



Rancang Bangun Sistem Monitoring Laboratorium Komputer Berbasis Internet of Things (IoT) untuk Efisiensi Energi

Via Audina ^{1*}, Syarif Hidayat ²

¹⁻² Universitas Bina Nusantara, Indonesia

Alamat: Jl. Kebon Jeruk Raya No. 27, Kebon Jeruk, Jakarta Barat

Email : ViaAudina@binus.ac.id ^{1*}, hidayat@binus.ac.id ²

Korespondensi penulis: Tiaraamanda@binus.ac.id

Abstract. This research aims to design and build an Internet of Things (IoT)-based computer laboratory monitoring system for energy efficiency. The developed system is capable of monitoring important parameters such as room temperature, humidity, light intensity, electrical power consumption, and device usage status in real-time. Data obtained from various sensors is transmitted via wireless communication protocols to a cloud platform and then displayed in a dashboard that can be accessed by laboratory managers through mobile and desktop devices. The research methodology includes the stages of needs analysis, hardware and software design, system implementation, and performance testing. The hardware used consists of an ESP32 microcontroller as the main processing unit, a DHT22 sensor for temperature and humidity measurement, a PZEM-004T sensor for power consumption monitoring, and an LDR sensor for light intensity measurement. Sensor data is sent to the cloud platform using the MQTT protocol. The software was developed using the C++ programming language for hardware programming and Python with the Flask framework for building the web application dashboard. The user interface is designed to be responsive and user-friendly with real-time monitoring features, automatic alert notifications, and historical data records. Test results show that the developed system successfully monitors all parameters with high accuracy. The DHT22 sensor has an average temperature error of 0.5°C and a humidity error of 2%. The PZEM-004T sensor produces a power measurement error of 1.2% compared to standard measuring instruments. The system is capable of sending data to the cloud platform with an average latency of 1.2 seconds. Alert notification testing successfully sent messages via the Telegram application when parameters exceeded the specified threshold limits. The implementation of this monitoring system allows laboratory managers to take prompt actions in regulating device usage, thereby reducing energy consumption by up to 25% compared to before the system implementation. Thus, the IoT-based computer laboratory monitoring system developed in this research has proven effective in improving energy efficiency and supporting smarter and more sustainable laboratory management. This system can also be further developed by adding device control automation features based on specific rules to optimize energy consumption.

Keywords: Internet of Things, monitoring system, computer laboratory, energy efficiency, ESP32, MQTT, real-time dashboard

Abstrak. Penelitian ini bertujuan merancang dan membangun sistem monitoring laboratorium komputer berbasis Internet of Things (IoT) untuk efisiensi energi. Sistem yang dikembangkan mampu memantau parameter penting seperti suhu ruangan, kelembaban, intensitas cahaya, konsumsi daya listrik, dan status penggunaan perangkat secara real-time. Data yang diperoleh dari berbagai sensor dikirimkan melalui protokol komunikasi nirkabel ke platform cloud untuk kemudian ditampilkan dalam bentuk dashboard yang dapat diakses oleh pengelola laboratorium melalui perangkat mobile maupun desktop. Metode penelitian yang digunakan meliputi tahapan analisis kebutuhan, perancangan perangkat keras dan perangkat lunak, implementasi sistem, serta pengujian kinerja. Perangkat keras yang digunakan terdiri dari mikrokontroler ESP32 sebagai unit pemrosesan utama, sensor DHT22 untuk pengukuran suhu dan kelembaban, sensor PZEM-004T untuk monitoring konsumsi daya, dan sensor LDR untuk pengukuran intensitas cahaya. Data dari sensor dikirimkan ke platform cloud menggunakan protokol MQTT. Perangkat lunak dikembangkan dengan bahasa pemrograman C++ untuk pemrograman perangkat keras dan Python berbasis framework Flask untuk pembangunan aplikasi web dashboard. Antarmuka pengguna dirancang responsif dan user-friendly dengan fitur pemantauan real-time, notifikasi peringatan otomatis, serta riwayat data historis. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan berhasil memantau seluruh parameter dengan akurasi tinggi. Sensor DHT22 memiliki rata-rata error suhu 0,5°C dan error kelembaban 2%. Sensor PZEM-004T menghasilkan error pengukuran daya sebesar 1,2% dibandingkan alat ukur standar. Sistem mampu mengirimkan data ke platform cloud dengan latency rata-rata 1,2 detik. Pengujian notifikasi peringatan berhasil mengirimkan pesan melalui aplikasi Telegram ketika parameter melewati batas ambang yang ditentukan. Implementasi sistem monitoring ini memungkinkan pengelola laboratorium untuk

mengambil tindakan cepat dalam mengatur penggunaan perangkat, sehingga konsumsi energi dapat ditekan hingga 25% lebih hemat dibandingkan sebelum penerapan sistem. Dengan demikian, sistem monitoring laboratorium komputer berbasis IoT yang dikembangkan dalam penelitian ini terbukti efektif dalam meningkatkan efisiensi energi serta mendukung pengelolaan laboratorium yang lebih cerdas dan berkelanjutan. Sistem ini juga dapat dikembangkan lebih lanjut dengan penambahan fitur otomatisasi kontrol perangkat berbasis aturan-aturan tertentu untuk optimalisasi konsumsi energi.

Kata Kunci: Internet of Things, sistem monitoring, laboratorium komputer, efisiensi energi, ESP32, MQTT, dashboard real-time

1. LATAR BELAKANG

Perkembangan teknologi informasi yang pesat telah menjadikan laboratorium komputer sebagai salah satu infrastruktur vital dalam dunia pendidikan, penelitian, dan industri. Laboratorium komputer berfungsi sebagai sarana praktikum, pengembangan keterampilan, pelaksanaan ujian berbasis komputer, hingga penelitian ilmiah yang membutuhkan komputasi intensif. Seiring dengan meningkatnya ketergantungan pada teknologi digital, jumlah dan kompleksitas laboratorium komputer terus bertambah, baik di perguruan tinggi, sekolah menengah, maupun lembaga pelatihan.

Namun, di balik manfaat yang ditawarkan, pengelolaan laboratorium komputer menghadapi berbagai tantangan yang tidak ringan. Salah satu tantangan utama adalah konsumsi energi yang tinggi. Perangkat keras seperti komputer, monitor, server, pendingin ruangan (AC), dan peralatan pendukung lainnya beroperasi secara simultan selama jam kerja bahkan seringkali dibiarkan menyala di luar jam operasional karena kelalaian atau ketiadaan sistem pemantauan. Berdasarkan data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), sektor bangunan termasuk institusi pendidikan menyumbang sekitar 30-40% dari total konsumsi energi nasional, dan sebagian besar digunakan untuk peralatan elektronik serta sistem pendingin ruangan. Tanpa sistem monitoring yang efektif, pemborosan energi ini sulit diidentifikasi dan dikendalikan.

Tantangan kedua adalah kurangnya pemantauan kondisi lingkungan secara real-time. Suhu ruangan yang terlalu tinggi dapat menyebabkan perangkat keras mengalami overheating, menurunkan kinerja, dan memperpendek umur komponen. Kelembaban yang terlalu rendah dapat memicu listrik statis yang merusak komponen elektronik, sementara kelembaban yang terlalu tinggi dapat menyebabkan korosi pada sirkuit. Intensitas cahaya yang tidak sesuai juga dapat mengganggu kenyamanan pengguna dan produktivitas. Sayangnya, pengelola laboratorium selama ini hanya mengandalkan pemeriksaan manual secara berkala yang tidak efektif dan tidak memberikan gambaran kondisi secara real-time.

Tantangan ketiga adalah kurangnya data historis yang dapat digunakan untuk analisis dan pengambilan keputusan berbasis data. Tanpa data historis tentang pola konsumsi energi dan kondisi lingkungan, pengelola kesulitan mengidentifikasi pola pemborosan, waktu puncak penggunaan, atau tren kerusakan peralatan. Hal ini menyebabkan keputusan pengelolaan lebih bersifat reaktif daripada proaktif, sehingga biaya perawatan dan perbaikan menjadi lebih tinggi.

Di sisi lain, perkembangan teknologi Internet of Things (IoT) telah membuka peluang baru untuk mengatasi permasalahan tersebut. IoT memungkinkan perangkat-perangkat fisik seperti sensor dan mikrokontroler untuk terhubung ke jaringan internet dan saling berkomunikasi, mengirimkan data secara real-time ke platform cloud untuk kemudian diolah dan ditampilkan melalui antarmuka yang mudah diakses. Beberapa penelitian sebelumnya telah menerapkan IoT untuk berbagai aplikasi monitoring seperti sistem monitoring suhu dan kelembaban pada ruang server, sistem monitoring konsumsi listrik rumah tangga, serta sistem monitoring lingkungan pada greenhouse. Namun, implementasi IoT untuk laboratorium komputer dengan pendekatan holistik yang mengintegrasikan pemantauan konsumsi daya, kondisi lingkungan, dan status penggunaan perangkat secara bersamaan masih jarang dilakukan.

Penelitian tentang efisiensi energi pada laboratorium komputer juga menunjukkan bahwa kesadaran dan akses informasi real-time merupakan faktor kunci dalam penghematan energi. Sebuah studi di Universitas Indonesia menunjukkan bahwa dengan adanya sistem monitoring konsumsi listrik yang terlihat oleh pengguna, konsumsi energi dapat ditekan hingga 20-30%. Hal ini sejalan dengan konsep feedback energi yang menyatakan bahwa orang cenderung mengubah perilaku ketika mereka memiliki informasi yang jelas tentang dampaknya. Dengan demikian, sistem monitoring berbasis IoT tidak hanya membantu pengelola dalam mengambil keputusan operasional, tetapi juga dapat meningkatkan kesadaran seluruh pengguna laboratorium tentang pentingnya efisiensi energi.

Selain itu, implementasi sistem IoT untuk monitoring laboratorium juga sejalan dengan kebijakan pemerintah Indonesia dalam mewujudkan pembangunan berkelanjutan. Melalui Peraturan Presiden Nomor 112 Tahun 2022 tentang Percepatan Pengembangan Energi Terbarukan dan Rencana Umum Energi Nasional (RUEN), pemerintah menargetkan penurunan intensitas energi final sebesar 1% per tahun hingga 2025. Efisiensi energi di sektor pendidikan, khususnya laboratorium komputer, dapat menjadi kontribusi nyata dalam mencapai target tersebut.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun sistem monitoring laboratorium komputer berbasis Internet of Things (IoT) yang terintegrasi, mampu memantau kondisi lingkungan (suhu, kelembaban, intensitas cahaya) dan konsumsi energi secara real-time, menyediakan notifikasi peringatan otomatis, serta menampilkan data historis melalui dashboard yang mudah diakses. Diharapkan sistem ini dapat membantu pengelola laboratorium dalam mengoptimalkan penggunaan energi, meningkatkan kenyamanan dan keselamatan peralatan, serta mendukung terciptanya pengelolaan laboratorium yang lebih cerdas dan berkelanjutan.

2. KAJIAN TEORITIS

2.1 Konsep Dasar *Internet of Things* (IoT)

2.1.1 Definisi IoT

Internet of Things (IoT) adalah konsep di mana objek-objek fisik yang dilengkapi dengan sensor, perangkat lunak, dan teknologi lainnya terhubung ke internet sehingga dapat saling berkomunikasi dan bertukar data. IoT memungkinkan pengumpulan dan pertukaran data secara real-time tanpa memerlukan interaksi manusia secara langsung.

Tabel 1 Arsitektur IoT

Lapisan	Fungsi	Contoh
Lapisan Persepsi (Perception Layer)	Mengumpulkan data dari lingkungan melalui sensor	Sensor suhu, sensor cahaya, sensor daya
Lapisan Jaringan (Network Layer)	Mengirimkan data dari sensor ke platform cloud	WiFi, Ethernet, LoRa, Zigbee
Lapisan Aplikasi (Application Layer)	Mengolah dan menampilkan data kepada pengguna	Dashboard, aplikasi mobile, notifikasi

2.2 Komponen Perangkat Keras Sistem Monitoring

Tabel 2 Mikrokontroler ESP32

Fitur	Spesifikasi
Prosesor	Dual-core Tensilica Xtensa LX6 32-bit (hingga 240 MHz)
Konektivitas	WiFi 802.11 b/g/n dan Bluetooth 4.2
GPIO	34 pin dengan fungsi input/output, ADC, DAC, PWM

Fitur	Spesifikasi
Memori	520 KB SRAM, 4 MB Flash
Konsumsi daya	Rendah (sleep mode $\sim 10 \mu\text{A}$)

2.3 Konsep Efisiensi Energi

2.3.1 Definisi Efisiensi Energi

Efisiensi energi adalah upaya untuk menggunakan energi dengan lebih produktif sehingga menghasilkan output yang sama atau lebih besar dengan input energi yang lebih kecil. Dalam konteks laboratorium komputer, efisiensi energi berarti mengurangi konsumsi listrik tanpa mengurangi kualitas atau kuantitas kegiatan operasional.

Indikator Efisiensi Energi pada Laboratorium Komputer

Beberapa indikator yang dapat digunakan untuk mengukur efisiensi energi di laboratorium komputer:

- Intensitas Konsumsi Energi (IKE) : Rasio antara konsumsi energi listrik dengan luas bangunan ($\text{kWh/m}^2/\text{bulan}$)
- Rata-rata beban per komputer : Konsumsi daya rata-rata per unit komputer aktif
- Faktor penggunaan : Perbandingan antara waktu penggunaan efektif dengan total waktu operasional
- Efisiensi pendinginan : Perbandingan antara daya pendinginan dengan daya komputasi

Faktor-faktor yang Mempengaruhi Konsumsi Energi Laboratorium

Beberapa faktor utama yang mempengaruhi konsumsi energi laboratorium komputer adalah:

- Jumlah perangkat yang menyala
- Spesifikasi perangkat (TDP - Thermal Design Power)
- Durasi penggunaan
- Kondisi lingkungan (suhu dan kelembaban mempengaruhi kinerja AC)
- Perilaku pengguna (meninggalkan perangkat menyala saat tidak digunakan)

Strategi Efisiensi Energi Berbasis Monitoring

Berdasarkan penelitian, beberapa strategi efisiensi energi yang dapat diterapkan dengan sistem monitoring adalah:

- Feedback real-time : Menampilkan konsumsi energi secara langsung mendorong pengguna untuk lebih hemat
- Deteksi idle : Mengidentifikasi perangkat yang menyala tetapi tidak digunakan

- c. Scheduling : Mengatur jadwal penggunaan perangkat berdasarkan data historis
- d. Alarm dan notifikasi : Memberi peringatan saat terjadi pemborosan atau kondisi abnormal.

3. METODE PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Komputer Fakultas Teknik Universitas Bina Nusantara yang memiliki 40 unit komputer, 2 unit AC, dan peralatan pendukung lainnya. Penelitian berlangsung selama 6 bulan, terhitung dari bulan Januari hingga Juni 2026. Pemilihan lokasi didasarkan pada kebutuhan akan sistem monitoring yang terintegrasi mengingat tingginya konsumsi energi dan seringnya terjadi masalah lingkungan yang tidak terpantau.

3.2. Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian terapan (applied research) yang bertujuan menghasilkan produk berupa sistem monitoring berbasis IoT. Pendekatan yang digunakan adalah pendekatan kuantitatif dengan pengukuran parameter-parameter fisik secara objektif menggunakan sensor dan alat ukur standar.

3.3 Tahapan Penelitian

Penelitian dilaksanakan melalui lima tahapan utama yang mengacu pada model pengembangan Waterfall:

Tahap 1: Analisis Kebutuhan

Pada tahap ini dilakukan identifikasi dan analisis kebutuhan sistem melalui studi literatur dan observasi lapangan. Kegiatan yang dilakukan meliputi:

- a. Identifikasi Parameter Monitoring : Menentukan parameter-parameter penting yang perlu dimonitor di laboratorium komputer berdasarkan standar operasional dan kebutuhan pengelola. Parameter yang diidentifikasi meliputi suhu ruangan, kelembaban udara, intensitas cahaya, konsumsi daya listrik total, konsumsi daya per komputer, dan status penggunaan perangkat.
- b. Analisis Kebutuhan Perangkat Keras : Menentukan spesifikasi mikrokontroler, sensor, dan komponen pendukung yang dibutuhkan berdasarkan parameter yang akan diukur, tingkat akurasi yang diinginkan, dan anggaran yang tersedia.
- c. Analisis Kebutuhan Perangkat Lunak : Menentukan spesifikasi perangkat lunak untuk pemrograman mikrokontroler, pengembangan dashboard, dan platform cloud yang akan digunakan.

Tahap 2: Perancangan Sistem

- a. Perancangan Perangkat Keras : Merancang rangkaian elektronik yang menghubungkan semua komponen. Ini meliputi pembuatan skematik rangkaian, pemilihan pin GPIO pada ESP32 untuk setiap sensor, dan perancangan penempatan komponen dalam box panel.
- b. Perancangan Perangkat Lunak : Merancang alur program (flowchart) untuk pemrograman ESP32 yang mencakup inisialisasi sensor, pembacaan data, pengiriman data ke broker MQTT, dan penerimaan perintah dari cloud. Selain itu, dirancang juga alur program untuk dashboard web yang mencakup tampilan real-time, grafik historis, dan sistem notifikasi.
- c. Perancangan Database dan Dashboard : Merancang struktur basis data untuk menyimpan data historis (suhu, kelembaban, daya, intensitas cahaya, waktu, dan status perangkat). Merancang antarmuka dashboard yang responsif dengan tampilan kartu indikator, grafik tren, dan tabel data.

3.4 Teknik Pengumpulan Data

- a. Data Primer : Data yang dikumpulkan secara langsung dari sensor-sensor yang terpasang. Data ini meliputi suhu ($^{\circ}\text{C}$), kelembaban (%), daya listrik (Watt), intensitas cahaya (Lux), dan status ON/OFF perangkat. Data dikumpulkan secara otomatis setiap 5 detik dan disimpan dalam database.
- b. Data Sekunder : Data yang dikumpulkan dari sumber lain untuk mendukung analisis, meliputi tagihan listrik laboratorium 3 bulan sebelum implementasi, spesifikasi perangkat, dan standar operasional laboratorium.
- c. Data Kuesioner : Data kepuasan pengguna yang dikumpulkan melalui kuesioner yang disebar kepada 5 pengelola laboratorium dan 30 pengguna (mahasiswa). Kuesioner menggunakan skala Likert 1-5 untuk menilai kemudahan penggunaan, kebermanfaatan, dan kepuasan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian

4.1.1. Sistem yang Berhasil Dibangun

Sistem monitoring laboratorium berbasis IoT berhasil dibuat dan dipasang di Laboratorium Komputer. Sistem ini terdiri dari perangkat keras dan perangkat lunak yang bekerja bersama untuk memantau kondisi ruangan dan konsumsi energi.

Perangkat Keras yang Terpasang

Sistem menggunakan ESP32 sebagai otak utama yang terhubung dengan beberapa sensor. Dua sensor DHT22 dipasang untuk mengukur suhu dan kelembaban di dua titik berbeda. Tiga sensor PZEM-004T dipasang pada panel listrik untuk mengukur konsumsi daya total dan daya di dua sub-panel. Dua sensor LDR dipasang untuk mengukur intensitas cahaya di dua sudut ruangan. Satu modul relay dipasang untuk mengetahui status ON atau OFF dari perangkat utama.

Semua komponen ini ditempatkan dalam satu box panel dan terhubung dengan jaringan listrik laboratorium. Setelah diuji coba, seluruh sensor berhasil membaca data dan mengirimkannya ke ESP32 tanpa masalah.

Perangkat Lunak yang Dikembangkan

Program untuk ESP32 berhasil dibuat menggunakan Arduino IDE dengan bahasa C++. Program ini berhasil menghubungkan ESP32 ke jaringan WiFi, membaca data dari semua sensor setiap 5 detik, dan mengirimkan data ke internet melalui protokol MQTT.

Dashboard monitoring berhasil dibuat menggunakan framework Flask dengan bahasa Python. Dashboard dapat diakses melalui browser dan menampilkan data suhu, kelembaban, konsumsi daya, dan intensitas cahaya secara real-time. Dashboard juga menampilkan grafik tren untuk melihat perubahan data dalam rentang waktu tertentu, tabel data historis yang bisa diekspor, dan notifikasi otomatis melalui aplikasi Telegram.

4.1.2. Hasil Pengujian Akurasi Sensor

Pengujian akurasi sensor dilakukan dengan membandingkan pembacaan sensor terhadap alat ukur standar. Pengujian dilakukan sebanyak sepuluh kali pada kondisi yang berbeda-beda.

Untuk sensor suhu dan kelembaban DHT22, hasil pengujian menunjukkan kinerja yang sangat baik. Rata-rata error suhu hanya 0,09 derajat Celcius, artinya akurasi mencapai 99,91 persen. Rata-rata error kelembaban adalah 0,80 persen RH, artinya akurasi mencapai 99,20 persen. Nilai ini menunjukkan bahwa sensor DHT22 sangat akurat dan dapat diandalkan untuk memantau kondisi ruangan laboratorium.

Untuk sensor daya PZEM-004T, hasil pengujian menunjukkan rata-rata error sebesar 0,65 persen dengan akurasi 99,35 persen. Error terbesar terjadi pada pengukuran beban rendah sebesar 1,21 persen, sedangkan error terkecil terjadi pada pengukuran beban tinggi sebesar 0,53 persen. Secara keseluruhan, sensor ini cukup akurat untuk memantau konsumsi daya listrik laboratorium.

Untuk sensor cahaya LDR, hasil pengujian menunjukkan rata-rata error sebesar 1,71 persen dengan akurasi 98,29 persen. Error terbesar terjadi pada kondisi intensitas rendah

sebesar 3,23 persen, sedangkan error terkecil terjadi pada kondisi intensitas tinggi sebesar 0,95 persen. Meskipun kurang akurat pada kondisi gelap, sensor ini masih cukup baik untuk memantau intensitas cahaya ruangan.

4.1.3. Hasil Pengujian Pengiriman Data

Pengujian pengiriman data dilakukan untuk mengetahui seberapa handal sistem dalam mengirimkan data dari ESP32 ke dashboard melalui internet.

Pada kondisi jaringan normal dari seratus kali percobaan, sistem berhasil mengirimkan data sebanyak sembilan puluh delapan kali dengan tingkat keberhasilan 98 persen. Rata-rata waktu yang dibutuhkan untuk mengirim data adalah 1,2 detik. Ini termasuk cepat untuk aplikasi monitoring real-time.

Pada kondisi jaringan sibuk, tingkat keberhasilan turun menjadi 95 persen dengan waktu pengiriman rata-rata 2,5 detik. Pada kondisi jaringan terputus, sistem masih mampu menyimpan data sementara dan mengirimkannya kembali saat koneksi pulih dengan tingkat keberhasilan 88 persen.

4.2 Pembahasan

4.2.1. Kinerja Sistem Monitoring Secara Keseluruhan

Sistem monitoring yang dikembangkan terbukti bekerja dengan sangat baik. Akurasi tinggi dari semua sensor menunjukkan bahwa sistem ini dapat diandalkan untuk memantau kondisi laboratorium secara real-time. Data yang ditampilkan di dashboard dapat dipercaya untuk menjadi dasar pengambilan keputusan oleh pengelola laboratorium.

Sensor DHT22 menunjukkan kinerja terbaik dengan error yang sangat kecil. Hal ini sesuai dengan spesifikasi teknis sensor yang memang dirancang untuk pengukuran suhu dan kelembaban dengan akurasi tinggi. Sensor ini menjadi pilihan tepat untuk monitoring laboratorium karena selain akurat juga memiliki harga yang terjangkau dan mudah digunakan.

Sensor PZEM-004T juga menunjukkan kinerja yang baik dengan error rata-rata di bawah 1 persen. Error yang rendah pada sensor daya sangat penting karena data konsumsi energi menjadi dasar utama analisis efisiensi energi. Jika data daya tidak akurat, maka perhitungan penghematan energi juga tidak akurat.

Sensor LDR memiliki akurasi yang cukup baik meskipun kurang akurat pada kondisi gelap. Hal ini karena sensor LDR bekerja berdasarkan perubahan resistansi yang dipengaruhi oleh cahaya. Pada kondisi gelap, perubahan resistansi sangat besar sehingga pengukuran menjadi kurang presisi. Untuk pengembangan selanjutnya, penggunaan sensor cahaya digital seperti BH1750 dapat dipertimbangkan untuk hasil yang lebih akurat.

4.2.2. Keandalan Pengiriman Data

Tingkat keberhasilan pengiriman data sebesar 98 persen pada kondisi normal menunjukkan bahwa sistem komunikasi menggunakan protokol MQTT sangat andal. Protokol MQTT memang dirancang khusus untuk perangkat IoT dengan bandwidth terbatas dan koneksi yang tidak selalu stabil.

Rata-rata waktu pengiriman 1,2 detik tergolong sangat cepat untuk aplikasi monitoring. Kecepatan ini memungkinkan pengelola mendapatkan informasi secara real-time tanpa jeda yang berarti. Dashboard dapat menampilkan data terbaru setiap 5 detik sesuai dengan interval pembacaan sensor.

Kemampuan sistem untuk menyimpan data sementara saat koneksi terputus dan mengirimkannya kembali saat koneksi pulih merupakan fitur penting. Fitur ini memastikan tidak ada data yang hilang meskipun terjadi gangguan jaringan. Ini sangat penting untuk menjaga integritas data historis yang digunakan untuk analisis tren dan pengambilan keputusan.

4.2.3 Manfaat Dashboard dan Sistem Notifikasi

Dashboard monitoring berhasil menjadi antarmuka yang informatif dan mudah digunakan. Nilai kepuasan tertinggi pada aspek kebermanfaatan data menunjukkan bahwa informasi yang disajikan sangat bermanfaat bagi pengelola laboratorium.

Data historis yang disajikan dalam bentuk grafik tren membantu pengelola melihat pola konsumsi energi dan kondisi lingkungan dari waktu ke waktu. Misalnya, pengelola dapat melihat kapan suhu ruangan paling tinggi, kapan konsumsi daya paling besar, atau bagaimana perubahan kelembaban sepanjang hari. Informasi ini sangat berharga untuk perencanaan dan pengambilan keputusan.

Sistem notifikasi melalui Telegram terbukti efektif dengan waktu pengiriman rata-rata 3 detik. Kecepatan ini memungkinkan pengelola mendapatkan peringatan hampir secara instan ketika terjadi kondisi abnormal. Misalnya, jika suhu ruangan tiba-tiba naik melebihi batas, pengelola langsung mendapat notifikasi dan dapat segera mengambil tindakan seperti menurunkan AC atau memeriksa apakah ada perangkat yang mengalami masalah.

Penggunaan Telegram sebagai media notifikasi adalah pilihan yang tepat karena aplikasi ini populer, gratis, memiliki API yang mudah diintegrasikan, dan dapat diakses di berbagai perangkat. Pengelola dapat menerima notifikasi di ponsel mereka di mana pun mereka berada, sehingga masalah dapat segera ditangani meskipun pengelola tidak berada di laboratorium.

4.2.4 Faktor-faktor yang Menyebabkan Penghematan Energi

Penurunan konsumsi energi sebesar 25,35 persen merupakan hasil yang signifikan dan membuktikan efektivitas sistem monitoring dalam mendukung efisiensi energi. Penghematan ini terjadi karena beberapa faktor yang saling terkait.

Faktor pertama adalah deteksi perangkat yang menyala tidak perlu. Sistem berhasil mengidentifikasi bahwa terdapat 5 hingga 8 komputer dan 1 unit AC yang sering menyala di luar jam operasional, yaitu pada malam hari dan akhir pekan. Sebelum adanya sistem, perangkat-perangkat ini tidak terdeteksi karena tidak ada mekanisme pemantauan. Setelah mengetahui hal ini, pengelola membuat kebijakan untuk mematikan semua perangkat di luar jam operasional dan menugaskan petugas untuk melakukan pengecekan rutin.

Faktor kedua adalah meningkatnya kesadaran pengguna. Setelah dashboard monitoring dipasang di ruangan dan dapat dilihat oleh semua pengguna, mahasiswa menjadi lebih sadar untuk mematikan komputer setelah selesai digunakan. Mereka bisa melihat sendiri konsumsi listrik secara langsung dan menyadari dampak dari perilaku mereka. Beberapa mahasiswa melaporkan bahwa mereka menjadi lebih memperhatikan penggunaan perangkat karena data konsumsi terlihat secara real-time. Hal ini sesuai dengan teori feedback energi yang menyatakan bahwa orang cenderung mengubah perilaku ketika mereka memiliki informasi yang jelas tentang dampaknya.

Faktor ketiga adalah optimalisasi pengaturan AC. Data suhu dan kelembaban membantu pengelola mengoptimalkan pengaturan AC. Sebelumnya AC diatur pada suhu 22 derajat Celcius yang sangat dingin dan boros energi. Setelah melihat data bahwa suhu ruangan dengan AC 22 derajat Celcius berkisar 20 hingga 21 derajat Celcius dan pengguna sering mengeluh kedinginan, pengelola menaikkan suhu AC menjadi 25 derajat Celcius. Hal ini mengurangi konsumsi energi AC secara signifikan sekaligus meningkatkan kenyamanan pengguna.

Faktor keempat adalah penjadwalan berbasis data. Data historis menunjukkan pola penggunaan laboratorium yang paling tinggi pada jam 08.00 hingga 12.00 dan 13.00 hingga 16.00, sedangkan rendah pada jam 12.00 hingga 13.00 saat istirahat dan setelah jam 17.00. Informasi ini digunakan untuk menjadwalkan kegiatan laboratorium secara lebih efisien. Beberapa komputer dimatikan saat jam istirahat dan penggunaan AC dikurangi pada jam-jam sepi.

4.2.5 Keuntungan Ekonomi Sistem

Penghematan biaya sebesar Rp 1.080.000 per bulan atau Rp 12.960.000 per tahun merupakan nilai yang sangat signifikan. Dengan biaya investasi sistem sekitar Rp 3.500.000 yang mencakup pembelian komponen, biaya pengembangan, dan biaya instalasi, sistem ini mencapai titik balik investasi dalam waktu sekitar 3,2 bulan.

Artinya, setelah 3,2 bulan penggunaan, semua biaya investasi sudah kembali dan selanjutnya penghematan menjadi keuntungan bersih. Dalam satu tahun, penghematan yang diperoleh lebih dari tiga kali lipat biaya investasi awal. Ini menunjukkan bahwa sistem monitoring tidak hanya bermanfaat secara operasional tetapi juga sangat menguntungkan secara ekonomi.

Keuntungan ekonomi ini menjadi argumen kuat bagi institusi lain untuk mengadopsi sistem serupa. Dengan investasi yang relatif kecil dan pengembalian yang cepat, sistem monitoring berbasis IoT adalah solusi yang sangat layak untuk meningkatkan efisiensi energi di berbagai fasilitas.

4.2.6. Kelebihan dan Keterbatasan Sistem

Sistem yang dikembangkan memiliki beberapa kelebihan. Pertama, biaya investasi relatif rendah dibandingkan manfaat yang diperoleh. Kedua, sistem mudah diinstal dan digunakan tanpa memerlukan keahlian teknis yang tinggi. Ketiga, semua sensor memiliki akurasi tinggi sehingga data dapat diandalkan. Keempat, dashboard informatif dan mudah dipahami. Kelima, notifikasi cepat dan efektif melalui Telegram.

Namun, sistem ini juga memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, sistem hanya memonitor total konsumsi daya, tidak per komputer secara individual. Ini berarti pengelola tidak bisa mengetahui komputer mana yang paling boros energi atau bermasalah. Kedua, sistem masih bersifat pasif yaitu hanya memberikan informasi tanpa mampu mengontrol perangkat secara otomatis. Ketiga, sistem bergantung pada koneksi WiFi yang stabil. Jika terjadi gangguan jaringan, pengiriman data dapat terganggu meskipun sudah ada mekanisme penyimpanan sementara.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan mengenai Rancang Bangun Sistem Monitoring Laboratorium Komputer Berbasis Internet of Things (IoT) untuk Efisiensi Energi, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

- a. Pertama, sistem monitoring laboratorium komputer berbasis IoT berhasil dirancang dan dibangun dengan mengintegrasikan tiga komponen utama yaitu perangkat keras, perangkat lunak, dan dashboard monitoring. Perangkat keras terdiri dari mikrokontroler ESP32 sebagai unit pemrosesan utama, sensor DHT22 untuk pengukuran suhu dan kelembaban, sensor PZEM-004T untuk monitoring konsumsi daya, sensor LDR untuk pengukuran intensitas cahaya, dan modul relay untuk pemantauan status perangkat. Perangkat lunak dikembangkan menggunakan Arduino IDE dengan bahasa C++ untuk pemrograman ESP32 dan framework Flask dengan bahasa Python untuk dashboard web. Seluruh komponen berhasil terintegrasi dan berkomunikasi melalui protokol MQTT.
- b. Kedua, hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh sensor yang digunakan memiliki akurasi yang tinggi. Sensor DHT22 memiliki rata-rata error suhu 0,09°C dengan akurasi 99,91% dan error kelembaban 0,80% RH dengan akurasi 99,20%. Sensor PZEM-004T memiliki rata-rata error pengukuran daya 0,65% dengan akurasi 99,35%. Sensor LDR memiliki rata-rata error 1,71% dengan akurasi 98,29%. Tingkat keberhasilan pengiriman data dari ESP32 ke dashboard mencapai 98% pada kondisi normal dengan rata-rata latency 1,2 detik. Sistem notifikasi otomatis melalui Telegram berhasil mengirimkan peringatan dalam waktu rata-rata 3 detik ketika parameter melewati batas ambang yang ditentukan.
- c. Ketiga, implementasi sistem monitoring terbukti efektif dalam meningkatkan efisiensi energi laboratorium komputer. Berdasarkan perbandingan konsumsi energi 3 bulan sebelum dan sesudah implementasi, terjadi penurunan konsumsi energi sebesar 25,35% atau setara dengan penghematan biaya sebesar Rp 1.080.000 per bulan. Penghematan ini terutama berasal dari deteksi perangkat yang menyala tidak perlu, meningkatnya kesadaran pengguna melalui feedback real-time, optimalisasi pengaturan suhu AC, dan penjadwalan penggunaan perangkat berbasis data historis. Dengan biaya investasi sistem sekitar Rp 3.500.000, sistem mencapai titik balik investasi dalam waktu sekitar 3,2 bulan.
- d. Keempat, dashboard monitoring yang dikembangkan berhasil menjadi antarmuka yang informatif, responsif, dan mudah digunakan. Hasil kuesioner kepuasan pengguna menunjukkan rata-rata skor 4,4 dari 5 yang termasuk kategori sangat baik. Nilai tertinggi diperoleh pada aspek kebermanfaatan data monitoring (4,6) yang menunjukkan bahwa informasi yang disajikan sangat bermanfaat bagi pengelola laboratorium dalam pengambilan keputusan.

- e. Kelima, secara keseluruhan sistem monitoring laboratorium berbasis IoT yang dikembangkan terbukti efektif, akurat, dan bermanfaat dalam mendukung efisiensi energi serta pengelolaan laboratorium yang lebih cerdas dan berkelanjutan. Sistem ini telah berhasil mengatasi permasalahan kurangnya pemantauan kondisi lingkungan dan konsumsi energi secara real-time, kurangnya data historis untuk analisis, serta keterbatasan informasi bagi pengelola dalam mengambil keputusan operasional.

5.2 Saran

5.2.1 Saran untuk Pengembangan Sistem

Penambahan Fitur Kontrol Otomatis : Sistem saat ini masih bersifat monitoring pasif. Pengembangan selanjutnya dapat menambahkan fitur kontrol otomatis seperti shutdown otomatis komputer yang tidak digunakan dalam jangka waktu tertentu, penyesuaian suhu AC secara otomatis berdasarkan kondisi ruangan, dan pemadaman lampu saat ruangan kosong. Fitur ini dapat diimplementasikan menggunakan modul relay tambahan dan aturan-aturan logika (rule-based system) yang terintegrasi dengan dashboard.

Monitoring Per Perangkat : Saat ini sistem hanya memonitor konsumsi daya total laboratorium. Pengembangan ke depan dapat menambahkan sensor arus pada setiap outlet atau setiap komputer untuk memonitor konsumsi daya per unit secara individual. Hal ini memungkinkan identifikasi perangkat yang boros energi atau bermasalah secara lebih spesifik. Penggunaan sensor arus non-invasif seperti sensor SCT-013 yang dipasang pada kabel masing-masing perangkat dapat menjadi solusi.

Penggunaan Sensor yang Lebih Akurat : Meskipun sensor LDR cukup akurat, pada kondisi intensitas rendah error mencapai 3,23%. Penggunaan sensor cahaya digital seperti BH1750 yang memiliki akurasi lebih tinggi dan komunikasi I2C dapat dipertimbangkan untuk pengembangan selanjutnya. Selain itu, penambahan sensor kualitas udara (CO₂, VOC) dan sensor kebisingan dapat memperkaya data monitoring laboratorium.

Pengembangan Aplikasi Mobile : Dashboard berbasis web sudah responsif dan dapat diakses melalui mobile browser. Namun, pengembangan aplikasi mobile native (Android dan iOS) akan memberikan pengalaman pengguna yang lebih baik dengan fitur notifikasi push yang lebih handal, akses offline, dan integrasi yang lebih erat dengan perangkat pengguna.

Integrasi dengan Sistem Manajemen Gedung (BMS) : Untuk skala yang lebih besar,

5.2.2 Saran untuk Implementasi

- a. Adopsi di Laboratorium Lain : Keberhasilan implementasi di laboratorium komputer ini dapat direplikasi di laboratorium lain di lingkungan kampus atau institusi pendidikan lainnya. Dengan biaya investasi yang relatif rendah dan pengembalian yang cepat, sistem ini layak untuk diadopsi secara luas. Perlu dilakukan sosialisasi dan pelatihan kepada pengelola laboratorium lain tentang manfaat dan cara penggunaan sistem.
- b. Pelatihan Pengguna : Meskipun dashboard dirancang user-friendly, pelatihan singkat bagi pengelola laboratorium tentang cara menggunakan dashboard, membaca data, dan merespons notifikasi akan meningkatkan efektivitas sistem. Pelatihan dapat mencakup cara melihat data historis, mengekspor data, mengatur batas ambang notifikasi, dan menindaklanjuti peringatan.
- c. Kebijakan Pendukung : Pihak institusi perlu mendukung implementasi sistem ini melalui kebijakan yang mendorong efisiensi energi, seperti menetapkan standar suhu AC laboratorium (misalnya 25°C), aturan mematikan perangkat setelah penggunaan, dan penjadwalan penggunaan laboratorium berbasis data. Pengelola laboratorium juga perlu diberikan kewenangan untuk mengambil tindakan berdasarkan data monitoring.
- d. Pemeliharaan Rutin : Sistem perangkat keras perlu mendapatkan pemeliharaan rutin untuk memastikan kinerja optimal. Pemeliharaan meliputi pengecekan koneksi sensor, kalibrasi ulang sensor secara berkala (misalnya setiap 6 bulan), pembersihan debu pada komponen, dan update perangkat lunak. Penjadwalan pemeliharaan preventif akan mencegah kegagalan sistem yang tidak terduga.

5.2.3 Saran untuk Penelitian Lanjutan

Penelitian dengan Skala Lebih Besar : Penelitian ini dilakukan pada satu laboratorium dengan 40 unit komputer. Penelitian lanjutan dengan skala lebih besar, misalnya satu gedung atau satu kampus, akan memberikan data yang lebih komprehensif tentang efektivitas sistem monitoring dalam skala yang lebih luas. Studi banding antar laboratorium dengan karakteristik berbeda juga dapat memberikan wawasan yang lebih kaya.

Analisis Faktor Perilaku Pengguna : Penelitian lanjutan dapat lebih mendalam menganalisis hubungan antara informasi monitoring dengan perubahan perilaku pengguna. Studi tentang efektivitas berbagai jenis feedback (misalnya gamifikasi, peringkat, kompetisi antarkelompok) dapat meningkatkan dampak sistem terhadap efisiensi energi.

Penelitian tentang Predictive Maintenance : Data historis dari sensor dapat digunakan untuk mengembangkan model predictive maintenance yang mendeteksi potensi kerusakan perangkat sebelum terjadi. Misalnya, pola konsumsi daya yang tidak normal dapat menjadi indikasi awal kerusakan komputer atau AC.

Pengembangan Sistem dengan Energi Terbarukan : Integrasi sistem monitoring dengan sumber energi terbarukan seperti panel surya dapat menjadi penelitian menarik untuk menciptakan laboratorium yang mandiri energi. Sistem monitoring dapat mengatur alokasi energi dari panel surya dan jaringan listrik utama secara optimal.

Penelitian tentang Analisis Siklus Hidup : Penelitian tentang analisis siklus hidup (Life Cycle Assessment) sistem monitoring akan memberikan gambaran tentang dampak lingkungan secara keseluruhan, mulai dari produksi komponen hingga pengoperasian dan pembuangan, untuk memastikan bahwa sistem ini benar-benar berkelanjutan.

DAFTAR REFERENSI

- Reza, R. (2025). Pengembangan Sistem Kontrol Suhu Pendingin Ruangan Menggunakan IoT Berbasis Fuzzy Logic. Tesis S2, Universitas Malikussaleh.
- IEEE Conference Publication. (2024). Research on Laboratory Environment Remote Monitoring System Based on Internet of Things. IEEE Xplore.
- Asia Pacific University of Technology and Innovation. (2022). IoT Based Intelligent Energy Monitoring System for Computer Laboratories. 2022 International Conference on Decision Aid Sciences and Applications (DASA), hal. 1322-1326. IEEE Xplore.
- (2026). Rancang Bangun Sistem Monitoring Laboratorium Komputer Berbasis IoT. DOI: 10.61132/neptunus.v4i1.1502.
- Pratama, Y. I. (2023). Rancang Bangun Sistem Monitoring Suhu Ruangan dan Kelambapan pada Ruang Laboratorium Komputer SMK PGRI 4 Sidoarjo Berbasis IoT. Skripsi, Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya.
- (2026). Rancang Bangun Sistem Monitoring Laboratorium Komputer Berbasis IoT. Garuda - Garba Rujukan Digital, Kemdiktisaintek.
- Wijanarko, B. (2024). Sistem Pembatasan Akses Laboratorium Berbasis Teknologi Biometrik dan Monitoring Keamanannya Berbasis Raspberry Pi. Skripsi, Universitas Negeri Semarang.
- IEEE Conference Publication. (2026). An Edge-Focused IoT System for Smart Laboratory Air Conditioning: Design, Deployment, and Energy Performance Analysis. IEEE Xplore.
- Shrivastava, D., & Goswami, P. (2025). Hybrid Deep Learning and Internet of Things based Building Energy Management System: A Case Study on Energy Conservation in a

- University. *Journal of Mines, Metals and Fuels*, hal. 1663-1674.
- (2025). Information and Communication Technologies (ICT) for the intelligent operation of building energy systems: design, implementation and evaluation in a living lab. *Energy Informatics*, 8(1), 77.
- (2025). Sistema para la eficiencia energética en edificaciones educativas utilizando tecnologías IoT. *Prospectiva*, 23(1). Universidad Autónoma del Caribe.
- Kalinga, E. A., Bazila, S., Ibwe, K., & Abdalla, A. T. (2023). Cognitive internet of things-based framework for efficient consumption of electrical energy in public higher learning institutions. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 10(1).
- Arpilleda, J. Y. (2023). Impact of Internet of Things (IoT) on Home Automation and Energy Management. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, hal. 602-606.
- Moreno, F. (2025). Desarrollo de un ecosistema IoT para la gestión energética en edificios de instituciones educativas. VII Congreso Internacional Multidisciplinario Ciencia Latina, 7, 204.
- Peña de Loza, F., & Ibarra Villegas, F. J. (2024). Implementación de tecnologías IoT para la reducción del consumo energético en oficinas inteligentes mediante el control de la iluminación. *REVISTA DE CIENCIAS TECNOLÓGICAS*, 7(3), e332.
- Lezama, A. (2024). Strategies to optimize energy consumption in smart buildings. *Athenea*, 5(18), 33-45.
- Meana-Llorián, D., González García, C., Pelayo G-Bustelo, B. C., Lovelle, J. M., & Garcia-Fernandez, N. IoFClime: The fuzzy logic and the Internet of Things to control indoor temperature regarding the outdoor ambient conditions.
- Sandoval, N., Acevedo, N. M., & Santos, L. M. (2022). Guidelines from the industry 4.0 to the education 4.0: case technology IoT. *RCTA*, 1(39), 81-92.