Inovasi IoT untuk Efisiensi Energi Listrik di Madrasah Tsanawiyah

Farhan Rezki Arifin, Hasrul Syafar Ibrahim, Nurmayanti Zain, Muh. Irham M, Abdul Hakim Udin, Lompo Ramos Emakarim, dan Ummu Khalsum*

Program Studi Teknik Elektro, Universitas Cokroaminoto Makassar

**Correspondent Author: nurmayanti.zain@ucm-si.ac.id*

***Abstract* — Electrical energy waste in madrasah environments often occurs due to the absence of a centralized monitoring system, causing electronic devices such as lamps and fans to remain active outside operational hours. This study aims to analyze the effectiveness of Internet of Things innovation in improving electrical energy efficiency at MTs DDI Al-Amin, Makassar. The method employed is a quantitative case study by comparing waste duration patterns before and after the implementation of IoT devices integrated with the Blynk platform and Telegram Bot. Prior to analysis, the instrument was validated by comparing system readings against reference measuring instruments, yielding error rates of 0.37% for voltage, 0% for current, and 0.43% for power. The simulation estimation results show that the duration of devices running idle decreased from 2.08 hours per day to 0.75 hours per day, yielding a net energy saving of 0.3325 kWh per day, equivalent to 8.645 kWh per month, with a monthly electricity cost reduction of approximately Rp11,239.00. The simulation of notification effectiveness through Telegram also indicates a potential increase in collective awareness. The primary constraint, wireless network fluctuations, can be mitigated through an auto-reconnection mechanism. This study concludes that IoT innovation serves not only as a remote control tool but also as an effective behavioral trigger for energy-saving habits in the madrasah environment.**

***Keyword* — Electricity consumption, energy efficiency, Internet of Things, madrasah, monitoring.**

Abstrak — Pemborosan energi listrik di lingkungan madrasah sering terjadi akibat tidak adanya sistem pengawasan terpusat, sehingga perangkat elektronik seperti lampu dan kipas angin kerap menyala di luar jam operasional. Penelitian ini bertujuan menganalisis efektivitas inovasi Internet of Things dalam meningkatkan efisiensi energi listrik di MTs DDI Al-Amin, Makassar. Metode yang digunakan adalah studi kasus kuantitatif dengan membandingkan pola durasi pemborosan sebelum dan sesudah implementasi perangkat IoT yang terintegrasi dengan platform Blynk dan Bot Telegram. Sebelum digunakan untuk analisis, instrumen terlebih dahulu divalidasi dengan membandingkan pembacaan sistem terhadap alat ukur referensi, yang menghasilkan tingkat galat sebesar 0,37% untuk tegangan, 0% untuk arus, dan 0,43% untuk daya. Hasil simulasi estimasi menunjukkan bahwa durasi perangkat menyala sia-sia menurun dari 2,08 jam per hari menjadi 0,75 jam per hari, yang menghasilkan penghematan energi bersih sebesar 0,3325 kWh per hari atau setara dengan 8,645 kWh per bulan, dengan pengurangan biaya listrik sekitar Rp11.239,00 per bulan. Simulasi efektivitas notifikasi melalui Telegram juga menunjukkan potensi peningkatan kesadaran kolektif. Kendala utama berupa fluktuasi jaringan nirkabel dapat diantisipasi melalui mekanisme pemulihan otomatis. Simpulan penelitian ini menegaskan bahwa inovasi IoT tidak hanya berfungsi sebagai sarana kontrol jarak jauh, tetapi juga sebagai pemicu perubahan perilaku hemat energi yang efektif di lingkungan madrasah.

Kata kunci — Efisiensi energi, Internet of Things, konsumsi energi listrik, madrasah, monitoring.

I. PENDAHULUAN

Pengelolaan energi listrik di institusi pendidikan menjadi salah satu komponen biaya operasional yang signifikan [1]. Seiring dengan meningkatnya jumlah peralatan elektronik penunjang kegiatan belajar mengajar, kebutuhan pasokan listrik di lingkungan sekolah terus mengalami kenaikan. Namun, upaya efisiensi energi kerap terkendala oleh keterbatasan sistem pengawasan dan faktor kelalaian manusia [2].

Berdasarkan observasi awal yang dilakukan di MTs DDI Al-Amin yang berlokasi di Kelurahan Manggala, Kecamatan Manggala, Kota Makassar, ditemukan kondisi bahwa lampu dan kipas angin di ruang guru sering dibiarkan menyala meskipun ruangan telah ditinggalkan, terutama pada jam istirahat dan setelah pukul 15.00 WITA. Aktivitas belajar mengajar yang padat membuat guru dan staf tidak selalu memiliki kesempatan untuk mengecek sakelar secara manual dari satu ruangan ke ruangan lainnya. Kondisi tersebut berpotensi meningkatkan konsumsi energi listrik karena perilaku pengguna memiliki pengaruh terhadap kinerja energi bangunan, khususnya dalam penggunaan sistem pencahayaan dan peralatan listrik [3] [4].

Penelitian terdahulu oleh Prayitno dkk. menunjukkan bahwa sistem monitoring dan kontrol berbasis Internet of Things (IoT) dapat memberikan kemudahan bagi pengguna dalam memantau dan mengendalikan penggunaan daya peralatan listrik [5]. Sementara itu, Setiawan dkk. mengembangkan sistem pemantauan konsumsi energi dengan visualisasi data secara real-time melalui aplikasi Blynk [6]. Hasil penelitian tersebut menunjukkan potensi IoT dalam meningkatkan kemampuan pengguna untuk memantau konsumsi energi sekaligus melakukan pengendalian peralatan listrik dari jarak jauh. Namun, penelitian-penelitian tersebut umumnya masih menitikberatkan pada aspek perancangan dan validasi teknis sistem, sedangkan evaluasi penerapan sistem dalam kondisi operasional nyata, khususnya terkait perubahan perilaku pengguna dan kendala infrastruktur pada institusi pendidikan, masih terbatas.

Keterbatasan pemantauan konsumsi energi secara rinci di lingkungan madrasah dapat menyebabkan penggunaan listrik

yang tidak efisien sulit diidentifikasi. Kondisi tersebut semakin menjadi perhatian ketika peralatan listrik, seperti lampu dan kipas angin, tetap beroperasi meskipun ruangan sudah tidak digunakan. Oleh karena itu, diperlukan sistem yang tidak hanya mampu memantau dan mengendalikan konsumsi daya, tetapi juga memberikan pengingat kepada pengguna secara aktif. Penelitian ini mengusulkan penerapan sistem IoT dengan pemantauan konsumsi energi secara real-time, kendali peralatan listrik, serta notifikasi melalui Telegram sebagai sarana pengingat bagi staf madrasah.

Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang lebih berorientasi pada kinerja teknis perangkat [7]-[9], penelitian ini juga mengevaluasi penerapan sistem berdasarkan kondisi operasional di lingkungan madrasah. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan durasi pemborosan energi sebelum dan sesudah penerapan sistem, menghitung potensi penghematan biaya listrik, serta menganalisis respons pengguna terhadap notifikasi Telegram sebagai mekanisme pengingat. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya menilai kemampuan sistem dalam melakukan monitoring dan kontrol, tetapi juga mengkaji kontribusinya terhadap efisiensi penggunaan energi dan peningkatan kesadaran pengguna dalam menghemat energi listrik.

II. Tinjauan Pustaka

Konsep *Internet of Things (IoT)* telah mentransformasi paradigma manajemen energi dengan menyediakan visibilitas dan kendali jarak jauh terhadap konsumsi daya listrik [10]. Dalam aplikasi pada institusi pendidikan, IoT memungkinkan pemantauan parameter kelistrikan secara berkelanjutan serta intervensi cepat yang sulit dicapai melalui metode konvensional berbasis inspeksi manual. Arsitektur IoT secara umum terdiri atas empat lapisan yang saling terintegrasi, yaitu lapisan persepsi yang mencakup perangkat sensor dan aktuator di sisi lapangan, lapisan jaringan yang bertanggung jawab mentransmisikan data ke pusat komputasi, lapisan pemrosesan yang mengolah dan menyimpan informasi di lingkungan awan, serta lapisan aplikasi yang menjadi antarmuka bagi pengguna akhir. Keempat lapisan ini bekerja secara simultan untuk memastikan bahwa data akuisisi dari lapangan dapat ditampilkan dan dikendalikan secara *real-time*, sehingga pengguna memiliki informasi yang akurat untuk mengambil keputusan operasional.

Penggunaan mikrokontroler ESP32 dipilih sebagai unit pemroses utama karena kemampuannya menangani komputasi pembacaan sensor dan komunikasi jaringan secara paralel tanpa mengalami hambatan sistem. Mikrokontroler ini dilengkapi dengan arsitektur prosesor dual-core, dukungan Wi-Fi dan Bluetooth, serta jumlah pin GPIO yang memadai untuk mengakomodasi berbagai periferal [11]. Untuk mengukur parameter kelistrikan pada instalasi satu fasa, penelitian ini memanfaatkan modul sensor PZEM-004T yang bekerja dengan protokol komunikasi Modbus-RTU melalui antarmuka UART [12]. Sensor ini mampu mengukur tegangan, arus, daya aktif, dan energi kumulatif dengan rentang pengukuran yang sesuai untuk beban peralatan elektronik di ruang guru, sehingga seluruh data konsumsi yang terekam dapat diandalkan sebagai dasar perhitungan efisiensi energi.

Platform Blynk digunakan sebagai antarmuka pengguna berbasis awan yang memungkinkan pembuatan dashboard kontrol melalui metode seret dan letak [13]. Melalui platform ini, guru dan staf madrasah dapat memantau status pemakaian daya dan mengirimkan perintah kendali kepada relai dari jarak jauh menggunakan ponsel pintar. Sementara itu, Telegram Bot API dimanfaatkan sebagai saluran komunikasi asinkron untuk mengirimkan notifikasi peringatan secara instan kepada pengguna ketika konsumsi daya terdeteksi melewati batas ambang yang ditentukan [14].

III. Metode Penelitian

A. Pendekatan dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi kasus dengan metode kuantitatif-deskriptif untuk menganalisis efektivitas inovasi *Internet of Things* dalam meningkatkan efisiensi energi listrik di lingkungan madrasah.

Kegiatan dilaksanakan di MTs DDI Al-Amin yang beralamat di Jalan Parinring Raya Nomor 2, Kelurahan Manggala, Kecamatan Manggala, Kota Makassar, selama periode 20 Juli hingga 16 Agustus 2026. Pemilihan lokasi didasarkan pada hasil observasi awal yang menunjukkan adanya permasalahan pemborosan energi akibat tidak adanya sistem pengawasan terpusat dan kebiasaan lupa mematikan perangkat elektronik di ruang guru.

B. Subjek dan Spesifikasi Perangkat Pengamatan

Subjek pengamatan difokuskan pada ruang guru dengan total beban listrik terpasang sebesar 250 W, yang terdiri atas empat lampu LED (80 W), dua kipas angin (90 W), satu kulkas (50 W), dan satu dispenser (30 W).



Gambar 1. Ruang Guru MTs DDI Al-Amin

Sistem kendali IoT diterapkan pada empat kanal relai, yaitu relai 1 dan 2 untuk lampu, relai 3 untuk jalur kipas angin, serta relai 4 untuk stop kontak umum. Meskipun tidak seluruh

beban terhubung ke sistem kendali, pengamatan durasi pemborosan mencakup seluruh perangkat di ruang guru melalui pencatatan manual saat ruangan kosong. Ruang guru dipilih berdasarkan intensitas penggunaan dan frekuensi kelalaian mematikan perangkat yang paling tinggi pada observasi awal.

C. Prosedur Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilaksanakan melalui tiga tahap, yaitu pra-instalasi, instalasi, dan pasca-instalasi.

Pada tahap pra-instalasi, observasi langsung dilakukan dengan pencatatan berbasis kejadian. Setiap perangkat yang menyala pada ruang kosong dicatat waktu mulai dan waktu matinya. Durasi setiap kejadian dihitung dari selisih kedua waktu tersebut, kemudian dijumlahkan secara harian untuk memperoleh total durasi pemborosan.

Instalasi sistem meliputi pemasangan mikrokontroler ESP32, sensor PZEM-004T, relai empat kanal, serta integrasi dengan platform Blynk dan Telegram Bot. Sistem diatur dengan batas alarm daya 300 W dan dilengkapi mekanisme pemulihan otomatis.

Tahap pasca-instalasi mengamati data akumulasi energi, log notifikasi Telegram, dan waktu pemulihan koneksi Wi-Fi dikumpulkan. Pencatatan durasi pemborosan mengikuti prosedur yang sama dengan tahap pra-instalasi.

D. Validasi Instrumen

Validasi instrumen dilakukan untuk memastikan bahwa sensor pembaca daya pada sistem memiliki tingkat akurasi yang memadai sebelum digunakan untuk pengambilan data. Pengujian validasi dilaksanakan dengan membandingkan pembacaan parameter kelistrikan dari sensor PZEM-004T terhadap alat ukur referensi yang telah terkalibrasi, yaitu tang ampere untuk pengukuran arus dan multimeter digital untuk pengukuran tegangan dan daya. Pengujian dilakukan secara simultan pada jalur yang sama dengan kondisi beban yang sedang beroperasi. Parameter yang dibandingkan meliputi tegangan listrik, arus listrik, dan daya aktif. Tingkat galat dihitung menggunakan formula selisih relatif antara pembacaan sensor dan alat ukur referensi, yang dinyatakan dalam persentase, sebagaimana pada formula berikut:

$$Error\ (\%) = \frac{Xsensor - Xreferensi}{Xreferensi} \times 100\% \qquad (1)$$

E. Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan dengan membandingkan rata-rata durasi pemborosan dan konsumsi energi antara kondisi pra-instalasi dan pasca-instalasi. Perhitungan penghematan energi dilakukan dengan mengalikan selisih durasi pemborosan terhadap total daya terpasang, yang hasilnya dinyatakan dalam satuan kWh per hari. Perhitungan ini mengikuti formula dasar kelistrikan, yaitu energi sama dengan daya dikalikan waktu. Konversi penghematan energi ke dalam nilai ekonomis dilakukan dengan mengalikan total energi yang dihemat terhadap tarif dasar listrik golongan pendidikan yang berlaku.

Efektivitas notifikasi dianalisis dari tren penurunan frekuensi alarm per minggu, sedangkan keandalan jaringan diukur dari rata-rata waktu pemulihan koneksi yang terekam dalam log sistem ESP32. Seluruh data disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk memudahkan interpretasi dan perbandingan.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Implementasi Perangkat Keras dan Perangkat Lunak

Implementasi perangkat keras merupakan tahap penerjemahan skema rangkaian elektronika ke dalam purwarupa fisik yang terpasang pada jaringan listrik ruang guru. Sistem dibangun menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai unit pemroses utama, sensor PZEM-004T untuk pengukuran parameter kelistrikan, modul relai empat kanal sebagai sakelar elektromekanis, serta layar OLED untuk menampilkan informasi status secara lokal, sebagaimana tampak pada Gambar 1. Seluruh komponen dirangkai dalam satu enclosure berbahan isolator dan dipasang pada dinding di dekat panel distribusi listrik ruang guru.



Gambar 1. Implementasi Purwarupa Perangkat Keras

B. Instalasi Sistem

Pada sisi kelistrikan, instalasi dilakukan pada sistem satu fasa. Jalur netral dihubungkan langsung ke sensor dan beban, sedangkan jalur fasa dilewatkan melalui current transformer (CT) yang terintegrasi pada modul PZEM-004T untuk mengukur arus total. Setelah melewati sensor, jalur fasa diarahkan menuju terminal Common (COM) pada setiap kanal relai. Terminal Normally Open (NO) dari masing-masing relai kemudian dihubungkan ke beban yang dikendalikan, sehingga pemutusan dan penyambungan daya beban dapat dilakukan secara independen berdasarkan sinyal kendali dari ESP32.

Integrasi dengan platform Blynk memungkinkan pengguna mengirimkan instruksi kendali dari jarak jauh melalui ponsel pintar, sedangkan Telegram Bot berfungsi sebagai kanal notifikasi peringatan ketika konsumsi daya melewati batas ambang yang telah ditentukan. Gambar 2 dan Gambar 3

menyajikan dokumentasi proses pemasangan panel kontrol IoT pada dinding ruang guru.



Gambar 2. Proses Instalasi dan Konfigurasi Sistem



Gambar 3. Panel Kontrol IoT pada Dinding Ruang Guru

C. Hasil Validasi Instrumen

Sebelum data hasil observasi digunakan untuk menganalisis potensi penghematan energi, terlebih dahulu dilakukan pengujian validasi untuk memastikan bahwa sensor PZEM-004T dan sistem pembacaan daya pada purwarupa memiliki tingkat akurasi yang memadai. Pengujian dilakukan dengan membandingkan pembacaan parameter kelistrikan pada sistem terhadap alat ukur referensi yang telah terkalibrasi, yaitu tang ampere untuk pengukuran arus dan multimeter digital untuk pengukuran tegangan dan daya. Pengujian dilakukan secara simultan pada jalur yang sama dengan kondisi beban yang sedang beroperasi.

Pada pengujian tegangan listrik, sensor PZEM-004T menampilkan nilai pembacaan sebesar 219,1 volt. Pengukuran simultan menggunakan multimeter digital pada jalur yang sama menunjukkan nilai 218,3 volt, sehingga diperoleh selisih sebesar 0,8 volt. Berdasarkan kedua nilai tersebut, tingkat galat pembacaan tegangan adalah sebesar 0,37 %, yang menunjukkan bahwa sensor memiliki ketelitian yang sangat baik dalam mengukur tegangan jala-jala.

Pada pengujian arus listrik, sensor PZEM-004T menampilkan nilai 0,25 ampere, sedangkan tang ampere menunjukkan nilai yang identik, yaitu 0,25 ampere, sehingga tidak terdapat selisih pembacaan.

Pada pengujian daya aktif, sensor PZEM-004T menampilkan nilai 46,2 watt, sedangkan alat ukur referensi mencatat nilai 46,4 watt. Selisih pembacaan daya adalah 0,2 watt, yang menghasilkan tingkat galat sebesar 0,43 %.

Ketiga parameter kelistrikan yang diuji menunjukkan tingkat galat yang berada jauh di bawah ambang toleransi standar kelistrikan sebesar 5 persen. Hasil validasi ini membuktikan bahwa modul PZEM-004T pada sistem memiliki tingkat presisi yang sangat baik, sehingga seluruh data akumulasi energi yang tercatat selama fase pasca-instalasi dapat diandalkan untuk analisis penghematan. Ringkasan hasil validasi instrumen disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Validasi Akurasi Instrumen

Parameter	Pembacaan PZEM-004T	Pembacaan Alat Ukur Referensi	Selisih	Error (%)
Tegangan Listrik	219,1 V	218,3 V	0,80 V	0,37
Arus Listrik	0,25 A	0,25 A	0,00 A	0,00
Daya Aktif	46,2 W	46,4 W	0,20 W	0,43



Gambar 4. Pengujian Akurasi Tegangan

Presisi pengukuran yang tinggi didukung oleh keberadaan *ASIC (Application Specific Integrated Circuit) energy metering* pada PZEM yang secara berkelanjutan melakukan perhitungan nilai *RMS (Root Mean Square)*, sehingga proses pengolahan data tidak membebani kinerja komputasi ESP32 secara signifikan.

D. Analisis Perbandingan Durasi Pemborosan

Analisis perbandingan durasi pemborosan dilakukan dengan melakukan simulasi estimasi pada tahap pra-instalasi dan pasca-instalasi.

Pada pra-instalasi, disimulasikan tercatat perangkat menyala dalam keadaan sia-sia dengan durasi masing-masing 45 menit, 50 menit, dan 30 menit, sehingga total durasi pemborosan harian adalah 125 menit atau setara dengan 2,08 jam. Sementara pada pasca-instalasi, tercatat pemborosan dengan durasi masing-masing 15 menit dan 30 menit, sehingga total durasi pemborosan harian adalah 45 menit atau setara dengan 0,75 jam. Perbandingan durasi pemborosan disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Simulasi Perbandingan Durasi Pemborosan

Kondisi	Total Durasi (Menit)	Total Durasi (Jam)
Sebelum Implementasi IoT	125	2,08
Sesudah Implementasi IoT	45	0,75
Penurunan	**80**	**1,33**

Berdasarkan data tersebut, perhitungan potensi penghematan energi dilakukan dengan mengalikan selisih durasi pemborosan terhadap total daya terpasang. Total daya terpasang di ruang guru diketahui sebesar 250 W atau 0,25 kW, yang terdiri atas empat unit lampu LED masing-masing 20 W (total 80 W), dua unit kipas angin masing-masing 45 W (total 90 W), satu unit kulkas 50 W, dan satu unit dispenser 30 W.

Konsumsi energi yang terbuang sia-sia pada pra-instalasi adalah sebesar 0,25 kW dikalikan 2,08 jam, yaitu 0,52 kWh. Setelah implementasi IoT, konsumsi sia-sia turun menjadi 0,25 kW dikalikan 0,75 jam, yaitu 0,1875 kWh. Dengan demikian, penghematan energi bersih yang dicapai pada hari tersebut adalah sebesar 0,3325 kWh per hari. Apabila dikonversi ke dalam periode satu bulan dengan asumsi 26 hari efektif sekolah, total penghematan energi mencapai 8,645 kWh per bulan. Dengan tarif dasar listrik golongan pendidikan yang berlaku sekitar Rp1.300,00 per kWh, madrasah berpotensi mengurangi biaya operasional listrik sebesar Rp11.239,00 setiap bulannya. Ringkasan perhitungan penghematan disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Analisis Potensi Penghematan Konsumsi Energi dan Biaya Listrik

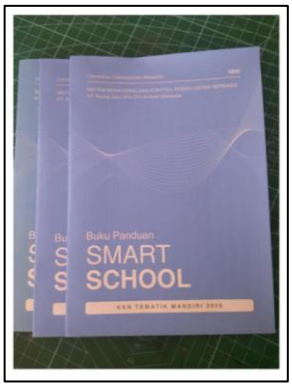
Parameter	Sebelum IoT	Sesudah IoT	Penghematan
Durasi Pemborosan	2,08 jam/hari	0,75 jam/hari	1,33 jam/hari
Konsumsi Energi Listrik Sia-Sia	0,52 kWh/hari	0,1875 kWh/hari	0,3325 kWh/hari
Konsumsi per Bulan (26 hari)	13,52 kWh	4,875 kWh	**8,645 kWh**
Biaya per Bulan (Rp1.300/kWh)	Rp17.576	Rp6.338	**Rp11.239**

E. Analisis Efektivitas Notifikasi dan Adaptasi Pengguna

Aspek menarik lainnya dikaji melalui simulasi estimasi efektivitas notifikasi Telegram. Pada skenario simulasi, sistem diproyeksikan mengirimkan lima notifikasi peringatan karena konsumsi daya terdeteksi melampaui batas ambang yang ditentukan. Hal ini mengindikasikan bahwa guru dan staf masih perlu beradaptasi dan diperkirakan lupa mematikan perangkat sebelum meninggalkan ruangan. Pesan peringatan yang masuk secara kolektif ke grup berpotensi menjadi pengingat yang efektif. Simulasi ini juga menunjukkan bahwa seiring berjalannya waktu, guru dan staf diperkirakan mulai terbiasa mengecek dashboard Blynk sebelum pulang atau pada saat jam istirahat, sehingga intervensi manual melalui aplikasi semakin jarang dibutuhkan.

F. Pembahasan

Meskipun secara umum sistem berjalan dengan baik, penelitian ini juga mengidentifikasi sejumlah kendala teknis dan nonteknis. Kendala utama berasal dari fluktuasi sinyal Wi-Fi sekolah yang sering tidak stabil akibat padatnya penggunaan jaringan oleh perangkat lain. Berdasarkan catatan log sistem, kejadian pemutusan koneksi yang membutuhkan waktu pemulihan masing-masing 7-9 detik. Pada saat koneksi terputus, fungsi kendali jarak jauh melalui Blynk tidak tersedia. Akan tetapi, berkat arsitektur perangkat lunak yang dirancang dengan logika non-blokir, tombol fisik darurat yang terpasang pada panel lokal tetap berfungsi secara independen untuk mematikan beban secara manual. Kendala kedua bersumber dari aspek sumber daya manusia, di mana dua dari enam guru senior pada awalnya mengalami kesulitan dalam membedakan tombol kontrol virtual di aplikasi Blynk. Solusi yang diterapkan adalah pembuatan buku panduan bergambar yang diletakkan di dekat panel listrik serta pendampingan intensif selama dua hari pertama. Hasilnya, seluruh guru dan staf mampu mengoperasikan aplikasi secara mandiri pada hari ketiga setelah sosialisasi.



Gambar 5. Buku Panduan Smart School

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini mengonfirmasi bahwa inovasi IoT memiliki dampak ganda, yaitu sebagai instrumen teknis pengendali beban sekaligus sebagai katalis perubahan perilaku. Keberhasilan implementasi di lingkungan madrasah tidak hanya ditentukan oleh kecanggihan perangkat keras, tetapi juga oleh keandalan infrastruktur jaringan, akurasi instrumen, dan tingkat literasi digital pengguna.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Kepala MTs DDI Al-Amin beserta seluruh dewan guru dan staf tata usaha

yang telah memberikan izin, dukungan, serta kerja sama yang sangat baik selama pelaksanaan kegiatan. Semoga inovasi yang dihasilkan dapat memberikan manfaat yang berkelanjutan bagi madrasah.

V. KESIMPULAN

Purwarupa yang terdiri atas mikrokontroler ESP32, sensor PZEM-004T, dan modul relai empat kanal telah berhasil diinstalasi pada jaringan listrik ruang guru dan terintegrasi dengan platform Blynk sebagai antarmuka kendali jarak jauh serta Telegram Bot sebagai saluran notifikasi peringatan. Hasil validasi instrumen menunjukkan tingkat akurasi yang sangat baik, dengan rata-rata galat pembacaan tegangan sebesar 0,37%, arus 0%, dan daya 0,43%, yang semuanya berada jauh di bawah ambang toleransi standar kelistrikan sebesar 5%. Berdasarkan simulasi estimasi perbandingan durasi pemborosan, sistem menurunkan durasi perangkat menyala dalam keadaan sia-sia dari 2,08 jam per hari menjadi 0,75 jam per hari, yang setara dengan penghematan energi bersih sebesar 0,3325 kWh per hari atau 8,645 kWh per bulan. Penghematan ini berpotensi mengurangi biaya operasional listrik madrasah sekitar Rp11.239,00 setiap bulannya dengan asumsi 26 hari efektif sekolah dan tarif dasar listrik golongan pendidikan Rp1.300,00 per kWh. Simulasi efektivitas notifikasi melalui Telegram juga menunjukkan bahwa fitur peringatan dini mengindikasikan potensinya sebagai pengingat kolektif yang efektif dalam membangun kesadaran hemat energi di kalangan guru dan staf. Meskipun demikian, kendala utama berupa fluktuasi jaringan nirkabel dan adaptasi pengguna tetap menjadi perhatian, yang dapat diantisipasi dengan mekanisme pemulihan otomatis dan panduan penggunaan yang sederhana. Penelitian selanjutnya disarankan untuk menambahkan sensor gerak agar sistem dapat mematikan beban secara otomatis tanpa menunggu inisiatif manual dari pengguna, sehingga efisiensi energi dapat dicapai secara lebih optimal dan berkelanjutan.

DAFTAR ACUAN

[1] Y. A. Nur and G. Yoon, “Typical building and energy consumption pattern of high school buildings in Makassar, Indonesia,” Japan Architectural Review, vol. 8, no. 1, Art. no. e70038, 2025.

[2] Y. Chen, X. Li, R. C. D. Ferreira, M. Gül, I. Nikolaidis, and O. Ardakanian, “Evaluating and improving the energy performance of school buildings with a proposed real-time monitoring system,” *2018 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech)*, Long Beach, CA, USA, 2018, pp. 1–8.

[3] A. H. Ahamad, N. I. Abidin, R. Zakaria, E. Aminudin, J. S. Khan, S. R. Sahamir, S. Azman, A. A. Redzuan, S. E. N. Lau, and M. F. Mohd Yusoff, “School building energy assessment using lean energy management strategies,” *Frontiers in Built Environment*, vol. 7, Art. no. 679579, 2022.

[4] Y. Zhang, X. Bai, F. Mills, and J. Pezzey, “Rethinking the role of occupant behavior in building energy performance: A review,” *Energy and Buildings*, vol. 172, pp. 279–294, 2018.

[5] B. Prayitno, A. Muhammad, R. I. Putra, E. Putra, and P. Palupiningsih, “Rancang bangun sistem monitoring dan controlling penggunaan daya peralatan listrik rumah tangga menggunakan IoT,” *PETIR*, vol. 15, no. 1, pp. 57–62, 2021.

[6] P. W. Setiawan, A. L. Hananto, E. Novalia, and A. Hananto, “Sistem monitoring dan visualisasi data konsumsi energi listrik rumah berbasis IoT dengan aplikasi Blynk,” *Jutisi: Jurnal Ilmiah Teknik Informatika dan Sistem Informasi*, vol. 14, no. 1, pp. 455–466, 2025.

[7] M. H. Bisri, F. Santoso, and F. Lazim, “Alat monitoring daya listrik berbasis IoT pada Ponpes Salafiyah Syafi’iyah Sukorejo (P2S3) menggunakan NodeMCU dan Blynk,” *J. Ilm. BETRIK: Besemah Teknol. Inf. Komput.*, vol. 15, no. 2, 2025.

[8] P. Moghadam and A. Roshan Fekr, “Non-intrusive load monitoring for smart residential buildings: An AI-based framework with cross-country generalization,” *Energy Buildings*, vol. 364, p. 117632, 2026.

[9] M. N. Adiwiranto, C. B. Waluyo, and B. Sudibya, “Prototipe sistem monitoring konsumsi energi listrik serta estimasi biaya pada peralatan rumah tangga berbasis Internet of Things,” *J. Edukasi Elektro*, vol. 6, no. 1, pp. 32–41, May 2022.

[10] R. Buyya and A. V. Dastjerdi, Eds., *Internet of Things: Principles and Paradigms*. Morgan Kaufmann, 2016.

[11] A. Maier, A. Sharp, and Y. Vagapov, “Comparative analysis and practical implementation of the ESP32 microcontroller module for the Internet of Things,” *2017 Internet Technologies and Applications (ITA)*, Wrexham, UK, 2017, pp. 143–148.

[12] Peacefair Electronic Technology Co., Ltd., “PZEM-004T V3.0 user manual: AC communication module,” 2020.

[13] Blynk Inc., “Blynk documentation: Architecture and virtual pins,” 2023.

[14] Telegram Messenger LLP, “Telegram Bot API: Official documentation,” 2023.