Jurnal Ilmu Komputer dan Sistem Informasi (JIRSI) **e-ISSN 2830-3954**
Volume: 5, Nomor: 3, September 2026: 1441-1455 **p-ISSN 2830-6031**
https://jurnal.unity-academy.sch.id/index.php/jirsi/index

Monitoring Konsumsi Energi Hybrid PLTS-PLTB Berbasis IoT untuk Efisiensi Listrik SD Muhammadiyah 39 Medan

IoT-Based Hybrid Solar-Wind Energy Consumption Monitoring for Electricity Efficiency at SD Muhammadiyah 39 Medan

Sawirman*[1], Irfan Nofri[2], Rafsanzani Pane[3], Joko Arif Setiawan[4](*corespondent author)
[1*,2]Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara
[3]Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara
[4]Program Studi Teknik Elektro, Universitas Amir Hamzah
E-mail: "[1]sawirman@umsu.ac.id ,[2]irfannofri@umsu.ac.id , [3]rafsanzanipane@umsu.ac.id ,[4]jokoarif@unhamzah.ac.id

Abstrak

Peningkatan kebutuhan energi listrik di lingkungan sekolah menuntut adanya sistem pengelolaan dan pemantauan energi yang efektif, efisien, serta berkelanjutan. Penggunaan berbagai peralatan listrik, seperti lampu penerangan, kipas angin, pendingin ruangan, dan perangkat pembelajaran di SD Muhammadiyah 39 Medan, berpotensi meningkatkan konsumsi energi dan biaya operasional sekolah. Salah satu upaya untuk mendukung efisiensi energi adalah pemanfaatan energi terbarukan melalui sistem hibrid Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) yang dilengkapi teknologi Internet of Things (IoT). Penelitian ini bertujuan merancang sistem monitoring konsumsi energi listrik berbasis IoT yang mampu memantau penggunaan energi, produksi daya PLTS dan PLTB, serta kondisi penyimpanan energi secara real-time. Metode penelitian meliputi identifikasi kebutuhan dan karakteristik beban listrik sekolah, perancangan sistem pembangkit hibrid PLTS–PLTB, integrasi sensor pengukuran tegangan, arus, daya, dan energi, serta pengembangan sistem pemantauan berbasis IoT. Data hasil pengukuran ditampilkan melalui dashboard monitoring sehingga pengguna dapat mengetahui pola konsumsi energi, kontribusi energi terbarukan, dan kebutuhan listrik sekolah. Hasil yang diharapkan dari penelitian ini adalah tersedianya sistem monitoring yang informatif, akurat, dan mudah diakses untuk mendukung evaluasi penggunaan energi, mengidentifikasi potensi pemborosan listrik, serta memberikan rekomendasi pengelolaan energi yang lebih efisien. Dengan demikian, penerapan sistem ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi konsumsi listrik dan mendukung kemandirian energi berkelanjutan di lingkungan SD Muhammadiyah 39 Medan.

***Kata kunci**: Internet of Things (IoT); PLTS; PLTB; Monitoring Energi; Efisiensi Listrik.*

Abstract

The increasing demand for electrical energy in educational institutions requires an effective, efficient, and sustainable energy management and monitoring system. The use of various electrical appliances, such as lighting systems, fans, air conditioners, and learning equipment at SD Muhammadiyah 39 Medan, has the potential to increase energy consumption and school operational costs. One approach to supporting energy efficiency is the utilization of renewable energy through a hybrid Solar Power Plant (PLTS) and Wind Power Plant (PLTB) system integrated with Internet of Things (IoT) technology. This study aims to design an IoT-based electrical energy consumption monitoring system capable of monitoring energy usage, power generation from the solar and wind energy systems, and energy storage conditions in real time. The research methodology includes identifying the school's electrical energy requirements and

© 2026 The Author(s). Published by UNITY ACADEMY . This is an open access article under the CC BY-SA license (http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

load characteristics, designing a hybrid PLTS–PLTB power generation system, integrating sensors to measure voltage, current, power, and energy, and developing an IoT-based monitoring system. The measurement data are displayed through a monitoring dashboard, enabling users to identify energy consumption patterns, renewable energy contributions, and the school's electricity requirements. The expected outcome of this research is the development of an informative, accurate, and accessible monitoring system to support energy consumption evaluation, identify potential electricity waste, and provide recommendations for more efficient energy management. Therefore, the implementation of this system is expected to improve electrical energy consumption efficiency and support sustainable energy independence at SD Muhammadiyah 39 Medan.

***Keywords**: Internet of Things (IoT); Solar Power Plant; Wind Power Plant; Energy Monitoring; Electricity Efficiency.*

1. PENDAHULUAN

Pemanfaatan energi listrik pada lembaga pendidikan merupakan bagian penting dalam menunjang kegiatan belajar mengajar, administrasi, penerangan, dan kenyamanan ruang kelas. Peralatan seperti lampu, komputer, printer, pompa air, kipas angin, serta pendingin ruangan membentuk profil beban yang berubah menurut jam operasional sekolah. Apabila pemakaian peralatan tidak dikelola dengan baik, konsumsi listrik dan biaya pembayaran energi dapat meningkat. Oleh karena itu, strategi penghematan perlu menggabungkan konservasi energi dan pemanfaatan sumber energi terbarukan[1]. Indonesia memiliki potensi energi surya yang dapat dimanfaatkan melalui teknologi fotovoltaik. Modul PV mengubah radiasi matahari menjadi energi listrik arus searah, kemudian daya dapat diolah melalui pengendali dan inverter agar sesuai dengan kebutuhan beban. Di sisi lain, energi angin dapat dikonversi menjadi energi listrik menggunakan turbin angin. Kedua sumber tersebut mempunyai karakteristik keluaran yang berubah mengikuti kondisi cuaca. Penggabungan PV dan angin dalam sistem hibrid berpotensi memperluas peluang produksi energi pada waktu yang berbeda, tetapi manfaatnya sangat bergantung pada kesesuaian sumber daya lokal, kapasitas komponen, dan pola beban.

Sejumlah penelitian mutakhir membahas pengembangan dan optimasi sistem hibrid PV–angin dengan penyimpanan energi. Kajian Soudagar dkk. menjelaskan perkembangan konfigurasi, elektronika daya, dan kendali sistem hibrid surya–angin [1]. Kafando dkk. menekankan pentingnya penentuan ukuran komponen dan strategi pengelolaan energi pada sistem PV/angin dengan penyimpanan. Studi lain menunjukkan bahwa pemilihan teknologi penyimpanan dan konfigurasi sistem harus mempertimbangkan biaya, keandalan, serta karakteristik sumber daya [2], [3].

Pada konteks Indonesia, analisis keekonomian PLTS atap telah dilakukan untuk berbagai kelompok pelanggan. Putri dkk. memperlihatkan bahwa hasil keekonomian PLTS dipengaruhi kapasitas sistem, tarif listrik, tingkat diskonto, dan periode analisis [4]. Kajian mengenai kebijakan PLTS atap juga menunjukkan bahwa mekanisme regulasi dan skema pemanfaatan energi memengaruhi kelayakan investasi [5]. Namun, hasil studi pada pelanggan rumah tangga tidak dapat langsung

© 2026 The Author(s). Published by UNITY ACADEMY . This is an open access article under the CC BY-SA license (http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

diterapkan pada sekolah karena profil beban, jam operasi, kapasitas sambungan, dan pola penggunaan listrik berbeda.

Penelitian sistem hibrid berskala besar maupun komunitas telah mengembangkan metode optimasi multiobjektif yang mempertimbangkan biaya, keandalan, dan ketidakpastian cuaca [5]–. Penelitian tersebut menjadi dasar bahwa perancangan tidak cukup hanya menjumlahkan kapasitas nominal panel surya dan turbin angin. Analisis perlu memperhatikan energi harian, variasi waktu, efisiensi konversi, kapasitas baterai, daya inverter, energi yang tidak termanfaatkan, serta energi yang tetap harus dipasok jaringan.

Berdasarkan kondisi tersebut, kesenjangan kajian yang ingin dijawab adalah perlunya kerangka perencanaan awal sistem PLTS–PLTB yang berorientasi pada kebutuhan listrik sekolah dasar, dengan tahapan yang mudah direplikasi dan parameter yang dapat diverifikasi. Fokus penelitian ini bukan menyatakan bahwa sistem telah terpasang atau menghasilkan penghematan aktual, melainkan menyusun model teknis-ekonomis awal untuk SD Muhammadiyah 39 Medan yang dapat menjadi dasar pengukuran dan keputusan investasi.

Tujuan penelitian adalah: (1) menyusun metode identifikasi profil dan kebutuhan energi listrik sekolah; (2) merumuskan perhitungan awal kapasitas PLTS, PLTB, penyimpanan baterai, dan inverter; (3) memperkirakan kontribusi energi terbarukan terhadap kebutuhan beban melalui skenario simulasi; dan (4) menyusun indikator evaluasi penghematan biaya serta kelayakan ekonomi. Kebaruan yang ditawarkan terletak pada penggabungan analisis beban sekolah, perencanaan PLTS–PLTB, dan penilaian ekonomi dalam satu kerangka yang secara eksplisit membedakan data pengukuran dengan asumsi simulasi[2].

1.1. Rumusan Masalah

Rumusan masalah penelitian ini meliputi bagaimana karakteristik beban listrik sekolah yang perlu diidentifikasi, bagaimana menentukan kapasitas awal PLTS dan PLTB yang sesuai, bagaimana kontribusi kedua pembangkit terhadap kebutuhan energi harian, serta bagaimana menghitung potensi pengurangan energi dari jaringan dan biaya listrik secara transparan[3].

1.2. Batasan Penelitian

Kajian dibatasi pada perencanaan sistem hibrid PLTS–PLTB untuk mendukung sebagian kebutuhan listrik sekolah. Sistem diasumsikan terhubung dengan jaringan PLN sebagai sumber pendukung, kecuali pada skenario yang secara khusus diuji. Analisis belum mencakup desain struktur fondasi turbin, kajian kebisingan rinci, perizinan interkoneksi, maupun pengujian kinerja perangkat terpasang. Seluruh angka contoh pada bagian hasil merupakan asumsi ilustratif dan wajib diganti dengan data lapangan serta penawaran komponen aktual sebelum digunakan untuk keputusan investasi[2].

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian dirancang menggunakan pendekatan deskriptif-kuantitatif melalui studi kasus perencanaan pada SD Muhammadiyah 39 Medan. Alur penelitian terdiri atas pengumpulan data, penyusunan profil beban, penilaian

© 2026 The Author(s). Published by UNITY ACADEMY . This is an open access article under the CC BY-SA license (http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

sumber energi, penentuan kapasitas komponen, simulasi neraca energi, dan evaluasi ekonomi[4]. Pada tahap penyusunan draf ini, data lapangan belum tersedia. Oleh sebab itu, metodologi membedakan secara tegas antara data yang harus dikumpulkan pada pelaksanaan penelitian dan parameter asumsi yang digunakan hanya untuk memperlihatkan contoh hitungan[5].

2.1. Lokasi dan Objek Penelitian

Objek penelitian adalah konsumsi energi listrik dan peluang pemanfaatan energi surya serta angin di lingkungan SD Muhammadiyah 39 Medan. Pengumpulan data lapangan nantinya dilakukan pada panel distribusi utama dan kelompok beban sekolah dengan persetujuan pengelola. Identitas titik ukur, kapasitas sambungan, data rekening, serta jadwal operasional perlu dicatat agar model beban merepresentasikan kondisi nyata.

2.2. Pengumpulan Data

Data primer yang dibutuhkan meliputi pengukuran daya dan energi pada panel utama, inventarisasi peralatan, jam operasi, serta pengamatan kondisi atap dan area terbuka. Pengukuran beban idealnya dilakukan dengan pencatat energi selama beberapa hari sekolah dan mencakup variasi hari kerja. Data sekunder meliputi rekening listrik sekurang-kurangnya 12 bulan, spesifikasi peralatan, data radiasi matahari, data kecepatan angin, tarif listrik yang berlaku, serta harga komponen dari pemasok[6].

Tabel 1. Spesifikasi peralatan

Jenis data	Parameter	Metode / sumber	Kegunaan
Beban listrik	kW, kWh, faktor daya, waktu operasi	Power logger, meter energi, inventarisasi	Menyusun profil beban
Energi surya	Irradiansi / GHI, temperatur	NASA POWER atau sumber meteorologi tervalidasi; verifikasi lokal	Estimasi produksi PLTS
Energi angin	Kecepatan dan arah angin, distribusi waktu	Anemometer pada ketinggian relevan dan data sekunder	Evaluasi kelayakan PLTB
Ekonomi	Tarif, biaya investasi, O&M, umur komponen	Rekening, regulasi, penawaran pemasok	NPV, LCOE, payback
Ruang instalasi	Luas atap, bayangan, orientasi, hambatan	Survei dan dokumentasi lokasi	Penentuan tata letak

© 2026 The Author(s). Published by UNITY ACADEMY . This is an open access article under the CC BY-SA license (http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

2.3. Inventarisasi dan Perhitungan Beban

Energi harian setiap peralatan dihitung dari daya masukan dikalikan jumlah unit dan lama pemakaian. Persamaan yang digunakan adalah:

$$E_i = P_i \times n_i \times t_i / 1000 \quad (1)$$

dengan E_i adalah energi peralatan ke-i (kWh/hari), P_i adalah daya masukan per unit (W), n_i adalah jumlah unit, dan t_i adalah waktu operasi (jam/hari). Total energi harian diperoleh dari penjumlahan seluruh kelompok beban:

$$E_beban = \Sigma E_i \quad (2)$$

Selain energi, daya puncak harus ditentukan dari pengukuran serentak karena kapasitas inverter ditentukan oleh kebutuhan daya sesaat, bukan hanya kWh harian. Beban dengan arus awal tinggi seperti motor dan kompresor perlu diperiksa secara khusus[7].

2.4. Estimasi Produksi PLTS

Estimasi awal energi harian PLTS dapat dihitung dengan pendekatan jam matahari ekuivalen (peak sun hours/PSH):

$$E_PV = P_PV \times PSH \times PR \quad (3)$$

E_PV adalah energi keluaran harian (kWh/hari), P_PV kapasitas modul (kWp), PSH adalah jam matahari puncak ekuivalen (jam/hari), dan PR adalah "performance ratio" yang mewakili rugi temperatur, kabel, pengendali, inverter, debu, dan ketidakcocokan modul. Perhitungan akhir sebaiknya menggunakan data radiasi bulanan atau per jam dan perangkat simulasi yang sesuai[8].

2.5. Estimasi Produksi PLTB

Untuk evaluasi energi tahunan awal, produksi turbin angin dapat diperkirakan menggunakan faktor kapasitas:

$$E_WT = P_WT \times 24 \times CF \quad (4)$$

E_WT adalah energi rata-rata per hari (kWh/hari), P_WT adalah kapasitas nominal turbin (kW), dan CF adalah faktor kapasitas (tanpa satuan). Faktor kapasitas tidak boleh dipilih tanpa dasar; nilainya perlu dihitung dari distribusi kecepatan angin dan kurva daya turbin pada ketinggian hub. Hubungan daya angin teoritis dipengaruhi densitas udara, luas sapuan rotor, dan pangkat tiga kecepatan angin. Namun, keluaran listrik aktual dibatasi karakteristik turbin dan rugi sistem.

2.6. Penentuan kapasitas baterai dan Inverter

Kapasitas energi nominal baterai untuk kebutuhan cadangan tertentu dapat dihitung dengan:

$$C_bat = (E_cadangan \times N_hari) / (DoD \times \eta_bat) \quad (5)$$

C_bat adalah kapasitas energi nominal baterai (kWh), E_cadangan adalah energi beban yang akan dilayani baterai per hari (kWh/hari), N_hari adalah lama cadangan (hari), DoD adalah kedalaman pengosongan yang diizinkan, dan η_bat adalah efisiensi baterai. Konversi ke kapasitas Ah pada tegangan DC nominal V_dc dilakukan dengan:

$$Ah = (C_bat \times 1000) / V_dc \quad (6)$$

Kapasitas inverter ditentukan dari daya puncak simultan, faktor daya, kemampuan beban lebih, dan margin desain. Untuk sistem satu fasa, daya semu S (VA) berhubungan dengan daya aktif P (W) melalui faktor daya cos φ, sehingga S =

© 2026 The Author(s). Published by UNITY ACADEMY . This is an open access article under the CC BY-SA license (http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

P/cos φ. Pemilihan inverter juga harus mempertimbangkan tegangan DC, rentang MPPT, kemampuan sinkronisasi jaringan, proteksi anti-islanding, dan ketentuan interkoneksi yang berlaku.

2.7. Neraca Energi dan Strategi Pengoperasian

Neraca energi dilakukan pada interval waktu yang konsisten, misalnya per jam. Prioritas operasi yang dapat diuji adalah: (1) energi PLTS dan PLTB digunakan untuk memenuhi beban sekolah; (2) kelebihan energi mengisi baterai; (3) baterai memasok beban ketika produksi terbarukan lebih rendah daripada kebutuhan; dan (4) jaringan PLN memasok kekurangan ketika energi terbarukan dan baterai tidak mencukupi. Pada sistem grid-connected, energi yang diekspor tidak boleh langsung diasumsikan memperoleh kompensasi finansial; perlakuan ekspor harus mengikuti ketentuan dan skema yang berlaku saat studi dilakukan.

$$E_grid = \max[0, E_load - E_RE,self - E_bat,out] \quad (7)$$

E_grid adalah energi yang masih dibeli dari jaringan, E_load adalah energi beban, E_RE,self adalah energi terbarukan yang langsung digunakan, dan E_bat,out adalah energi baterai yang benar-benar disalurkan ke beban. Persamaan ini merupakan penyederhanaan neraca energi; simulasi rinci perlu memasukkan rugi pengisian/pengosongan, batas state of charge (SoC), dan batas daya[9].

2.8. Indikator kinerja Teknis dan Ekonomi

Kontribusi energi terbarukan terhadap beban dapat dinyatakan sebagai:

$$RE_share = (E_RE,self / E_load) \times 100\% \quad (8)$$

Pengurangan energi dari jaringan dihitung dengan membandingkan konsumsi jaringan pada kondisi dasar dan kondisi sistem hibrid. Penghematan biaya sederhana merupakan energi jaringan yang berhasil dihindari dikalikan tarif efektif. Untuk investasi, indikator yang disarankan adalah “net present value” (NPV), “levelized cost of electricity” (LCOE), dan “simple payback period”. NPV dihitung dari selisih nilai kini manfaat dan biaya sepanjang umur proyek. Analisis ekonomi harus memasukkan biaya modul, turbin, baterai, inverter, struktur, instalasi, penggantian baterai, operasi dan pemeliharaan, serta tingkat diskonto[9].

2.9. Prosesdur Simulasi

Langkah 1: memasukkan profil beban per jam berdasarkan pengukuran atau skenario yang dinyatakan secara terbuka.

Langkah 2: memasukkan data radiasi matahari dan kecepatan angin dalam resolusi waktu yang sama dengan beban.

Langkah 3: menentukan konfigurasi kapasitas PLTS, PLTB, baterai, dan inverter.

Langkah 4: menghitung keluaran pembangkit dengan kurva performa dan efisiensi komponen.

Langkah 5: menjalankan strategi prioritas beban, pengisian baterai, pemakaian baterai, dan pasokan PLN.

Langkah 6: menghitung energi terbarukan yang digunakan sendiri, energi yang dibeli dari PLN, energi tidak termanfaatkan, dan indikator ekonomi.

Langkah 7: melakukan sensitivitas terhadap PSH, faktor kapasitas angin, biaya baterai, tarif listrik, dan tingkat diskonto[10].

© 2026 The Author(s). Published by UNITY ACADEMY . This is an open access article under the CC BY-SA license (http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menghasilkan rancangan sistem monitoring konsumsi energi listrik pada sistem pembangkit listrik hybrid Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) di lingkungan SD Muhammadiyah 39 Medan. Sistem dirancang untuk memantau penggunaan energi listrik serta mengetahui kontribusi energi yang dihasilkan oleh masing-masing sumber pembangkit secara terintegrasi[11].

3.1. Kebutuhan Energi

Sistem monitoring berbasis Internet of Things (IoT) memungkinkan data parameter kelistrikan diperoleh melalui sensor pengukuran dan dikirimkan ke platform pemantauan secara real-time. Parameter yang diamati meliputi tegangan (V), arus (A), daya aktif (W), konsumsi energi (kWh), serta energi yang dihasilkan oleh PLTS dan PLTB.

Integrasi sistem monitoring ini diharapkan dapat membantu pihak sekolah mengetahui pola penggunaan energi listrik, mengidentifikasi waktu konsumsi tertinggi, serta mengevaluasi kontribusi energi terbarukan terhadap kebutuhan listrik sekolah[11].

Tabel 2. Parameter Monitoring Sistem Hybrid PLTS-PLTB

Parameter	Satuan	Fungsi
Tegangan listrik	Volt (V)	Mengukur tegangan sistem
Arus listrik	Ampere (A)	Mengukur arus beban
Daya listrik	Watt (W)	Mengetahui daya yang digunakan
Energi listrik	kWh	Menghitung konsumsi energi
Produksi PLTS	kWh	Mengetahui energi surya
Produksi PLTB	kWh	Mengetahui energi angin
Waktu pengukuran	Jam	Mengidentifikasi pola penggunaan

3.2. Hasil Integrasi Sistem PLTS dan PLTB

Integrasi pembangkit listrik hybrid dilakukan dengan menggabungkan dua sumber energi terbarukan, yaitu energi matahari melalui PLTS dan energi angin melalui PLTB. Kedua sumber tersebut dirancang untuk memberikan kontribusi terhadap kebutuhan energi listrik di SD Muhammadiyah 39 Medan.

Energi yang dihasilkan PLTS dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari, kondisi cuaca, temperatur modul, dan kapasitas panel surya. Sementara itu, produksi energi PLTB dipengaruhi oleh kecepatan angin dan karakteristik turbin yang digunakan.

Penggabungan kedua sumber energi tersebut memberikan peluang peningkatan ketersediaan energi terbarukan. Sistem monitoring IoT digunakan untuk mengamati produksi energi masing-masing pembangkit dan membandingkannya dengan konsumsi energi listrik sekolah.

© 2026 The Author(s). Published by UNITY ACADEMY . This is an open access article under the CC BY-SA license (http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

1. Data pengukuran produksi energi PLTS
   Spesifikasi sistem PLTS:
- Kapasitas panel surya: 1.000 Wp.
- Tegangan sistem: 24 VDC.
- Waktu pengamatan: 07.00–17.00 WIB.
- Parameter: tegangan, arus, daya, dan energi.

Tabel 3. Pengukuran keluaran PLTS

Waktu	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)
08.00	28	5,0	140
09.00	29	9,0	261
10.00	30	15,0	450
11.00	30	20,0	600
12.00	31	24,0	744
13.00	30	22,0	660
14.00	29	17,0	493
15.00	28	12,0	336
16.00	27	6,0	162

Data tersebut menggambarkan perubahan keluaran PLTS akibat perubahan intensitas radiasi matahari. Energi harian dihitung dari integrasi daya terhadap waktu, bukan sekadar mengambil satu nilai daya tertinggi.

2. Data pengukuran produksi energi PLTB
   Spesifikasi PLTB:
- Kapasitas turbin: 500 W.
- Sistem tegangan: 24 VDC.
- Parameter: kecepatan angin, tegangan, arus, daya, dan energi.

Tabel 4. Pengukuran keluaran PLTB

Waktu	Kecepatan Angin (m/s)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)
08.00	2,0	8	0,5	4
09.00	2,5	10	0,8	8
10.00	3,0	12	1,0	12
11.00	3,5	15	1,2	18
12.00	4,0	18	1,5	27
13.00	4,5	20	1,8	36
14.00	4,0	18	1,5	27
15.00	3,5	15	1,2	18
16.00	2,5	10	0,8	8

© 2026 The Author(s). Published by UNITY ACADEMY . This is an open access article under the CC BY-SA license (http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

Data tersebut digunakan untuk menganalisis hubungan antara kecepatan angin dan keluaran daya PLTB. Pengukuran aktual perlu mempertimbangkan karakteristik turbin, kecepatan cut-in, dan efisiensi generator.

3.4. Data pengukuran konsumsi listrik sekolah

Pengukuran konsumsi listrik dilakukan terhadap peralatan utama yang digunakan dalam kegiatan pembelajaran dan operasional SD Muhammadiyah 39 Medan[12].

Tabel 5. Konsumsi energi listrik sekolah

Peralatan	Daya (W)	Jumlah	Jam/hari	Energi (kWh/hari)
Lampu LED	18	20	8	2,88
Kipas Angin	45	10	7	3,15
AC	500	2	3	3,00
komputer	100	2	2	0,40
Printer	50	1	1	0,05
Total				**9,48**

Berdasarkan komsumsi pada Tabel 5, total kebutuhan energi listrik sekolah sebesar 9,48 kWh per hari. Beban terbesar berasal dari penggunaan kipas angin dan AC. Kondisi tersebut menunjukkan pentingnya pengaturan waktu operasional peralatan listrik sebagai salah satu strategi penghematan energi.

3.5. Rekapitulasi produksi dan konsumsi energi hybrid

Berdasarkan contoh pengukuran sebelumnya, berikut rekapitulasi energi harian yang dapat digunakan untuk analisis awal.

Tabel 6. Perbandingan produksi energi dan kebutuhan listrik

Parameter	Energi (kWh/hari)
Produksi PLTS	3,695
Produksi PLTB	0,152
Total produksi hybrid	3,847
Konsumsi listrik sekolah	9,480
Selisih produksi dan konsumsi	5,633

Persentase produksi energi hybrid terhadap konsumsi listrik:

$$K = \frac{3{,}847}{9{,}480} \text{ x } 100\%$$

$$K = 40{,}58\%$$

© 2026 The Author(s). Published by UNITY ACADEMY . This is an open access article under the CC BY-SA license (http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

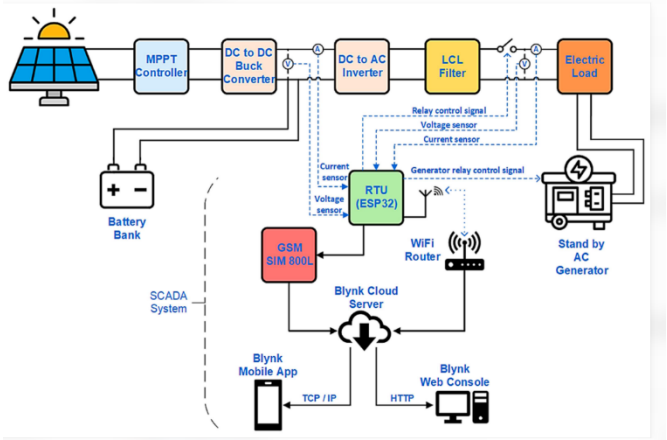
Artinya, produksi energi hybrid secara teoritis setara dengan 40,58% kebutuhan energi harian sekolah. Namun, angka tersebut belum tentu sama dengan kontribusi energi yang benar-benar digunakan oleh beban. Hal ini bergantung pada waktu produksi, karakteristik beban, rugi-rugi sistem, dan kapasitas penyimpanan baterai[13].

3.6. Jenis sensor yang digunakan dalam sistem monitoring IoT

Berikut komponen sensor dan perangkat yang direkomendasikan untuk penelitian ini.

Sensor/perangkat	Fungsi pengukuran
PZEM-004T V3	Tegangan, arus, daya, dan energi AC pada sisi beban
INA226	Tegangan, arus, dan daya DC pada sistem PLTS/PLTB
Anemometer	Kecepatan angin untuk analisis PLTB
Pyranometer	Intensitas radiasi matahari
DS18B20	Temperatur panel surya
ESP32	Pengolah data dan komunikasi IoT
Modul Wi-Fi	Pengiriman data menuju dashboard

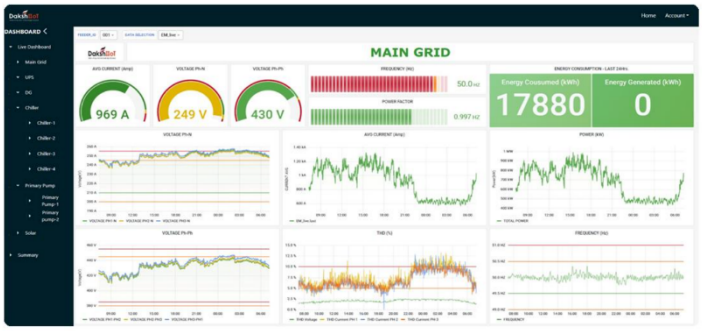
3.7. Rancangan alur kerja sistem monitoring



Gambar 1. Diagram Blok Sistem Monitoring IoT

Memperlihatkan hubungan PLTS, PLTB, baterai, inverter, sensor, mikrokontroler, dan platform monitoring[12].

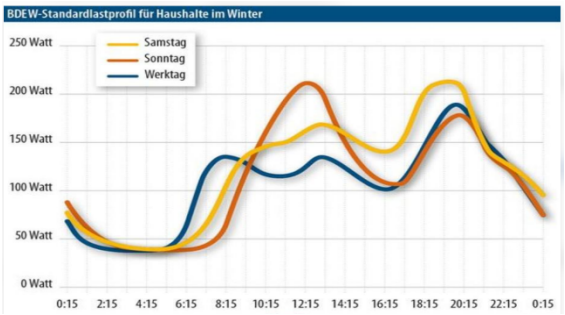
© 2026 The Author(s). Published by UNITY ACADEMY . This is an open access article under the CC BY-SA license (http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)



Gambar 2. Tampilan Dashboard Monitoring
Memperlihatkan tegangan, arus, daya, energi, dan status pembangkit.



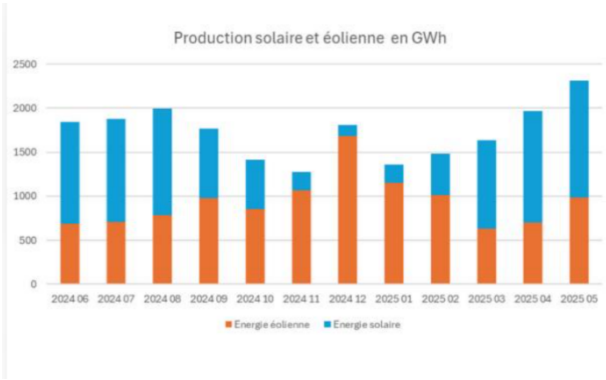
Gambar 3. Integrasi PLTS dan PLTB
Memperlihatkan konfigurasi sumber energi terbarukan yang digunakan.



Gambar 4. Grafik Konsumsi Energi Harian

Membandingkan penggunaan energi listrik berdasarkan waktu operasional sekolah.

© 2026 The Author(s). Published by UNITY ACADEMY . This is an open access article under the CC BY-SA license (http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

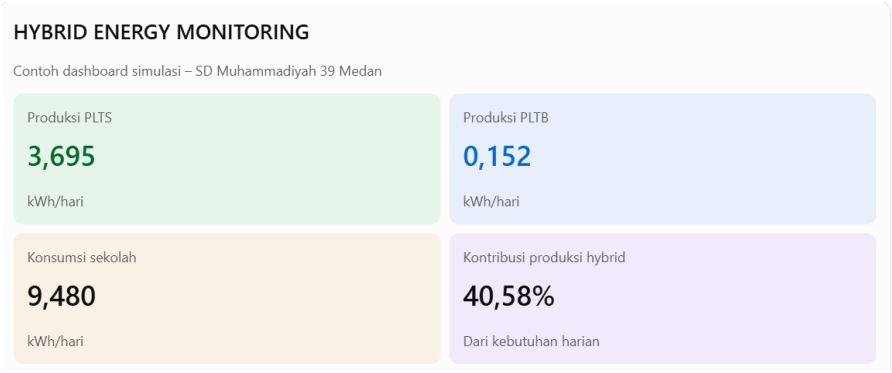


Gambar 5. Grafik Kontribusi Energi PLTS-PLTB

Memperlihatkan perbandingan produksi energi PLTS, PLTB, dan total konsumsi beban.

3.8 tampilan hasil monitoring

Berikut contoh indikator yang sebaiknya ditampilkan pada dashboard penelitian.



Gambar 6. Hybrid Energy Monitoring

3.9. Pembahasan Keseluruhan Hasil Penelitian

Hasil perancangan dan analisis sistem monitoring menunjukkan bahwa penerapan teknologi IoT memiliki peran penting dalam pengelolaan energi listrik berbasis pembangkit hybrid PLTS-PLTB. Pemantauan secara real-time memberikan kemudahan dalam memperoleh informasi mengenai produksi energi, konsumsi listrik, dan karakteristik penggunaan beban di lingkungan sekolah[14].

Integrasi PLTS dan PLTB memberikan alternatif pemanfaatan sumber energi terbarukan yang saling melengkapi. Namun, besarnya kontribusi kedua pembangkit tetap bergantung pada potensi radiasi matahari, kecepatan angin, kapasitas pembangkit, serta karakteristik beban listrik sekolah.

Dari aspek penghematan energi, informasi yang diperoleh melalui sistem monitoring dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam mengoptimalkan penggunaan peralatan listrik. Dengan demikian, sistem yang dirancang tidak hanya berfungsi sebagai alat pemantauan, tetapi juga mendukung

© 2026 The Author(s). Published by UNITY ACADEMY . This is an open access article under the CC BY-SA license (http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

pengelolaan energi listrik yang lebih efisien, terukur, dan berkelanjutan di SD Muhammadiyah 39 Medan[15].

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, pengukuran, dan analisis sistem monitoring konsumsi energi hybrid PLTS-PLTB berbasis Internet of Things (IoT) di SD Muhammadiyah 39 Medan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Perancangan sistem monitoring berbasis IoT memungkinkan pemantauan parameter kelistrikan secara terintegrasi, meliputi tegangan, arus, daya, dan konsumsi energi listrik. Penggunaan ESP32 sebagai pengolah data mendukung pengiriman informasi hasil pengukuran menuju platform monitoring sehingga kondisi sistem dapat dipantau secara real-time.
2. Integrasi pembangkit listrik hybrid PLTS-PLTB menunjukkan potensi pemanfaatan dua sumber energi terbarukan untuk mendukung kebutuhan listrik sekolah. Berdasarkan data simulasi, produksi energi PLTS sebesar 3,695 kWh/hari, sedangkan PLTB sebesar 0,152 kWh/hari, sehingga total produksi energi hybrid mencapai 3,847 kWh/hari.
3. Hasil analisis konsumsi energi listrik sekolah berdasarkan data simulasi menunjukkan kebutuhan sebesar 9,480 kWh/hari. Beban listrik terbesar berasal dari penggunaan kipas angin, AC, dan lampu penerangan. Informasi tersebut dapat digunakan sebagai dasar untuk mengidentifikasi peluang penghematan energi melalui pengaturan penggunaan peralatan listrik.
4. Pengujian sensor monitoring IoT berdasarkan data simulasi menunjukkan tingkat kesalahan pengukuran berkisar antara 0,45% hingga 2,50%. Hal ini menggambarkan potensi penggunaan sensor untuk memantau parameter kelistrikan, tetapi akurasi sebenarnya masih perlu dibuktikan melalui pengujian langsung menggunakan alat ukur referensi.
5. Analisis kontribusi energi hybrid berdasarkan data simulasi menunjukkan bahwa produksi PLTS-PLTB setara dengan 40,58% dari kebutuhan energi listrik harian sekolah. Hasil ini menunjukkan potensi sistem hybrid dalam mengurangi ketergantungan terhadap energi listrik PLN dan mendukung efisiensi biaya operasional sekolah.

Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan sistem monitoring konsumsi energi hybrid PLTS-PLTB berbasis IoT berpotensi menjadi solusi untuk meningkatkan pengelolaan energi listrik di SD Muhammadiyah 39 Medan. Sistem ini tidak hanya mendukung pemantauan produksi dan konsumsi energi secara terintegrasi, tetapi juga menyediakan informasi sebagai dasar pengambilan keputusan dalam penerapan strategi penghematan energi listrik yang lebih efektif dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

[1] A. T. Lampung, “Tinjauan pemodelan sistem dan formulasi economic dispatch untuk sistem tenaga listrik hibrida berbasis variable renewable energy dengan PLTA pumped storage,” “Sutet”, vol. 10, no. 1, pp. 15–28, 2021, doi:

© 2026 The Author(s). Published by UNITY ACADEMY . This is an open access article under the CC BY-SA license (http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

10.33322/sutet.v10i1.1167.

[2] J. Hendrawan, I. D. Perwitasari, and R. S. Ritonga, "Sistem informasi siskamling untuk mewujudkan desa digital," "Jurnal Indonesia: Manajemen Informatika dan Komunikasi", vol. 4, no. 2, pp. 652–661, 2023, doi: 10.35870/jimik.v4i2.263.

[3] D. R. Hartono, M. Haddin, and A. Marwanto, "Monitoring daya listrik berbasis Internet of Things menggunakan metode simple exponential smoothing untuk prediksi kebutuhan energi," "Cyclotron: Jurnal Teknik Elektro", vol. 6, no. 2, pp. 59–67, 2023, doi: 10.30651/cl.v6i2.17948.

[4] A. B. A. Kusuma and R. Dalimi, "Analisa teknologi dan keekonomian de-dieselisasi PLTD Merawangg menjadi pembangkit tenaga angin/tenaga surya di Pulau Bangka, Bangka Belitung," "Jurnal Impresi Indonesia", vol. 4, no. 7, 2025, doi: 10.58344/jii.v4i7.6871.

[5] A. Hanafi, M. Moawed, and O. Abdellatif, "Advancing sustainable energy management: A comprehensive review of artificial intelligence techniques in building," "Engineering Research Journal", vol. 53, no. 2, pp. 26–46, 2024, doi: 10.21608/erjsh.2023.226854.1196.

[6] E. Kurniawan, D. S. Pangaudi, and E. N. Widjatmoko, "Perancangan sistem monitoring konsumsi daya listrik berbasis Android," "Cyclotron: Jurnal Teknik Elektro", vol. 5, no. 1, pp. 63–68, 2022, doi: 10.30651/cl.v5i1.8772.

[7] J. W. Jokanan, A. Widodo, N. Kholis, and L. Rakhmawati, "Rancang bangun alat monitoring daya listrik berbasis IoT menggunakan Firebase dan aplikasi Android," "Jurnal Teknik Elektro", vol. 11, no. 1, pp. 47–55, 2022, doi: 10.26740/jte.v11n1.p47-55.

[8] E. W. Pratama and A. Kiswantono, "Transformasi pemantauan energi: Kontrol daya listrik 3 fasa dengan antarmuka grafis pengguna (GUI) secara langsung," "Inter Tech", vol. 1, no. 2, pp. 76–84, 2023, doi: 10.54732/i.v1i2.1058.

[9] A. Arfittariah, Hardianto, M. S. Alfas, and K. Akhlak, "Penerapan sistem hybrid pembangkit listrik tenaga surya dan bayu sebagai solusi penerangan pada perahu nelayan di Bontang Lestari," "Jurnal Mulia", vol. 5, no. 1, pp. 26–31, 2026, doi: 10.47002/464zpv96.

[10] A. Ridhohan and I. Prastyaningrum, "Prototype sistem manajemen beban adaptif untuk meningkatkan efisiensi energi dan umur baterai pada sistem hybrid angin dan surya," "JTekEL: Jurnal Teknik Elektro", vol. 3, no. 1, pp. 54–62, 2026, doi: 10.35508/jtekel.v3i1.444.

[11] M. A. Baihaqi, H. Abdillah, A. Izzuddin, T. Asrori, A. Muhammad, and D. H. T. Prasettio, "Optimasi efisiensi solar cell melalui solar tracking dan sistem monitoring pada proteksi energi listrik," "Journal Electric Field", vol. 1, no. 1, pp. 35–45, 2024, doi: 10.63440/jef.v1i1.19.

[12] M. A. Baihaqi, W. N. Achmadin, M. Z. R. Amin, A. Mulyadi, H. Abdillah, A. Muhammad, and A. Fauzan, "Analisis integrasi IoT pada sistem pembangkit hybrid portabel pico hidro dan panel surya," "JASIEK: Jurnal Aplikasi Sains, Informasi, Elektronika dan Komputer", vol. 6, no. 2, pp. 99–106, 2024, doi: 10.26905/jasiek.v7i2.14171.

[13] I. A. Ramadhan, H. Nurdiansari, K. B. Ajie, and E. Kurniawan, "Pemanfaatan pembangkit listrik tenaga hibrida pada prototipe pelabuhan pintar

© 2026 The Author(s). Published by UNITY ACADEMY . This is an open access article under the CC BY-SA license (http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

menggunakan Raspberry Pi," "Jurnal Teknologi dan Manajemen Industri Terapan", vol. 5, no. 2, pp. 866–874, 2026, doi: 10.55826/jtmit.v5i2.1762.

[14] R. S. Sampe, "Perancangan kendali sistem hybrid untuk penyaluran daya ke beban pada daerah terisolir," Skripsi, Program Studi Sarjana Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Gowa, 2024.

[15] R. Malah, Z. Aring, R. P. Anung, L. A. Wenno, and F. J. Doringin, "Perancangan sistem proteksi baterai berbasis load shedding pada sistem hybrid (PLTS-PLTB) rumah apung," "Cyclotron: Jurnal Teknik Elektro", vol. 9, no. 2, pp. 10–18, 2026, doi: 10.30651/ct.v9i02.31314.

© 2026 The Author(s). Published by UNITY ACADEMY . This is an open access article under the CC BY-SA license (http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)