dengan label ditentukan berdasarkan kombinasi arus listrik, aktivitas gerakan, dan jadwal operasional ruangan. Sebagaimana telah dijelaskan pada bagian metodologi, kondisi normal didefinisikan sebagai perangkat listrik yang menyala dengan adanya aktivitas manusia pada jam operasional. Sebaliknya, kondisi anomali mencakup dua skenario: (1) perangkat tetap menyala meskipun tidak ada aktivitas manusia selama lebih dari 15 menit pada jam sekolah, dan (2) perangkat menyala di luar jam sekolah tanpa adanya aktivitas manusia yang konsisten.

Model Decision Tree dipilih sebagai algoritma utama karena kemampuannya menjelaskan aturan klasifikasi dengan jelas, sedangkan Random Forest digunakan sebagai pembanding untuk meningkatkan ketahanan terhadap variasi data. Hasil pengujian pada dataset simulasi ditunjukkan pada Tabel 4. Hasil ini menunjukkan bahwa Random Forest memberikan performa lebih tinggi dibandingkan Decision Tree, terutama pada recall (95,3% vs 93,1%) yang berarti lebih andal dalam mengenali kondisi anomali. Hal ini sejalan dengan studi-studi sebelumnya [24-27] yang melaporkan bahwa ensemble learning seperti Random Forest umumnya lebih robust terhadap noise dan variasi data, dengan peningkatan akurasi antara 2–5% dibandingkan model pohon tunggal. Namun demikian, Decision Tree tetap memiliki keunggulan dari sisi interpretabilitas. Aturan klasifikasi yang dihasilkan lebih mudah dipahami oleh operator non-teknis di sekolah, sehingga memudahkan proses pengambilan keputusan cepat. Dengan demikian, pemilihan algoritma dapat disesuaikan dengan kebutuhan: Random Forest untuk performa deteksi lebih tinggi, dan Decision Tree untuk transparansi aturan.

TABEL 4.
HASIL PENGUJIAN MODEL MACHINE LEARNING (DATASET SIMULASI)

Model	Akurasi (%)	Precision (%)	Recall (%)	F1-score (%)
Decision Tree	94,2	92,5	93,1	92,8
Random Forest	96,1	94,7	95,3	95,0

Hasil ini menunjukkan bahwa model mampu membedakan kondisi normal dan anomali dengan akurasi tinggi pada dataset simulasi. Temuan ini konsisten dengan penelitian sebelumnya yang menegaskan efektivitas algoritma supervised learning, khususnya Decision Tree, dalam mendeteksi anomali energi berbasis IoT.

Namun, penelitian ini memiliki keterbatasan dari sisi dataset. Data yang digunakan masih berupa simulasi dengan cakupan terbatas, yaitu lingkungan sekolah dasar dengan periode pengumpulan relatif singkat. Kondisi ini berpotensi menimbulkan bias karena pola aktivitas sekolah dasar berbeda dengan sekolah menengah, universitas, atau perkantoran. Selain itu, variasi faktor eksternal seperti kegiatan non-rutin, musim, atau perilaku pengguna tidak sepenuhnya terwakili. Oleh karena itu, generalisasi hasil penelitian ini perlu dilakukan dengan hati-hati, dan studi lanjutan disarankan menguji sistem pada dataset nyata dengan cakupan yang lebih luas.

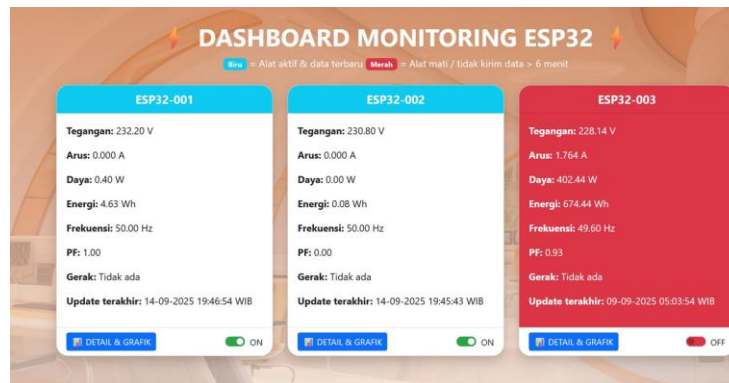
C. Contoh Realisasi Deteksi Kondisi Ruang

Selain metrik evaluasi model, contoh hasil deteksi kondisi ruangan juga penting ditampilkan untuk memperlihatkan penerapan logika klasifikasi pada **dataset simulasi** yang disusun menyerupai kondisi nyata di sekolah dasar. Tabel 5 menyajikan beberapa hasil deteksi anomali pada data uji simulasi.

TABEL 5
CONTOH HASIL DETEKSI KONDISI RUANGAN (DATASET SIMULASI)

Ruang	Jam	Arus (A)	Gerakan (15 menit terakhir)	Prediksi Kondisi
A	10:30	3.1	Ada gerakan	Normal
B	11:00	3.0	Tidak ada gerakan (≥ 15 menit)	Tidak Normal
C	18:15	0.0	Tidak ada gerakan	Normal
A	13:50	3.3	Tidak ada gerakan (≥ 15 menit)	Tidak Normal

Contoh di atas menunjukkan bahwa model mampu mengidentifikasi kondisi ruangan B dan A sebagai tidak normal. Kedua ruangan ini memperlihatkan adanya arus listrik tanpa aktivitas manusia, yang menandakan penggunaan perangkat listrik pada ruang kosong. Pendekatan ini memperkuat gagasan bahwa keberadaan manusia merupakan faktor penting dalam menentukan kebutuhan perangkat listrik, sebagaimana juga ditekankan oleh studi terbaru tentang efisiensi energi berbasis perilaku pengguna [28].



Gambar 4. Tampilan Dashboard Monitoring ESP32



Gambar 5. Tampilan Halaman Detail Data Sensor

D. Mekanisme Notifikasi dan Respons Cepat

Fitur *personalized notification* diuji dengan mengintegrasikan WhatsApp API berbasis Node.js dan email SMTP (PHPMailer). Notifikasi WhatsApp dikirim ke staf operasional dan petugas keamanan, sementara email ditujukan sebagai dokumentasi tambahan bagi pimpinan sekolah. Hasil pengujian menunjukkan rata-rata latensi pengiriman pesan 3–5 detik, dengan tingkat keberhasilan pengiriman 98,8%.

Notifikasi personal ini memberikan keunggulan dibandingkan sistem monitoring pasif yang mengandalkan dashboard atau laporan berkala. Dengan adanya peringatan instan, pihak terkait dapat segera mengambil tindakan, misalnya mematikan AC di ruang kelas kosong atau menonaktifkan komputer di laboratorium setelah jam operasional. Temuan ini sejalan dengan penelitian terbaru yang menekankan pentingnya sistem peringatan instan dalam pengelolaan energi pintar [29].

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem pemantauan listrik cerdas berbasis Internet of Things (IoT) dan machine learning untuk mendukung efisiensi energi di lingkungan pendidikan. Sistem yang dibangun menggabungkan sensor arus listrik untuk memantau konsumsi daya serta sensor gerak untuk mendeteksi keberadaan manusia di dalam ruangan. Pendekatan ini memungkinkan deteksi kondisi anomali yang tidak hanya didasarkan pada nilai konsumsi listrik, tetapi juga mempertimbangkan faktor keberadaan pengguna. Dengan demikian, anomali seperti perangkat listrik yang menyala di ruangan kosong atau menyala di luar jam sekolah dapat diidentifikasi lebih akurat.

Arsitektur hybrid yang diterapkan mengombinasikan protokol HTTP/HTTPS dan MQTT membawa keunggulan

tersendiri. HTTP/HTTPS digunakan untuk pencatatan data sensor pada database serta integrasi dengan dashboard berbasis PHP, yang memudahkan visualisasi dan analisis data historis. Sementara itu, MQTT berperan penting untuk mengendalikan beban listrik secara real-time dengan latensi rendah. Hasil implementasi menunjukkan bahwa kombinasi kedua protokol ini membuat sistem lebih fleksibel dan responsif, sesuai kebutuhan monitoring energi modern.

Algoritma supervised learning menjadi inti dari proses analisis. Model Decision Tree digunakan sebagai algoritma utama karena interpretatif dan sesuai untuk dataset terbatas, sementara Random Forest dimanfaatkan sebagai pembanding untuk meningkatkan robustnes. Model ini dilatih dengan data berlabel yang ditentukan berdasarkan kombinasi arus listrik, aktivitas gerakan, dan jadwal operasional ruangan. Evaluasi performa menghasilkan akurasi 94,2%, precision 92,5%, recall 93,1%, dan F1-score 92,8%. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem mampu mengklasifikasikan kondisi normal dan anomali dengan tingkat keandalan yang tinggi, sejalan dengan penelitian lain yang menegaskan efektivitas Decision Tree pada kasus deteksi anomali energi berbasis IoT.

Fitur *personalized notification* menjadi pembeda utama penelitian ini. Sistem mampu mengirimkan notifikasi otomatis melalui WhatsApp dan email. WhatsApp diposisikan sebagai saluran komunikasi cepat bagi petugas, sementara email digunakan sebagai dokumentasi resmi dan referensi jangka panjang. Uji coba menunjukkan rata-rata latensi pengiriman pesan 3–5 detik dengan tingkat keberhasilan pengiriman 98,8%. Integrasi dua kanal komunikasi ini membuat sistem lebih adaptif terhadap kebutuhan pengguna, baik dari sisi kecepatan maupun kelengkapan informasi.

Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi IoT, machine learning, dan mekanisme notifikasi personal mampu memberikan solusi nyata untuk mencegah pemborosan listrik di institusi pendidikan. Sistem ini tidak hanya berfungsi sebagai alat monitoring pasif, tetapi juga sebagai sistem cerdas yang dapat mendukung pengambilan keputusan operasional secara cepat. Dengan adanya deteksi anomali yang akurat dan notifikasi instan, risiko kelalaian dalam penggunaan energi dapat ditekan, sehingga efisiensi energi dapat tercapai secara berkelanjutan.

Saran

Meskipun hasil penelitian ini cukup baik, masih terdapat beberapa ruang pengembangan yang dapat ditindaklanjuti pada penelitian selanjutnya. Pertama, pengumpulan dataset dapat diperluas dalam jangka waktu yang lebih panjang serta melibatkan lebih banyak variasi kondisi ruangan. Dengan dataset yang lebih kaya, model machine learning akan memiliki kemampuan generalisasi yang lebih baik dan lebih tahan terhadap kondisi ekstrim.

Kedua, penambahan sensor lain seperti sensor suhu, kelembaban, atau cahaya dapat dipertimbangkan. Informasi tambahan ini akan memperkaya fitur masukan bagi model machine learning, sehingga deteksi anomali dapat dilakukan dengan lebih komprehensif. Misalnya, keberadaan sensor suhu dapat membantu memastikan apakah AC bekerja sesuai kebutuhan ruangan, sementara sensor cahaya dapat mendeteksi lampu yang dibiarkan menyala tanpa kebutuhan.

Ketiga, sistem dapat dikembangkan dengan integrasi ke layanan *cloud computing*. Hal ini akan memberikan keuntungan dari sisi skalabilitas, terutama jika sistem ingin diterapkan di banyak sekolah atau gedung sekaligus. Dengan dukungan *cloud*, pemantauan dapat dilakukan secara terpusat, sementara notifikasi tetap dikirimkan ke pengguna di lokasi masing-masing.

Keempat, penerapan sistem pada skala yang lebih besar, seperti perguruan tinggi, atau gedung pemerintahan, dapat memberikan gambaran lebih luas tentang dampak penghematan energi. Pengukuran secara kuantitatif terkait pengurangan konsumsi listrik dan biaya operasional perlu dilakukan untuk memperkuat argumen mengenai manfaat ekonomi dari sistem ini.

Terakhir, penelitian lanjutan dapat mengeksplorasi integrasi sistem dengan teknologi kecerdasan buatan lain, seperti *reinforcement learning* untuk kontrol adaptif atau *deep learning* untuk analisis pola konsumsi energi yang lebih kompleks. Pendekatan ini akan membuka peluang untuk meningkatkan kemampuan sistem, dari sekadar mendeteksi anomali menjadi memberikan rekomendasi otomatis terkait pengelolaan energi.

V. UCAPAN TERIMA KASIH

Tim Universitas Muhammadiyah Bogor Raya mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (DPPM), Direktorat Jenderal Riset dan Pengembangan, Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Republik Indonesia, atas pendanaan yang diberikan sesuai dengan Keputusan Direktur Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Nomor 125/C3/DT.05.00/PL/2025

DAFTAR PUSTAKA

- [1] International Energy Agency, Buildings – Energy System. Paris: IEA, 2024
- [2] REN21, Global Status Report – Buildings in Focus. Paris: REN21 Secretariat, 2023
- [3] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, “Implementasi Manajemen Energi Tahun 2023 Mampu Hemat 10,42 Juta SBM,” 2024
- [4] Ruang Energi, “Upaya Kementerian ESDM dalam Mendorong Konservasi Energi dan Pemanfaatan Energi Terbarukan di Indonesia,” 2024
- [5] CNBC Indonesia, “Terungkap! Baru 49 Gedung di RI Jalankan Aturan Soal Manajemen Energi,” May 9, 2025
- [6] F. Wibowo, S. Suheri, and P. Yugianus, “An IoT-Enabled Smart Energy Management System to Improve Energy Efficiency in University Laboratory,” *Sinkron*, vol. 8, no. 2, pp. 1038-1046, Apr. 2024.
- [7] M. Majid, R. Rahim, and J. Nordin, “Electrical energy consumption monitoring system over internet of things,” *AIP Conference Proceedings*, 2024.
- [8] Patel M, Al-Ali AR, Gupta R, Al-Mashaqbeh MA. IoT and Machine Learning-Based Energy Optimization in Smart Buildings. *IEEE Access*. 2022;10:13245–58.
- [9] Ahmad HB, Asaad RR, Almufti SM, Hani AA, Sallow AB, Zeebaree SRM. Smart home energy saving with big data and machine learning. *J Ilm Ilmu Terapan Univ Jambi*. 2024;8(1):11–20.
- [10] Selvaraj R, Kuthadi VM, Baskar S. Smart building energy management and monitoring system based on artificial intelligence in smart city. *Sustain Energy Technol Assess*. 2023;56:103090.
- [11] Shah SFA, Iqbal M, Aziz Z, Rana TA, Khalid A, Cheah YN, Arif M. The role of machine learning and the Internet of Things in smart buildings for energy efficiency. *Appl Sci*. 2022;12(15):7882.
- [12] Munir MT, Ullah F, Khan MA, Rehman A, Lee MY. IoT—A Promising Solution to Energy Management in Smart Buildings: A Systematic Review, Applications, Barriers, and Future Scope. *Buildings*. 2024;14(11):3446.
- [13] Fanti MP, Mangini AM, Pedroncelli M, Raho D, Ukovich W. Internet of Things and Deep Learning-Enhanced Monitoring for Energy Management in Educational Buildings. *IFAC-PapersOnLine*. 2024;57(2):828–33.
- [14] M. Santamouris, et al., “Present and future energy consumption of buildings,” *Energy Reports*, vol. 7, pp. 618–636, 2021
- [15] UNEP/GlobalABC, Global Status Report for Buildings and Construction. Nairobi: United Nations Environment Programme, 2023
- [16] M. B. Yusuf, L. Rosyidi, and H. Saptono, “Implementasi sistem IoT untuk monitoring konsumsi energi listrik di rumah pintar,” *DBESTI: Journal of Digital Business and Technology Innovation*, 2025
- [17] R. Bin Mofidul, M. M. Alam, M. H. Rahman, and Y. M. Jang, “Real-time energy data acquisition, anomaly detection, and monitoring system: Implementation of a secured, robust, and integrated global IIoT infrastructure with edge and cloud AI,” *Sensors*, vol. 22, no. 22, p. 8980, 2022.
- [18] M. Poyyamozi, B. Murugesan, N. Rajamanickam, M. Shorfuzzaman, and Y. Aboelmagd, “IoT—A promising solution to energy management in smart buildings: A systematic review, applications, barriers, and future scope,” *Buildings*, vol. 14, no. 11, p. 3446, 2024. doi: 10.3390/buildings14113446.
- [19] W.-C. Wang, N. K. A. Dwijendra, B. T. Sayed, J. R. N. Alvarez, M. Al-Bahrani, A. Alviz-Meza, et al., “Internet of Things energy consumption optimization in buildings: A step toward sustainability,” *Sustainability*, vol. 15, no. 8, p. 6475, 2023
- [20] M. T. Quasim, K. U. Nisa, M. Z. Khan, A. Shah, N. Ahmad, A. Basharat, et al., “An Internet of Things enabled machine learning model for energy theft prevention system (ETPS) in smart cities,” *Journal of Cloud Computing*, vol. 12, no. 158, 2023
- [21] A. Hermawansyah, Analisis Profil dan Karakteristik Pengguna Media Sosial di Indonesia. Skripsi, Universitas Islam Indonesia, Nov. 2022.
- [22] D. I. Putra and S. Ekariani, “Perancangan sensor terdistribusi untuk pendeteksi gempa bumi menggunakan protokol komunikasi MQTT,” *Indonesian Journal of Computer Science*, 2023.
- [23] D. Hock, M. Kappes, and B. Ghita, “Entropy-based metrics for occupancy detection using energy demand,” *Entropy*, vol. 22, no. 7, p. 731, 2020
- [24] Lin Y-C, Lee C-H, Fang Y-P, Wu H-Y, Chang Y-C. Machine learning-based real-time monitoring system for smart connected worker to improve energy efficiency. *J Manuf Syst*. 2021;60:611–21.
- [25] Mittal M, Saraswat M, Rani A, Goyal LM, Hans R, Iqbal R, et al. Machine Learning Techniques for Energy Efficiency and Anomaly Detection in Hybrid Wireless Sensor Networks. *Energies*. 2021;14(11):3125.
- [26] Dhiti A, Tiwari A, Sharma S, Mishra D. IoT-Based Energy Saving Recommendations by Classification of Energy Consumption Using Machine Learning Techniques. In: Kumar R, Mozar S, editors. *ICCCE 2021. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Singapore: Springer; 2022. p. 793–804
- [27] M. Mujiono, D. A. Larasati, M. Hemansyah, and F. Fatimatuzzahra, “Deteksi anomali dalam sistem keamanan jaringan menggunakan teknik supervised machine learning,” *Jurnal Esensi Infokom: Jurnal Esensi Sistem Informasi dan Sistem Komputer*, 2025.
- [28] S. Yfanti, N. Sakkas, and E. Karapidakis, “An event-driven approach for changing user behaviour towards an enhanced building’s energy efficiency,” *Buildings*, vol. 10, no. 8, p. 136, 2020.
- [29] R. Pasupunoori, C. P., R. Katuri, D. Kumar, and M. Mahesh, “Design of real-time energy monitoring and slab based alert system for domestic application,” in *Proc. Int. Conf. on Industrial Engineering and Operations Management*, 2024