

IMPLEMENTASI KONSEP IOT (*INTERNET OF THING*) SISTEM *SMART CLASSROOM* UNTUK EFISIENSI ENERGI

Ari Hadhiwibowo¹, Nova Agustina², Inus Hidayat³, Trisandy Zakaria Ramadhan⁴, Riska Amelia Safira Adha⁵, Wina Andriani⁶, Silvi Nurlaili⁷, Silfani Mega Aulia⁸, Asma Nadia Fauzan⁹, Rika Andriyanti Dinata¹⁰,
Mega Andriyanti Dinata¹¹
Departemen Teknik Informatika^{1,2,3,4,5,6,7,8,9} Departemen Teknik Industri^{10,11}
Universitas Teknologi Bandung^{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11}
ari@utb-univ.ac.id^{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11}

Abstrak

Konsumsi energi listrik di lingkungan institusi pendidikan, khususnya ruang kelas, sering kali tidak efisien akibat penggunaan perangkat elektronik yang tidak terkontrol. Masalah utama yang ditemukan adalah lampu dan pendingin ruangan yang tetap menyala meskipun ruangan tidak lagi digunakan, yang berdampak pada pemborosan biaya operasional. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem *smart classroom* berbasis *Internet of Things* (IoT) yang mampu meningkatkan efisiensi energi secara otomatis melalui integrasi sensor dan mikrokontroler. Sistem yang dikembangkan menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai unit pemrosesan pusat karena memiliki konektivitas WiFi dan Bluetooth yang mendukung aplikasi IoT. Untuk mendeteksi keberadaan pengguna berdasarkan radiasi inframerah manusia, digunakan sensor *Passive Infrared* (PIR), sedangkan modul *Real Time Clock* (RTC) DS3231 digunakan untuk menjaga ketepatan waktu operasional sistem agar sesuai dengan jadwal penggunaan ruang kelas. Metode penelitian meliputi tahap perancangan perangkat keras, perancangan perangkat lunak, implementasi sistem, serta pengujian fungsional dan kinerja. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mengendalikan perangkat listrik secara otomatis berdasarkan kombinasi data keberadaan pengguna dan jadwal waktu yang telah ditentukan. Dengan otomatisasi ini, sistem berpotensi besar dalam mengurangi pemborosan energi listrik di ruang kelas secara signifikan. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi langkah awal dalam penerapan teknologi IoT untuk mendukung konsep kampus cerdas (*smart campus*) yang berkelanjutan dan hemat energi.
Kata kunci : *Smart Classroom*, *Internet of Things*, Sensor PIR, RTC DS3231, efisiensi energi.

Abstract

Electrical energy consumption in educational institutions, particularly within classrooms, is often inefficient due to the uncontrolled use of electronic devices. A primary issue identified is that lights and air conditioning units remain active even when rooms are no longer in use, leading to wasteful operational costs. This study aims to design and implement an Internet of Things (IoT)-based smart classroom system capable of automatically improving energy efficiency through the integration of sensors and microcontrollers. The developed system utilizes the ESP32 microcontroller as the central processing unit due to its WiFi and Bluetooth connectivity, which supports IoT applications. To detect user presence based on human infrared radiation, a Passive Infrared (PIR) sensor is employed, while a DS3231 Real Time Clock (RTC) module is used to maintain the accuracy of the system's operational timing in accordance with classroom usage schedules. The research methodology encompasses hardware and software design phases, system implementation, as well as functional and performance testing. Testing results demonstrate that the system is capable of controlling electrical devices automatically based on a combination of user presence data and predetermined schedules. Through this automation, the system holds significant potential for substantially reducing electrical energy waste in classrooms. This research is expected to serve as an initial step in the application of IoT technology to support sustainable and energy-efficient smart campus concepts.
Keywords : *Smart Classroom*, *Internet of Things*, PIR Sensor, RTC DS3231, energy efficiency.

I. PENDAHULUAN

Peningkatan kebutuhan energi global disertai dengan isu perubahan iklim dan berdampak pada berbagai sektor untuk melakukan upaya efisiensi energi, termasuk sektor pendidikan [1]. Bangunan pendidikan, khususnya ruang kelas, merupakan salah satu penyumbang konsumsi energi listrik yang banyak, yang terutama berasal dari penggunaan sistem pencahayaan dan pengkondisian udara secara intensif [2]. Penghematan energi menjadi prioritas strategis guna mendukung penggunaan sumber daya yang lebih efisien tanpa mengurangi kenyamanan dan produktivitas proses belajar mengajar, khususnya di Universitas Teknologi Bandung (UTB), salah satu perguruan tinggi di Jawa Barat yang memiliki tingkat aktivitas akademik tinggi serta penggunaan fasilitas ruang kelas yang berlangsung secara intensif sepanjang hari. Permasalahan yang ditemukan di lingkungan UTB adalah penggunaan perangkat listrik seperti lampu dan AC yang masih dikendalikan secara manual. Kondisi ini menyebabkan perangkat tetap beroperasi meskipun ruangan tidak digunakan atau ketika pencahayaan alami sudah mencukupi. Ketergantungan pada intervensi manusia untuk mematikan perangkat listrik sering kali menimbulkan kelalaian, sehingga berdampak pada pemborosan energi dan peningkatan biaya operasional listrik secara signifikan. Inefisiensi tersebut menunjukkan perlunya sistem kendali yang lebih adaptif dan otomatis.

Penelitian terkait efisiensi energi telah dilakukan oleh beberapa peneliti dengan menerapkan teknologi *Internet of Things* (IoT) melalui sistem kendali otomatis berbasis sensor dan penjadwalan waktu [3], [4]. Pada penelitian tersebut, mikrokontroler seperti ESP32 atau ATmega 2560 digunakan sebagai pusat pengendali untuk mengintegrasikan berbagai sensor, antara lain sensor gerak (PIR) untuk mendeteksi keberadaan manusia dan sensor cahaya untuk menyesuaikan tingkat pencahayaan ruangan secara *real-time* [3], [5]. Selain itu, modul *Real Time Clock* (RTC) DS3231 dimanfaatkan untuk menyediakan referensi waktu yang presisi dalam mengatur jadwal operasional perangkat listrik secara otomatis,

termasuk pada kondisi gangguan koneksi internet [6]. Implementasi sistem *smart classroom* berbasis IoT terbukti mampu meningkatkan efisiensi energi secara signifikan [7]. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penerapan kontrol otomatis berbasis sensor dan penjadwalan waktu dapat menurunkan konsumsi energi listrik hingga 25%–40% dibandingkan sistem konvensional [8], [9]. Selain memberikan manfaat ekonomis melalui pengurangan biaya listrik, sistem ini juga berkontribusi terhadap pengurangan emisi karbon dan mendukung konsep bangunan ramah lingkungan. Lebih lanjut, penerapan teknologi ini memiliki nilai edukatif karena dapat melibatkan mahasiswa dalam proses instalasi dan pemrograman sistem, sehingga meningkatkan pemahaman praktis terhadap teknologi cerdas dan berkelanjutan. Berdasarkan uraian tersebut, penelitian mengenai implementasi sistem *smart classroom* berbasis IoT untuk efisiensi energi relevan untuk dikembangkan. Kontribusi penelitian ini terletak pada perancangan dan implementasi sistem kendali otomatis berbasis sensor dan waktu yang disesuaikan dengan karakteristik ruang kelas di lingkungan UTB, serta analisis dampaknya terhadap efisiensi konsumsi energi listrik sebagai upaya mendukung pengelolaan energi yang berkelanjutan di institusi pendidikan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

1. Penelitian Terdahulu

Upaya penghematan energi melalui penerapan teknologi cerdas telah menjadi fokus berbagai penelitian dalam beberapa tahun terakhir. Berbagai studi melaporkan bahwa penggunaan sensor pintar dan sistem kontrol otomatis mampu menurunkan konsumsi listrik secara signifikan, khususnya pada lingkungan kampus. Namun, implementasi teknologi tersebut masih menghadapi sejumlah kendala, antara lain keterbatasan akurasi sensor, stabilitas sistem, serta kompleksitas instalasi dan pemeliharaan. Ringkasan penelitian terkait dapat dilihat pada Tabel I dibawah ini.

TABEL I
PENELITIAN TERDAHULU

Peneliti/ Sumber	Teknologi & Fokus Utama	Kontribusi Utama / Temuan Terkini	Keterbatasan / Gap Penelitian
Fitri Wibowo et al.	IoT SEMS, <i>Home Assistant</i> , Zigbee, WiFi	Mengembangkan sistem manajemen energi otomatis di lab universitas menggunakan deteksi okupansi dan penjadwalan.	Evaluasi masih terbatas pada hasil eksperimen; perlu validasi pada skala gedung yang lebih besar.
Sakti Aswandi et al.	NodeMCU ESP8266, DHT11, PIR, Firebase	Implementasi kontrol AC adaptif (nyala jika $>28^{\circ}\text{C}$ + ada orang) yang mampu menghemat energi hingga 30%.	Akurasi sensor (DHT11) masih rendah; belum ada fitur riwayat data (<i>history</i>) dan autentikasi pengguna.
Aditya Aziz Fikhri et al.	Protokol MQTT vs HTTP, Node- RED, Telegram	Menemukan bahwa protokol MQTT 97,7% lebih cepat (6,2 ms) dibandingkan HTTP (267 ms) untuk transmisi data real-time.	Fokus utama masih pada pemantauan kualitas udara, belum terintegrasi ke kontrol perangkat berat secara luas.
Nur Abdillah Siddiq CeDSGreeB	Sensor Okupansi Cerdas, <i>Adaptive Time Delay</i> (TD)	Sensor cerdas dengan TD adaptif meningkatkan efisiensi energi 5% lebih tinggi dibandingkan sensor dengan jeda waktu tetap.	Efektivitas sangat bergantung pada ketepatan penempatan sensor agar tidak terjadi <i>false-off</i> .
Abdisalan A. Mohamed et al.	Raspberry Pi, Node-RED, Favoriot Cloud	Menggunakan platform <i>cloud</i> untuk otomatisasi HVAC dan keamanan guna mencapai responsivitas waktu nyata.	Banyak sistem yang ada masih memiliki kemampuan adaptasi <i>real-time</i> yang terbatas dan belum memanfaatkan <i>cloud</i> secara penuh.
M. Yagiz Orhan & A.U. Yerden	HVAC Optimization, ZigBee, MQTT, SDG-7/11	Mengidentifikasi potensi penghematan energi sebesar 15-30% melalui digitalisasi sistem bangunan pintar.	Hambatan utama berupa biaya instalasi tinggi dan kurangnya standarisasi antar perangkat dari produsen berbeda

Perkembangan sistem manajemen energi berbasis IoT telah mengalami transformasi signifikan, yang kini berfokus pada empat pilar utama: kendali adaptif, efisiensi protokol, logika cerdas, dan integrasi awan. Pertama, terjadi pergeseran paradigma kendali dari yang sebelumnya hanya bersifat pemantauan pasif (*monitoring*) menjadi pengendalian otomatis yang adaptif. Sistem terkini tidak lagi sekadar mencatat penggunaan energi, tetapi mampu merespons perubahan okupansi ruang dan parameter lingkungan secara langsung untuk mengambil keputusan tindakan secara instan.

Kedua, dari sisi komunikasi data, penggunaan protokol MQTT kini mulai menggeser dominasi HTTP tradisional. MQTT dipandang sebagai standar baru dalam ekosistem IoT karena karakteristiknya yang ringan dan memiliki latensi rendah, sehingga sangat krusial untuk aplikasi yang membutuhkan respons cepat. Ketiga, efisiensi energi ditingkatkan melalui penerapan logika adaptif, seperti penjadwalan dinamis dan *adaptive time delay*. Berbeda dengan sistem ambang batas (*threshold*) statis, logika ini mampu mempelajari pola perilaku pengguna, yang secara empiris terbukti dapat memaksimalkan penghematan energi hingga mencapai rentang 25-30%.

Terakhir, skalabilitas sistem kini dicapai melalui integrasi platform *cloud* seperti *Firebase*. Penggunaan teknologi *cloud* memberikan fleksibilitas kontrol jarak jauh dan pengelolaan data besar yang melampaui kemampuan *server* lokal konvensional. Integrasi keempat aspek inilah yang membentuk standar terbaru dalam pengembangan bangunan pintar yang efisien dan responsif saat ini.

2. Konsep *Internet of Things* (IoT)

Internet of Things (IoT) merupakan sebuah bidang penelitian yang terus berkembang seiring dengan evolusi teknologi internet dan media komunikasi [10][11]. Teknologi ini memungkinkan pengendalian perangkat elektronik secara efisien dan fleksibel melalui jaringan internet. Dalam implementasi sistem kontrol, IoT berperan menghubungkan berbagai sensor dan aktuator dengan aplikasi *smartphone* atau *platform* web untuk memberikan kontrol jarak jauh serta pemantauan status perangkat secara *real-time*. Arsitektur IoT umumnya terdiri dari lapisan *input* (sensor), proses (mikrokontroler), dan *output* (aktuator/tampilan).

3. *Smart Classroom* dan Efisiensi Energi

Konsep *Smart Classroom* diimplementasikan untuk meningkatkan efisiensi penggunaan energi listrik, khususnya pada sistem pencahayaan dan pengkondisian udara (AC) [12]. Masalah utama dilingkungan pendidikan adalah penggunaan energi yang tidak optimal, seperti lampu dan AC yang tetap menyala saat ruangan kosong atau saat intensitas cahaya alami sudah mencukupi. Implementasi sistem kontrol otomatis berbasis IoT telah terbukti secara signifikan mampu mengurangi konsumsi listrik di ruang kelas dengan tingkat penghematan mencapai 30% hingga 40% dibandingkan sistem konvensional.

4. Mikrokontroler ESP32

ESP32 merupakan mikrokontroler yang berfungsi sebagai unit pemroses utama atau "otak" dalam sistem *Smart Classroom* [13]. Perangkat ini memiliki keunggulan berupa konektivitas Wi-Fi dan *Bluetooth* yang sudah terintegrasi dalam satu *chip*. Selain itu, ESP32 mendukung berbagai *input/output* baik analog maupun digital, PWM, serta protokol komunikasi seperti SPI dan I2C, yang sangat mendukung pengembangan aplikasi berbasis IoT.

5. Manajemen Waktu dengan RTC DS3231

Modul *Real Time Clock* (RTC) DS3231 digunakan untuk menyediakan data waktu yang akurat (detik, menit, jam, hari, tanggal, bulan, dan tahun) secara *real-time*. Penggunaan RTC eksternal sangat krusial dalam sistem otomatisasi karena tetap dapat menjaga akurasi waktu meskipun mikrokontroler kehilangan daya atau tidak terkoneksi dengan internet (NTP). Modul ini dilengkapi dengan baterai *backup* sehingga data waktu tidak akan terhenti saat aliran listrik utama padam. Pengujian menunjukkan bahwa RTC DS3231 memiliki tingkat presisi tinggi dengan rata-rata penyimpangan hanya $\pm 0,5$ detik [13].

6. Sensor dan Aktuator

Sistem *Smart Classroom* mengandalkan integrasi berbagai sensor untuk mendeteksi kondisi lingkungan [12]:

- Sensor PIR (*Passive Infrared*): Digunakan untuk mendeteksi keberadaan aktivitas manusia di dalam ruangan untuk mengatur otomatisasi perangkat.
- Sensor Cahaya (LDR): Berfungsi mengukur intensitas cahaya agar lampu hanya menyala jika pencahayaan alami di dalam kelas tidak mencukupi.
- Sensor DHT22/DHT11: Digunakan untuk memantau suhu dan kelembaban udara guna mengatur operasional AC secara otomatis demi kenyamanan belajar.
- Relay: Berfungsi sebagai saklar otomatis yang dikendalikan oleh mikrokontroler untuk memutus atau menyambungkan arus listrik besar (AC) pada lampu atau perangkat elektronik lainnya.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Research and Development* (R&D) yang bertujuan untuk merancang, mengembangkan, dan mengimplementasikan sistem *Smart Classroom* berbasis *Internet of Things* (IoT). Metode R&D digunakan untuk menghasilkan sebuah produk berupa sistem otomatisasi ruang kelas yang terintegrasi antara perangkat keras dan perangkat lunak, sesuai dengan kebutuhan operasional ruang kelas. Penerapan R&D yang diimplementasikan meliputi penyusunan konsep, desain, material *collecting*, *assembly*, *testing*, dan *distribution*. Masing-masing penerapan yang dilakukan:

1. Konsep

Tahap awal dilakukan untuk mengidentifikasi permasalahan pemborosan energi listrik di ruang kelas serta menentukan kebutuhan sistem *Smart Classroom* yang sesuai dengan kondisi operasional. Kebutuhan sistem

Smart Classroom disusun menjadi kebutuhan fungsional yang dapat dilihat pada Tabel II dan kebutuhan non fungsional yang dapat dilihat pada Tabel III.

TABEL II
 ANALISIS KEBUTUHAN FUNGSIONAL

User Story	Fungsional Requirment Priority			
	High Priority	Medium Priority	Low Priority	No Priority
Sistem dapat mendeteksi keberadaan pengguna secara otomatis agar perangkat listrik hanya aktif saat ruangan digunakan	Deteksi keberadaan pengguna di ruangan menggunakan sensor PIR			
Lampu dapat menyala dan mati secara otomatis berdasarkan keberadaan pengguna	Perangkat listrik dikendalikan berdasarkan jadwal waktu agar tidak menyala di luar jam operasional menggunakan RTC DS3231	Menyalakan status ON/OFF berdasarkan jadwal yang sudah ditentukan menggunakan PIR		

TABEL III
 ANALISIS KEBUTUHAN NON FUNGSIONAL

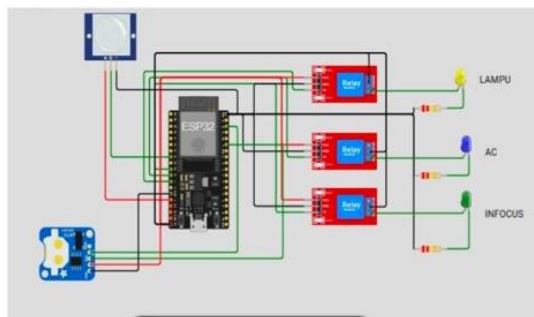
No	Kebutuhan Fungsional	Deskripsi
1	Keandalan (<i>Reliability</i>)	Sistem mampu beroperasi secara stabil dan konsisten dalam jangka waktu lama tanpa kegagalan fungsi.
2	Akurasi	Sensor PIR dan modul RTC DS3231 memiliki tingkat akurasi yang memadai untuk mendukung pengambilan keputusan sistem.
3	Skalabilitas	Sistem dapat dikembangkan dengan penambahan sensor atau perangkat listrik lainnya tanpa perubahan arsitektur utama.
4	Ketahanan Sistem	Sistem tetap dapat berfungsi meskipun terjadi gangguan koneksi internet karena penggunaan RTC sebagai referensi waktu lokal.

2. Desain

Perancangan meliputi arsitektur perangkat keras (ESP32, sensor PIR, RTC DS3231, relay) serta perancangan perangkat lunak berupa logika kontrol dan alur kerja sistem.

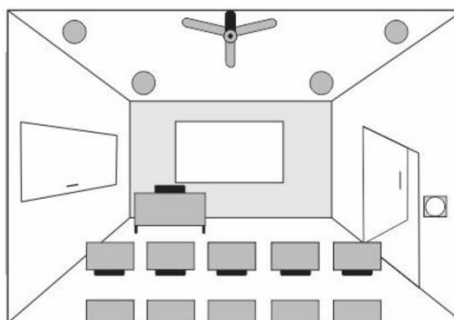
a. Desain Sirkuit

Gambar 1 merupakan gambar desain sirkuit yang dibuat. Komponen yang digunakan yaitu ESP32 sebagai *controller*, sensor PIR, Sensor RTC, 3 buah Relay dan 3 buah lampu. Berikut desain sirkuit yang sudah dibuat dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Desain sirkuit *smart Classroom*

b. Desain Tampilan



Gambar 2. Desain Tampilan Implementasi *Smart Classroom*

3. *Material Collecting*

Tahap *material collecting* merupakan proses pengumpulan seluruh perangkat dan komponen yang dibutuhkan untuk membangun sistem *Smart Classroom* berbasis *Internet of Things (IoT)* sesuai dengan desain yang telah dirancang. Komponen utama yang dikumpulkan meliputi mikrokontroler ESP32 sebagai unit pemrosesan pusat, sensor *Passive Infrared (PIR)* sebagai pendeteksi keberadaan pengguna, modul *Real Time Clock (RTC)* DS3231 sebagai referensi waktu operasional sistem, serta relay sebagai aktuator untuk mengendalikan perangkat listrik seperti lampu. Selain itu, dikumpulkan pula komponen pendukung berupa lampu, kabel penghubung, *breadboard* atau PCB, catu daya, serta baterai cadangan untuk modul RTC. Pada tahap ini juga dilakukan pengumpulan perangkat lunak pendukung, seperti Arduino IDE, *library* ESP32, *library* sensor PIR, dan *library* RTC DS3231, yang digunakan untuk proses pemrograman dan integrasi sistem. Seluruh material yang dikumpulkan disesuaikan dengan kebutuhan sistem agar dapat mendukung pengujian dan implementasi prototipe secara optimal. Gambar mikrokontroler ESP32 dapat dilihat pada Gambar 3, gambar sensor *passive infrared (PIR)* dapat dilihat pada Gambar 4, dan Gambar 5 menunjukkan gambar Modul *Real Time Clock (RTC)*.



Gambar 3. mikrokontroler ESP32



Gambar 4. sensor *Passive Infrared (PIR)*



Gambar 5. modul *Real Time Clock (RTC)* DS3231

4. *Assembly*

Tahap *assembly* dilakukan dengan cara melakukan perakitan dan integrasi seluruh komponen perangkat keras dan perangkat lunak berdasarkan desain sistem yang telah ditetapkan. Pada tahap ini dilakukan pemasangan dan pengkabelan komponen, termasuk penghubungan sensor PIR dan modul RTC DS3231 ke mikrokontroler ESP32 melalui pin *input/output* yang sesuai, serta pengkabelan relay sebagai pengendali arus listrik ke lampu. Setelah proses perakitan perangkat keras selesai, dilakukan pemrograman mikrokontroler ESP32 menggunakan bahasa pemrograman Arduino. Program yang dikembangkan mencakup logika pengambilan keputusan berdasarkan data keberadaan pengguna dari sensor PIR dan data waktu dari RTC DS3231 untuk mengendalikan relay secara otomatis. Setiap komponen diuji secara bertahap untuk memastikan fungsi berjalan dengan baik sebelum sistem diintegrasikan secara keseluruhan. Hasil dari tahap *assembly* adalah prototipe sistem *Smart Classroom* berbasis IoT yang siap untuk diuji dan dievaluasi pada tahap selanjutnya.

5. *Testing*

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kinerja dan fungsionalitas sistem melalui beberapa skenario uji yang telah ditentukan. Skenario pengujian tersebut meliputi deteksi keberadaan pengguna, pengukuran intensitas cahaya, serta respons sistem terhadap perubahan kondisi. Melalui pengujian ini, diharapkan dapat diketahui sejauh mana sistem mampu bekerja secara optimal dan sesuai dengan fungsi yang dirancang.

6. *Distribution*

Pada tahap ini, prototipe sistem diimplementasikan pada ruang kelas sebagai lingkungan uji coba untuk melihat kesiapan sistem dalam kondisi operasional nyata. Selain implementasi, dilakukan pula dokumentasi sistem yang meliputi deskripsi fungsi sistem, alur kerja, serta prosedur penggunaan dan pemeliharaan sebagai panduan bagi pengelola ruang kelas. Hasil pengembangan dan pengujian sistem kemudian disebarluaskan melalui publikasi ilmiah sebagai bentuk kontribusi penelitian terhadap pengembangan teknologi *Smart Classroom* dan efisiensi energi di lingkungan institusi pendidikan. Tahap distribution ini diharapkan dapat menjadi dasar bagi pengembangan lanjutan dan penerapan sistem secara lebih luas di lingkungan kampus. Prototipe yang telah dibuat dapat dilihat pada gambar 6.



Gambar 6. Prototipe Implementasi Sistem

7. Hasil

Sistem diuji pada prototipe yang merepresentasikan ruang kelas dengan skala 1:20. Perangkat yang dikendalikan berupa lampu LED berjumlah 4 unit, 1 unit proyektor, 1 unit kipas angin. Skenario hasil pengujian fungsional dapat dilihat pada Tabel IV sebagai berikut:

TABEL IV
HASIL PENGUJIAN FUNGSIONAL PROTOTIPE *SMART CLASSROOM*

No	Skenario Pengujian	Input / Kondisi	Output yang Diharapkan	Status
1	Deteksi kehadiran	Sensor PIR	mendeteksi gerakan Lampu & kipas menyala otomatis	Berhasil
2	Tidak ada orang	PIR tidak mendeteksi gerakan selama 10 menit	Lampu & kipas mati otomatis	Berhasil
3	Intensitas cahaya rendah	LDR < 300 lux	Lampu menyala otomatis	Berhasil
4	Suhu tinggi	Suhu > 28°C	kipas menyala otomatis	Berhasil

Pengujian kinerja sistem dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan *Smart Classroom Automation* dalam merespon perubahan kondisi lingkungan secara cepat dan akurat, dengan parameter yang diuji meliputi waktu respon sistem dari sensor ke aktuator, akurasi pembacaan sensor suhu, serta akurasi sensor intensitas cahaya. Pengujian dilakukan secara berulang pada berbagai kondisi untuk memperoleh nilai rata-rata yang representatif, kemudian dibandingkan dengan standar sistem yang telah ditetapkan guna memastikan bahwa sistem mampu beroperasi secara *real-time* dan memenuhi kebutuhan fungsional ruang kelas. Hasil pengujian kemudian dibandingkan dengan standar sistem yang telah ditetapkan sebelumnya. Ringkasan hasil pengujian kinerja sistem ditunjukkan pada Tabel V sebagai berikut:

TABEL V
PENGUJIAN KINERJA SISTEM

Parameter	Nilai Rata-rata	Standar Sistem
Waktu respon sensor → aktuator	1.2 detik	< 2 detik
Akurasi sensor suhu	±0.5°C	≤ ±1°C
Akurasi sensor cahaya	±20 lux	≤ ±50 lux

Pengujian efisiensi energi dilakukan untuk mengetahui sejauh mana penerapan sistem *Smart Classroom Automation* mampu menurunkan konsumsi daya listrik dibandingkan dengan kondisi operasional tanpa sistem otomatis. Pengujian dilakukan dengan membandingkan penggunaan energi pada kondisi sebelum dan sesudah sistem diaktifkan dalam waktu 7 hari sehingga dapat diperoleh gambaran objektif mengenai tingkat penghematan energi yang dihasilkan oleh sistem. Ringkasan hasil pengujian efisiensi energi ditunjukkan pada Tabel VI sebagai berikut:

TABEL VI
PENGUJIAN EFISIENSI ENERGI

Kondisi	Konsumsi Daya (kWh/hari)
Tanpa sistem otomatis	18.5
Dengan Smart Automation	11.2

Efisiensi yang dicapai:

$$\text{Penghematan} = \frac{18.5 - 11.2}{18.5} \times 100\% = 39.46\%$$

Artinya sistem mampu menghemat hampir 40% energi listrik.

Berdasarkan seluruh rangkaian pengujian yang telah dilakukan pada Tabel 4, Tabel 5 dan Tabel 6 di atas, maka sistem *Smart Class Automation* yang dikembangkan mampu beroperasi sesuai dengan kebutuhan fungsional yang telah dirancang. Sistem berhasil merespons kondisi lingkungan ruang kelas secara otomatis melalui integrasi sensor, mikrokontroler, dan aktuator. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem memiliki waktu respon yang cepat dan stabil dalam memproses data sensor serta mengeksekusi perintah ke aktuator. Selain itu, sistem juga mampu menampilkan data pemantauan secara *real-time* dengan tingkat akurasi yang berada dalam batas toleransi yang dapat diterima. Dari sisi efisiensi energi, penerapan sistem otomatisasi menunjukkan adanya penurunan konsumsi daya listrik yang signifikan dibandingkan dengan kondisi tanpa sistem otomatis. Hal ini membuktikan bahwa sistem tidak hanya meningkatkan kenyamanan pengguna, tetapi juga berkontribusi terhadap penghematan energi di lingkungan ruang kelas.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian sistem *Smart Class Automation*, dapat disimpulkan bahwa sistem otomatisasi ruang kelas berbasis *Internet of Things (IoT)* yang memanfaatkan sensor PIR, modul RTC DS3231, relay, serta mikrokontroler ESP32 dan Arduino Uno mampu menjawab permasalahan pemborosan energi listrik dan rendahnya efisiensi pengelolaan perangkat elektronik di ruang kelas. Sistem diuji pada prototipe ruang kelas dengan kondisi operasional nyata, perangkat seperti lampu, kipas angin, dan proyektor dikendalikan secara otomatis berdasarkan deteksi keberadaan pengguna dan pengaturan waktu. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu merespon perubahan kondisi ruangan secara stabil dan konsisten, serta menurunkan waktu aktif perangkat ketika ruangan tidak digunakan, sehingga berkontribusi pada penghematan energi listrik secara signifikan.

Integrasi antara sensor, modul waktu, dan mikrokontroler memungkinkan pengendalian perangkat dilakukan secara *real-time* tanpa intervensi manual, sehingga meminimalkan risiko kelalaian pengguna dalam mematikan perangkat. Selain itu, arsitektur sistem yang sederhana membuat proses instalasi relatif mudah dan tidak memerlukan infrastruktur tambahan yang kompleks, sehingga cocok diterapkan pada lingkungan pendidikan. Meskipun demikian, sistem masih memiliki keterbatasan, antara lain ketergantungan pada akurasi sensor PIR dan belum adanya fitur pemantauan berbasis cloud. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya dapat mengembangkan sistem dengan menambahkan integrasi platform IoT berbasis web atau *mobile* serta penerapan analisis data penggunaan energi untuk meningkatkan efisiensi dan skalabilitas sistem dimasa depan.

REFERENSI

- [1] Y. Chen, Z. Ren, Z. Peng, J. Yang, Z. Chen, and Z. Deng, "Impacts of climate change and building energy efficiency improvement on city-scale building energy consumption," *Journal of Building Engineering*, vol. 78, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.jobee.2023.107646.
- [2] C. Yuan, R. Zhu, S. Tong, S. Mei, and W. Zhu, "Impact of anthropogenic heat from air-conditioning on air temperature of naturally ventilated apartments at high-density tropical cities," *Energy Build.*, vol. 268, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.enbuild.2022.112171.
- [3] S. Panerai *et al.*, "Functional Living Skills in Patients with Major Neurocognitive Disorder Due to Degenerative or Non-Degenerative Conditions: Effectiveness of a Non-Immersive Virtual Reality Training," *Sensors*, vol. 23, no. 4, Feb. 2023, doi: 10.3390/s23041896.
- [4] H. Dehghanpour, F. Doğan, and K. Yılmaz, "Development of CNT-CF-Al2O3-CMC gel-based cementitious repair composite," *Journal of Building Engineering*, vol. 45, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.jobee.2021.103474.
- [5] M. F. Latief, I. Irmansyah, and L. Rosyidi, "Sistem Pemantauan Ruang Kelas berbasis Internet of Things (IoT) untuk Proses Pendidikan yang Efektif," *Digital Transformation Technology*, vol. 4, no. 2, pp. 1278-1284, Feb. 2025, doi: 10.47709/digitech.v4i2.5485.
- [6] V. V. Parte, G. M. Bharavase, P. M. Patil, S. S. Patil, and S. A. Tone, "IOT Based Auto Power Management System Using Real Time Clock," 2025.
- [7] N. Sivasankari and P. Rathika, "IoT driven building automation systems: A review on energy efficiency, occupant comfort, and sustainability," Jun. 15, 2025, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.jobee.2025.112347.
- [8] R. jie Wu, J. Xia, J. hong Mao, K. yu Chen, J. jing Chen, and W. liang Jin, "Influence of stochastic chlorine environment on the spatiotemporal deterioration of marine RC structures," *Journal of Building Engineering*, vol. 76, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.jobee.2023.107085.
- [9] S. Panerai *et al.*, "Functional Living Skills in Patients with Major Neurocognitive Disorder Due to Degenerative or Non-Degenerative Conditions: Effectiveness of a Non-Immersive Virtual Reality Training," *Sensors*, vol. 23, no. 4, Feb. 2023, doi: 10.3390/s23041896.
- [10] Yomeldi, Hespri. "Decision making in Internet of Things (IoT): A systematic literature review." *ITEJ (Information Technology Engineering Journals)* 5.1 (2020): 51-65.
- [11] Susanto, Fredy, Ni Komang Prasiani, and Putu Darmawan. "Implementasi Internet of Things Dalam Kehidupan Sehari-Hari." *Jurnal Imagine* 2.1 (2022): 35-40.
- [12] Supiyan, Dede. "IMPLEMENTASI SISTEM KONTROL LAMPU PINTAR BERBASIS ESP32 UNTUK EFISIENSI ENERGI DI SEKOLAH." *Jurnal Penelitian Terapan Ilmu Multidisiplin* 1.2 (2025): 115-120.
- [13] Tualaka, Jupriola Jeskris Soleman, et al. "Sistem Lampu Emergency Otomatis dengan Waktu Menggunakan Sensor RTC DS3231." *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Informasi dan Bisnis*. 2025.