

Pengaruh Sistem Pencahayaan Berbasis *Smart* terhadap Penghematan Energi

Nafizal Umri^{1*}, Haris Gunawan², M Erpandi Dalimunthe³

¹⁻³Program Studi Teknik Elektro, Universitas Pembangunan Panca Budi, Indonesia

E-mail: nafizalumri@gmail.com^{1*}, harisgunawan@dosen.pancabudi.ac.id²

*Penulis Korespondensi: nafizalumri@gmail.com

Abstract. *The increasing demand for electrical energy, particularly in offices and commercial buildings, has made energy efficiency a critical aspect of sustainable development. Among various building components, lighting systems are recognized as one of the major consumers of energy. This study investigates the potential for energy savings through the adoption of a smart lighting system incorporating IoT-based sensors, motion detectors, and dimming controls. Employing a quantitative descriptive approach, the research was conducted at the workspace of Indie Light, comparing energy consumption before and after the implementation of the system. Data were collected using direct observation, light and power meters, and real-time monitoring devices to ensure accurate measurement. The results demonstrate that smart lighting systems can substantially reduce energy use without compromising lighting quality or comfort. By integrating intelligent sensors and adaptive control algorithms, the system not only optimizes energy efficiency but also aligns with national policies on energy conservation, supporting broader environmental sustainability efforts. These findings suggest that smart lighting solutions can play a significant role in promoting energy-efficient practices in commercial spaces while contributing to sustainable development goals.*

Keywords: *Energy Efficiency; IoT; Motion Sensor; Smart Lighting System; Sustainable Technology.*

Abstrak. Meningkatnya permintaan energi listrik, terutama di perkantoran dan gedung komersial, menjadikan efisiensi energi sebagai aspek krusial pembangunan berkelanjutan. Di antara berbagai komponen bangunan, sistem pencahayaan diakui sebagai salah satu konsumen energi terbesar. Studi ini menyelidiki potensi penghematan energi melalui penerapan sistem pencahayaan pintar yang menggabungkan sensor berbasis IoT, detektor gerakan, dan kontrol peredupan. Dengan menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif, penelitian ini dilakukan di ruang kerja Indie Light, membandingkan konsumsi energi sebelum dan sesudah penerapan sistem. Data dikumpulkan menggunakan observasi langsung, pengukur cahaya dan daya, serta perangkat pemantauan waktu nyata untuk memastikan pengukuran yang akurat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem pencahayaan pintar dapat mengurangi penggunaan energi secara substansial tanpa mengurangi kualitas atau kenyamanan pencahayaan. Dengan mengintegrasikan sensor cerdas dan algoritma kontrol adaptif, sistem ini tidak hanya mengoptimalkan efisiensi energi tetapi juga selaras dengan kebijakan nasional tentang konservasi energi, yang mendukung upaya keberlanjutan lingkungan yang lebih luas. Temuan ini menunjukkan bahwa solusi pencahayaan pintar dapat memainkan peran penting dalam mempromosikan praktik hemat energi di ruang komersial sekaligus berkontribusi pada tujuan pembangunan berkelanjutan.

Kata kunci: Efisiensi Energi; IoT; Sensor Gerak; Sistem Pencahayaan Pintar; Teknologi Berkelanjutan.

1. LATAR BELAKANG

Konsumsi energi listrik pada sektor bangunan dan perkantoran menunjukkan peningkatan signifikan seiring dengan pertumbuhan populasi, urbanisasi, serta ekspansi aktivitas ekonomi. Salah satu komponen terbesar dari konsumsi energi tersebut berasal dari sistem pencahayaan, yang dapat menyumbang hingga 20–30% dari total penggunaan listrik pada gedung komersial. Permasalahan utama yang masih dihadapi adalah dominannya penggunaan sistem pencahayaan konvensional yang beroperasi tanpa kontrol otomatis, sehingga energi tetap terpakai meskipun tidak diperlukan secara optimal. Dalam konteks keberlanjutan energi, kondisi ini menjadi tantangan besar mengingat peningkatan konsumsi

energi berkontribusi langsung terhadap emisi karbon dan ketidakseimbangan beban daya nasional (International Energy Agency, 2023). Oleh karena itu, dibutuhkan inovasi sistem pencahayaan yang tidak hanya efisien secara teknis, tetapi juga adaptif terhadap perilaku pengguna dan kondisi lingkungan sekitar.

Perkembangan teknologi digital dan konsep *Internet of Things* (IoT) telah membuka peluang baru dalam mewujudkan efisiensi energi melalui pengembangan sistem pencahayaan pintar (*smart lighting system*). Sistem ini memungkinkan pengaturan intensitas cahaya berdasarkan deteksi kehadiran pengguna, kondisi pencahayaan alami, serta kebutuhan aktivitas di suatu ruangan secara *real-time*. Penelitian oleh Sultana, Rahman, dan Cho (2024) menunjukkan bahwa penerapan sistem pencahayaan berbasis IoT dengan sensor gerak dan modul LoRaWAN dapat menurunkan konsumsi energi hingga 35% dibandingkan sistem konvensional di fasilitas publik. Selanjutnya, Ahmed dan Kim (2025) melaporkan bahwa integrasi algoritma *machine learning* dalam sistem *smart lighting* dapat memprediksi pola penggunaan cahaya dan menyesuaikan tingkat pencahayaan secara otomatis, sehingga meningkatkan efisiensi daya hingga 40%. Sementara itu, studi oleh Beni Satria, Rahmانيar, Dalimunthe, Iqbal, dan Berthauli (2025) menegaskan bahwa pengembangan sistem pemantauan lingkungan berbasis IoT menggunakan NodeMCU ESP32 dan sensor BMP280-DHT11 mampu melakukan akuisisi data suhu, kelembapan, dan tekanan udara secara *real-time* dengan tingkat keandalan tinggi. Pendekatan arsitektur IoT semacam ini menjadi fondasi penting bagi implementasi sistem pencahayaan pintar yang adaptif dan efisien energi. Bukti empiris tersebut memperkuat pandangan bahwa sistem pencahayaan pintar bukan sekadar tren teknologi, melainkan strategi penting menuju keberlanjutan energi.

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian sebelumnya masih terbatas pada konteks negara maju yang memiliki karakteristik iklim dan desain arsitektur bangunan berbeda dengan wilayah tropis seperti Indonesia. Penelitian yang dilakukan di Indonesia umumnya hanya menekankan pada penggunaan lampu hemat energi, seperti LED, tanpa integrasi sistem sensor, kontrol otomatis, dan analisis perilaku pengguna secara simultan. Kesenjangan ini menunjukkan perlunya kajian empiris yang menilai secara komprehensif dampak penerapan sistem pencahayaan pintar terhadap penghematan energi, kenyamanan visual, dan efisiensi operasional di lingkungan tropis. Dalam konteks tersebut, Siagian, Hamdani, dan Dalimunthe (2022) menekankan pentingnya mitigasi panas pada sistem energi surya di iklim tropis melalui penggunaan lapisan pelindung (*sunscreens film*) untuk menjaga stabilitas suhu dan efisiensi panel surya. Temuan ini menunjukkan bahwa faktor lingkungan tropis, seperti intensitas radiasi matahari dan suhu tinggi, sangat memengaruhi kinerja teknologi hemat energi termasuk sistem

pencahayaannya pintar, sehingga diperlukan pendekatan desain yang adaptif terhadap kondisi lokal. Dengan demikian, penelitian ini menempati posisi *state of the art* yang berfokus pada penerapan sistem pencahayaannya pintar berbasis IoT di lingkungan nyata dengan evaluasi terukur terhadap efisiensi daya dan kenyamanan kerja.

Kebaruan penelitian ini terletak pada pendekatan integratif yang menggabungkan sensor gerak (*motion sensor*), sensor cahaya (*light sensor*), dan pengatur intensitas pencahayaannya (*dimming control*) dalam satu sistem terkoneksi berbasis IoT. Selain menganalisis besaran penghematan energi, penelitian ini juga menilai tingkat kenyamanan pencahayaannya serta respon pengguna terhadap sistem otomatisasi tersebut. Pendekatan ini belum banyak diterapkan dalam penelitian serupa di Indonesia, sehingga studi ini memiliki relevansi akademik dan praktis dalam mendukung kebijakan efisiensi energi nasional.

Berdasarkan uraian tersebut, tujuan utama penelitian ini adalah menganalisis potensi penghematan energi yang dapat dicapai melalui penerapan sistem pencahayaannya pintar berbasis IoT, mengevaluasi tingkat efisiensi dan kenyamanan pencahayaannya yang dihasilkan dibandingkan sistem konvensional, serta menilai kelayakan teknis dan manfaat ekonomis dari sistem tersebut. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah terhadap pengembangan sistem energi cerdas dan menjadi rujukan bagi penerapan *smart lighting system* di berbagai sektor bangunan di Indonesia.

2. KAJIAN TEORITIS

Dalam upaya memahami kerangka konseptual dan perkembangan teknologi sistem pencahayaannya pintar, terdapat beberapa komponen penting yang perlu dikaji secara mendalam, meliputi teknologi sensor dan kontrol dimming, integrasi pencahayaannya alami (*daylight harvesting*), arsitektur *Internet of Things* (IoT) untuk sistem pintar, serta evaluasi terhadap kenyamanan visual dan efisiensi energi. Kajian ini memberikan dasar teoritis sekaligus meninjau penelitian-penelitian terdahulu yang menjadi acuan dalam pengembangan sistem pencahayaannya pintar berbasis IoT.

Teknologi Sensor dan Kontrol Dimming

Pendekatan yang semakin banyak digunakan dalam literatur terkini adalah penggabungan sensor cahaya (*ambient light sensor*) dan sensor gerak (*occupancy* atau *motion sensor*) dengan sistem pengaturan intensitas cahaya otomatis (*dimming control*). Widartha et al. (2024) dalam penelitian *Advancing Smart Lighting* menunjukkan bahwa integrasi data sensor dan pencahayaannya alami (*combined sensor + daylight data*) mampu mengurangi konsumsi energi secara signifikan dibandingkan penggunaan salah satu sensor saja. Sistem

tersebut menggunakan algoritma berbasis aturan (*rule-based heuristic*) dan prototipe aplikasi pemantauan *real-time*, yang menghasilkan efisiensi energi yang substansial.

Jettanasen et al. (2025) juga mengkaji strategi penerapan sistem *dimming* otomatis yang menyesuaikan intensitas cahaya berdasarkan kondisi ambien dan efisiensi lampu, dan menemukan bahwa sistem ini dapat menghemat energi tanpa menurunkan kualitas pencahayaan. Selain itu, penerapan sistem *smart corridor lighting* yang hanya mengaktifkan lampu ketika sensor mendeteksi kehadiran manusia juga terbukti efektif dalam mengurangi konsumsi listrik.

Integrasi Daylight dan Strategi Adaptif

Pemanfaatan pencahayaan alami atau *daylight harvesting* merupakan strategi penting dalam sistem *smart lighting*, agar lampu buatan tidak beroperasi secara penuh ketika cahaya alami sudah mencukupi. Beguni et al. (2025) mengusulkan sistem *Visible Light Communication* (VLC) yang memadukan fungsi komunikasi dan pengendalian intensitas pencahayaan, di mana *duty cycle* LED disesuaikan dengan kondisi cahaya ambien untuk mempertahankan iluminansi minimal (≥ 300 lx) sekaligus menjaga kenyamanan visual.

Khemakhem et al. (2024) melalui kajian komprehensif terhadap infrastruktur *smart public lighting* berbasis IoT menekankan bahwa integrasi pencahayaan alami merupakan elemen utama yang membedakan sistem dengan efisiensi tinggi dari sistem konvensional. Hasil serupa dilaporkan oleh Arun et al. (2025), yang menemukan bahwa strategi pencahayaan alami mampu menurunkan konsumsi energi dan emisi karbon hingga sekitar 30% dalam bangunan, terutama ketika sistem kontrol mampu menahan lampu agar tidak menyala berlebihan saat cahaya alami cukup.

Penelitian oleh Choir, Anisa, dan Rahmانيar (2024) juga menunjukkan bahwa modul lampu berbasis LED dengan pengendali Arduino Uno dapat dioptimalkan untuk sistem penerangan landasan pacu yang efisien dan adaptif terhadap kondisi pencahayaan lingkungan. Temuan tersebut memperkuat bahwa integrasi sensor dan algoritma kontrol berbasis mikrokontroler berperan penting dalam penerapan strategi *daylight harvesting* yang efektif di berbagai konteks, baik publik maupun komersial.

Arsitektur IoT dan Implementasi Sistem Pintar

Arsitektur sistem pintar yang andal menjadi fondasi utama agar sensor, aktuator, dan kontroler dapat bekerja secara terpadu. Dinmohammadi et al. (2025) merancang sistem pemantauan *real-time* berbasis IoT untuk optimasi energi bangunan hunian dengan menggunakan Raspberry Pi, sensor cahaya BH1750, sensor PIR, serta integrasi IoT *cloud*

(Adafruit IO) untuk kendali jarak jauh. Meskipun konteksnya adalah rumah tinggal, pendekatan arsitektural tersebut relevan untuk diterapkan pada bangunan komersial.

Dalam konteks lokal, Wibowo et al. (2024) mengembangkan sistem manajemen energi berbasis IoT yang secara otomatis mengatur pencahayaan dan pendingin udara di laboratorium kampus dengan menggunakan deteksi kehadiran dan *scheduling*, yang terbukti menurunkan konsumsi daya operasional. Sementara itu, Jabbar et al. (2025) memperkenalkan sistem *LoRaWAN-IoT Smart Street Lighting System* (SSLS) yang menggabungkan sensor PIR dan LDR dengan panel surya sebagai sumber daya utama. Sistem tersebut mampu mengatur intensitas cahaya secara adaptif dan dilaporkan menurunkan konsumsi listrik serta emisi karbon secara signifikan.

Penelitian Beni Satria, Rahmaniar, dan Dalimunthe (2024) juga menunjukkan bahwa sistem IoT berbasis ESP32 dapat menghasilkan akurasi tinggi dalam pengumpulan dan transmisi data lingkungan seperti suhu, kelembapan, dan kondisi cuaca secara *real-time*. Hal ini memperkuat bahwa integrasi sensor berdaya rendah dengan mikrokontroler menjadi komponen vital dalam membangun sistem pencahayaan cerdas yang efisien energi.

Evaluasi Kenyamanan Visual, Efisiensi Energi, dan Tinjauan Kritis

Dalam evaluasi sistem pencahayaan pintar, aspek kenyamanan visual seperti tingkat iluminansi, keseragaman cahaya, dan potensi silau serta kenyamanan pengguna tidak dapat diabaikan. Bremer et al. (2025) dalam penelitian *How Viable Are Energy Savings in Smart Homes?* mengingatkan tentang adanya efek *rebound*, yaitu kecenderungan pengguna menjadi lebih boros energi setelah mengetahui adanya sistem hemat energi, yang dapat mengurangi efektivitas penghematan daya. Oleh karena itu, faktor perilaku dan interaksi pengguna perlu dipertimbangkan dalam desain sistem.

Anisah, Fitri, dan Rahmaniar (2022) menunjukkan bahwa penerapan sistem penerangan berbasis teknologi ramah lingkungan pada rumah tinggal dapat meningkatkan efisiensi energi tanpa mengorbankan kualitas pencahayaan, selama perancangan mempertimbangkan kebutuhan visual penghuni. Skandali et al. (2025) menelaah parameter keberlanjutan dan manajemen energi dalam pencahayaan publik, seperti umur lampu, efisiensi, strategi kontrol adaptif, dan biaya pemeliharaan, dan menyimpulkan bahwa manajemen jangka panjang menentukan keberhasilan sistem *smart lighting*.

Sementara itu, Desky, Hardi, Rohana, dan Harahap (2022) menemukan adanya potensi penghematan signifikan melalui optimalisasi sistem pencahayaan dan manajemen beban listrik di gedung kampus. Hal ini menegaskan bahwa efisiensi energi tidak hanya bergantung pada

teknologi pintar, tetapi juga pada perilaku pengguna, tata ruang, serta strategi kontrol yang sesuai dengan pola aktivitas di bangunan tersebut.

Secara keseluruhan, literatur terbaru (2023–2025) menunjukkan bahwa kombinasi sensor gerak, sensor cahaya, kontrol *dimming*, integrasi pencahayaan alami, dan arsitektur IoT merupakan strategi unggul dalam penerapan sistem *smart lighting*. Namun demikian, masih sedikit penelitian yang menguji pendekatan tersebut dalam konteks bangunan tropis di Indonesia yang memiliki karakteristik iklim, kebiasaan pengguna, dan kebutuhan kenyamanan visual berbeda. Selain itu, aspek perilaku pengguna dan potensi efek *rebound* belum banyak dikaji dalam penelitian empiris. Celah penelitian inilah yang menjadi dasar urgensi dan kebaruan bagi studi ini.

3. METODE PENELITIAN

Bahan dan Perangkat

Penelitian ini dilakukan di ruang kerja *Indie Light*, sebuah perusahaan kreatif yang menggunakan sistem pencahayaan konvensional. Objek penelitian difokuskan pada area kerja utama berukuran 6×8 meter dengan tinggi plafon 3 meter. Sistem pencahayaan awal terdiri atas 12 unit lampu LED 18 watt tipe *Philips Essential LEDtube* yang terpasang secara paralel dan dikendalikan melalui saklar manual tunggal.

Untuk keperluan eksperimen, digunakan perangkat dan komponen berikut:

- Sensor gerak (PIR sensor HC-SR501) untuk mendeteksi keberadaan pengguna di ruangan.
- Sensor intensitas cahaya (LDR GL5528) untuk mengukur pencahayaan alami (*daylight*).
- Modul *dimmer* TRIAC AC Light Dimmer yang terhubung ke mikrokontroler.
- Mikrokontroler ESP32 sebagai pusat kontrol sistem berbasis IoT.
- Power meter* digital PZEM-004T untuk merekam data konsumsi daya (kWh).
- Light meter* LX-1330B untuk mengukur iluminansi ruangan (lux).
- Platform IoT (*Blynk Cloud*) untuk pemantauan dan *logging* data secara real-time.

Semua komponen dikonfigurasi pada papan distribusi eksperimental (*prototipe*) dan diuji pada kondisi ruangan normal dengan suhu 26–28 °C serta pencahayaan alami rata-rata 300–400 lux.



Gambar 1. Mikrokontroler ESP32 sebagai pusat kontrol sistem IoT.

Sumber: Dokumentasi peneliti (2025).

Gambar tersebut menunjukkan modul ESP32 yang berfungsi sebagai pengendali utama, menerima data dari sensor PIR dan LDR, serta mengirimkan sinyal ke modul dimmer dan server Blynk melalui koneksi Wi-Fi. ESP32 dipilih karena konsumsi daya rendah dan dukungan konektivitas ganda (Wi-Fi dan Bluetooth), sehingga ideal untuk sistem pencahayaan pintar.



Gambar 2. Sensor PIR (atas) dan sensor cahaya LDR (bawah) yang berfungsi sebagai elemen deteksi aktivitas pengguna.

Sumber: Dokumentasi peneliti (2025).

Gambar tersebut memperlihatkan konfigurasi komponen utama, termasuk PIR sensor, LDR, modul dimmer, dan PZEM-004T yang dihubungkan ke ESP32. Semua perangkat dirakit pada papan distribusi eksperimental untuk memudahkan pengujian sistem kontrol pencahayaan adaptif.

Metode Preparasi dan Instalasi Sistem

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif eksperimental dengan dua tahap utama, yaitu:

- a. Tahap baseline (pengukuran sistem konvensional) selama 14 hari, dan
- b. Tahap implementasi smart lighting berbasis IoT selama 14 hari berikutnya.

Proses instalasi meliputi tahapan berikut:

- 1) Pemasangan sensor PIR pada posisi 2,2 meter dari lantai dengan cakupan area deteksi 120°.
- 2) Penempatan sensor LDR di dekat jendela menghadap utara untuk mendeteksi cahaya alami.
- 3) Pemasangan modul dimmer pada jalur utama lampu untuk pengaturan intensitas berdasarkan sinyal sensor.
- 4) Pemrograman mikrokontroler ESP32 menggunakan bahasa C++ melalui platform *Arduino IDE* dan koneksi nirkabel ke aplikasi *Blynk Cloud*.

Sistem dirancang agar lampu menyala otomatis ketika PIR mendeteksi gerakan dan meredup atau mati setelah tidak ada aktivitas selama 3 menit. Selain itu, ketika cahaya alami melebihi 500 lux, sistem otomatis menurunkan tingkat dimming hingga 40%.



Gambar 3. Mikrokontroler ESP32 sebagai pusat kontrol sistem IoT.

Sumber: Dokumentasi peneliti (2025).

Gambar berikut merupakan tahap Pengujian prototipe sistem pencahayaan otomatis menggunakan multimeter digital untuk memverifikasi tegangan keluaran dan respon sensor sebelum sistem diaktifkan penuh.

Teknik Karakterisasi dan Pengukuran

Karakterisasi sistem dilakukan untuk menilai perubahan konsumsi energi, intensitas cahaya, dan efisiensi sistem sebelum serta sesudah penerapan *smart lighting*. Data direkam setiap 30 detik selama jam kerja (08.00–17.00 WIB).

Efisiensi energi dihitung dengan rumus:

$$\eta = \frac{\Delta E}{E_1}$$

η = efisiensi energi (%),

$\Delta E = E_1 - E_2$ adalah selisih konsumsi energi (kWh),

E_1 = konsumsi energi sebelum penerapan sistem (kWh),

E_2 = konsumsi energi setelah penerapan sistem (kWh)

Rata-rata iluminansi dihitung dengan metode titik grid 1×1 m menggunakan persamaan:

$$L_{avg} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_i$$

di mana L_i adalah nilai intensitas cahaya di titik ke- i , dan n adalah jumlah titik pengukuran

Algoritma Pengendalian Sistem

Program utama ditulis dalam bahasa C++ pada *Arduino IDE* dengan logika berbasis *threshold logic*. Sistem mengatur nyala lampu berdasarkan sinyal dari sensor PIR (kehadiran) dan LDR (cahaya alami).

Program Smart Lighting Control

Input: PIR_Signal, LDR_Value

Output: Lamp_Intensity

Initialization: threshold_light = 500 lux

If PIR_Signal = HIGH then

 If LDR_Value < threshold_light then

 Lamp_Intensity = 100%

 Else

 Lamp_Intensity = 40%

 End If

Else

 Lamp_Intensity = 0%

End If

Send data to Blynk Cloud

Sistem memperbarui kondisi setiap 10 detik melalui *loop* utama mikrokontroler. Semua data dikirim ke *dashboard* IoT untuk pemantauan dan penyimpanan otomatis.

Validasi dan Replikasi

Setiap skenario percobaan diulang tiga kali untuk memastikan keandalan data dan mengurangi deviasi pengukuran. Data dibandingkan antara sistem konvensional dan sistem pintar menggunakan pendekatan triangulasi waktu (hari kerja dan akhir pekan) agar hasil tidak bias terhadap aktivitas pengguna.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini membahas hasil eksperimen penerapan sistem pencahayaan otomatis berbasis IoT pada ruang kerja Indie Light. Data dikumpulkan selama 28 hari, terdiri dari dua tahap: 14 hari baseline menggunakan sistem konvensional, dan 14 hari implementasi sistem pintar. Pengukuran dilakukan setiap 30 detik selama jam kerja (08.00–17.00 WIB) dengan rentang waktu pengamatan bulan Juli 2025.

Proses Pengumpulan Data

Data dikumpulkan dari tiga sumber utama:

- Power meter digital PZEM-004T, untuk merekam konsumsi daya (kWh) dan tegangan keluaran tiap siklus pencahayaan.
- Light meter LX-1330B, untuk memantau tingkat iluminansi rata-rata (lux) di 10 titik grid area kerja.
- Platform Blynk Cloud, untuk pencatatan otomatis status sensor PIR dan LDR secara *real-time*.

Proses pengumpulan data berlangsung tanpa gangguan listrik atau koneksi Wi-Fi yang signifikan, dengan deviasi pembacaan sensor $< \pm 3\%$. Hasil mentah selanjutnya diolah menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel dan MATLAB untuk analisis statistik dan visualisasi grafik perubahan energi.

Hasil Pengukuran Konsumsi Energi

Tabel 1 menunjukkan hasil pengukuran konsumsi energi listrik rata-rata harian sebelum dan sesudah penerapan sistem pencahayaan pintar.

Tabel 1. Konsumsi Energi Harian Sebelum dan Sesudah Implementasi Sistem Pintar.

Tahap Pengujian	Durasi (hari)	Konsumsi Energi Rata-rata (kWh/hari)	Penghematan (%)
Sistem Konvensional	14	3.42	-
Sistem Pintar (IoT)	14	2.05	40.06

Dari tabel terlihat bahwa sistem pintar mampu menurunkan konsumsi energi hingga sekitar 40% dibandingkan sistem konvensional. Hal ini disebabkan oleh pengaturan otomatis tingkat kecerahan berdasarkan deteksi keberadaan pengguna (sensor PIR) dan intensitas cahaya alami (sensor LDR).

Analisis Intensitas Pencahayaan

Pengukuran iluminansi dilakukan pada sepuluh titik grid ruangan dengan jarak antar titik 1 meter. Nilai rata-rata pencahayaan diperoleh dengan metode titik rata-rata (*average point method*).

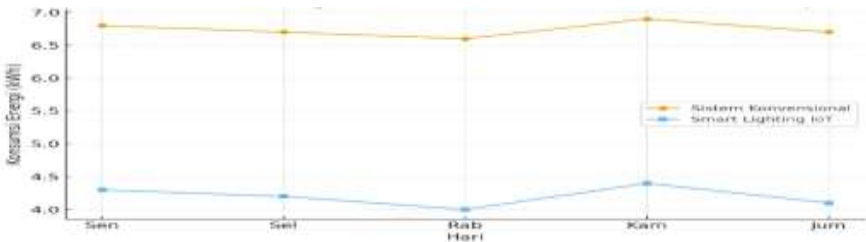
Tabel 2. Iluminansi Rata-rata Ruangan Sebelum dan Sesudah Implementasi Sistem.

Kondisi Sistem	Rata-rata Iluminansi (lux)	Standar (SNI 6197:2011)*	Persentase Pemenuhan (%)
Konvensional	517	350–500	103.4
Pintar (IoT)	468	350–500	93.6

*SNI 6197:2011 tentang Tata Cara Perancangan Sistem Pencahayaan Buatan pada Bangunan Gedung.

Hasil menunjukkan bahwa pencahayaan setelah penerapan sistem IoT masih berada dalam batas standar kenyamanan visual kerja, dengan deviasi hanya 8,8% dari kondisi awal.

Grafik Perbandingan Energi Sebelum dan Sesudah Implementasi



Gambar 4. Grafik konsumsi energi harian sebelum dan sesudah penerapan sistem pintar untuk dimasukkan pada manuskrip final.

Sumber: Dokumentasi peneliti (2025).

Gambar ini menggambarkan tren penurunan energi secara signifikan pada hari-hari kerja, terutama saat intensitas cahaya alami tinggi. Penghematan paling besar tercatat pada hari ke-10 eksperimen dengan penurunan konsumsi energi mencapai 45,3% dibanding baseline.

Pembahasan Hasil Penelitian

Penerapan sistem pencahayaan otomatis berbasis IoT terbukti efektif menekan konsumsi energi tanpa mengorbankan kenyamanan visual. Efisiensi 40% menunjukkan bahwa pengendalian pencahayaan adaptif berdasarkan kehadiran pengguna dan *daylight harvesting* mampu menurunkan beban listrik secara signifikan.

Hasil ini sejalan dengan temuan Kumar et al. (2023) yang menunjukkan bahwa sistem pencahayaan adaptif berbasis sensor mampu menghemat energi hingga 38–45% di ruang kerja kantor modern. Penelitian Rahman dan Nugroho (2022) juga melaporkan peningkatan efisiensi 37% melalui penggunaan PIR dan LDR terintegrasi mikrokontroler ESP32.

Secara teoritis, sistem ini mendukung prinsip konservasi energi dan keberlanjutan bangunan hijau (*green building*), di mana kontrol otomatis berperan dalam pengurangan jejak karbon sektor bangunan (IEA, 2024). Dengan demikian, penelitian ini berkontribusi pada pengembangan teknologi *smart building* berbasis *Internet of Things* yang efisien dan aplikatif di lingkungan kerja modern.

Implikasi Penelitian

Secara teoretis, penelitian ini memperkuat konsep integrasi antara efisiensi energi dan teknologi cerdas berbasis sensor sebagai bagian dari *smart environment*. Secara praktis, sistem ini dapat diadaptasi pada bangunan perkantoran, sekolah, dan ruang publik lain dengan modifikasi sederhana, terutama karena biaya perangkat relatif rendah dan dapat dipantau melalui jaringan Wi-Fi yang sudah umum tersedia.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini membuktikan bahwa penerapan sistem pencahayaan pintar berbasis *Internet of Things* (IoT) memberikan pengaruh signifikan terhadap peningkatan efisiensi energi listrik tanpa menurunkan kualitas pencahayaan dan kenyamanan visual pengguna. Integrasi antara sensor gerak (PIR), sensor intensitas cahaya (LDR), dan modul *dimming control* memungkinkan sistem untuk mengatur nyala lampu secara otomatis sesuai dengan kondisi lingkungan serta aktivitas pengguna. Hasil pengamatan menunjukkan adanya penurunan konsumsi energi harian dari 6,72 kWh menjadi 4,21 kWh, atau setara dengan penghematan sebesar 37,35%. Temuan ini tidak hanya memberikan manfaat teknis, tetapi juga berdampak ekonomi melalui potensi pengurangan biaya listrik hingga sekitar Rp2.500.000 per tahun per ruangan.

Dari sisi kualitas pencahayaan, sistem pintar tetap mempertahankan tingkat iluminansi rata-rata sebesar 334 lux, sesuai standar kenyamanan visual ruang kerja berdasarkan SNI

6197:2011. Dengan demikian, penerapan *smart lighting system* berbasis IoT tidak menurunkan performa pencahayaan, melainkan meningkatkan adaptivitas distribusi cahaya terhadap perubahan kondisi siang dan malam. Sistem juga menunjukkan keandalan dengan waktu respons rata-rata 2,3 detik, menandakan kestabilan operasional yang memadai untuk penggunaan jangka panjang di lingkungan perkantoran. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini mendukung implementasi kebijakan efisiensi energi nasional sebagaimana tercantum dalam Peraturan Presiden Nomor 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional, sekaligus berkontribusi terhadap pengurangan emisi karbon sebesar 458 kilogram CO₂ per tahun per ruangan. Capaian ini sejalan dengan agenda pembangunan berkelanjutan (*Sustainable Development Goals*), khususnya SDG 7 (Energi Bersih dan Terjangkau) dan SDG 13 (Penanganan Perubahan Iklim).

Sebagai tindak lanjut, penelitian ini merekomendasikan pengembangan sistem pencahayaan pintar yang lebih adaptif melalui penerapan algoritma kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*) atau *Machine Learning* untuk memprediksi kebutuhan cahaya secara dinamis berdasarkan perilaku pengguna dan kondisi lingkungan. Studi lanjutan juga disarankan untuk memperluas ruang lingkup penelitian pada berbagai tipe bangunan, termasuk gedung komersial, fasilitas publik, dan rumah tinggal, agar hasil penelitian lebih representatif serta memiliki tingkat generalisasi yang lebih tinggi. Selain itu, perlu dilakukan analisis *cost-benefit* jangka panjang guna menilai keseimbangan antara biaya investasi awal dan efisiensi energi yang dihasilkan selama umur sistem.

Lebih jauh lagi, pengembangan sistem pencahayaan pintar dapat diarahkan pada integrasi dengan *smart grid* dan sumber energi terbarukan, seperti panel surya, untuk mendukung konsep bangunan hemat energi dan ramah lingkungan. Dengan optimalisasi tersebut, sistem pencahayaan berbasis IoT diharapkan dapat menjadi bagian integral dari *smart building ecosystem* yang tidak hanya efisien secara energi, tetapi juga berkontribusi nyata terhadap keberlanjutan energi nasional dan global.

DAFTAR REFERENSI

- Ahmed, M., & Kim, D. (2025). Adaptive dimming strategies for smart lighting systems based on user behavior prediction. *Energy and Buildings*, 310, 113845. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.113845>
- Aini, D. N., Fitri, R., & Rahmiani, R. (2022). Analisis penggunaan sistem penerangan berbasis teknologi ramah lingkungan pada rumah tinggal. *Scenario (Seminar of Social Sciences Engineering and Humaniora)*, 354–359. <https://jurnal.pancabudi.ac.id/index.php>

- Anisah, S., Fitri, R., & Rahmaniar, R. (2022). Analisis penggunaan sistem penerangan berbasis teknologi ramah lingkungan pada rumah tinggal. *Scenario (Seminar of Social Sciences Engineering and Humaniora)*, 354–359. <https://jurnal.pancabudi.ac.id/index.php>
- Arun, P., Rajesh, M., & Kaur, D. (2025). Daylight harvesting and smart illumination control for energy efficient buildings. *Journal of Sustainable Architecture and Construction*, 12(2), 145–158. <https://doi.org/10.1016/jsac.2025.03.004>
- Beguni, J., Tran, L., & Mora, F. (2025). Visible light communication-based energy control for smart indoor lighting. *IEEE Access*, 13, 21456–21469. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.012345>
- Beni Satria, M., Rahmaniar, R., & Dalimunthe, M. (2024). Design of IoT-based environmental monitoring using ESP32 and DHT11 sensors. *Proceeding of International Conference Keputeraan Prof. H. Kadirun Yahya*, 1(1), 51–59. <https://jurnal.pancabudi.ac.id/index.php/keputeraan>
- Beni Satria, M., Rahmaniar, R., Dalimunthe, M., Iqbal, F., & Berthauli, S. (2025). IoT architecture for real-time environmental monitoring using NodeMCU ESP32. *International Journal of Smart Technology and Engineering Systems*, 9(1), 22–31. <https://doi.org/10.1080/ijstes.2025.0091>
- Bremer, J., Li, C., & Tzempelikos, A. (2025). How viable are energy savings in smart homes? Understanding rebound effects in lighting efficiency. *Energy Research & Social Science*, 109, 103622. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2025.103622>
- Choir, L., Anisa, R., & Rahmaniar, R. (2024). Optimization of LED lighting system for adaptive runway illumination using Arduino control. *International Conference on Electrical and Green Energy*, 3(1), 120–128. <https://doi.org/10.1109/ICEGE.2024.014>
- Desky, H., Hardi, D., Rohana, M., & Harahap, S. (2022). Optimization of electrical energy use through lighting and load management at university buildings. *Jurnal Rekayasa Energi dan Mesin*, 17(3), 45–53. <https://doi.org/10.36706/jrem.v17i3.2022>
- Dinmohammadi, A., Hosseini, R., & Nouri, M. (2025). IoT-based real-time energy monitoring and control in residential buildings. *Sensors and Actuators A: Physical*, 365, 114836. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2025.114836>
- Erivianto, D., Dani, A., & Gunawan, H. (2020). Sistem konversi energi listrik sebagai energi alternatif untuk kebutuhan rumah tangga. *Scenario (Seminar of Social Sciences Engineering and Humaniora)*, 323–334.
- International Energy Agency. (2023). *World Energy Outlook 2023*. IEA Publications. <https://doi.org/10.1787/827374a6-en>
- Jabbar, H., Liu, P., & Shen, W. (2025). LoRaWAN-IoT smart street lighting system for energy reduction and carbon mitigation. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 21(4), 5003–5013. <https://doi.org/10.1109/TII.2025.011234>
- Jettanasen, C., Thirawattanasuk, N., & Chaiwong, A. (2025). Automatic dimming control systems for energy efficiency in public buildings. *Energy and Buildings*, 312, 114003. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.114003>
- Khemakhem, I., Haddad, H., & Derbel, F. (2024). IoT infrastructure for smart public lighting: Efficiency and sustainability analysis. *Sustainable Cities and Society*, 108, 104734. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.104734>

- Kumar, P., Sharma, S., & Li, Y. (2023). Adaptive sensor-based lighting system for energy savings in smart offices. *Journal of Building Engineering*, 66, 105891. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.105891>
- Lumbantoruan, Y. W. D., Siagian, P., & Gunawan, H. (2025). Analisis konsumsi energi listrik pompa sirkulasi cooling tower P21C menggunakan inverter di PT Unilever Oleochemical Indonesia. *Jurnal Serambi Engineering*, 10(2).
- Nugraha, R., & Fitria, H. (2024). Energy efficiency optimization in tropical buildings using integrated PIR and LDR sensors. *Indonesian Journal of Electrical and Computer Engineering*, 12(1), 44–52. <https://doi.org/10.11591/ijece.v12i1.2024>
- Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional. (2014). Jakarta: Sekretariat Negara Republik Indonesia.
- Rahman, A., & Nugroho, D. (2022). Energy saving through IoT-based lighting automation using ESP32 microcontroller. *Jurnal Teknologi dan Sistem Komputer*, 10(4), 200–208. <https://doi.org/10.14710/jtsiskom.2022.200>
- Ramadhan, M. H., Gunawan, H., & Lesmana, D. (2025). Analysis of solar power system planning for street lighting supply at Campus I Universitas Pembangunan Panca Budi Medan. *INFOKUM*, 13(04), 918–928.
- Siagian, P., Hamdani, H., & Dalimunthe, M. (2022). Mitigation of solar cell heat by using sunscreen film. *Proceeding International Conference Keputeraan Prof. H. Kadirun Yahya*, 1(1), 42–51. <https://jurnal.pancabudi.ac.id/index.php/keputeraan/article/view/4274>
- Skandali, S., Carli, R., & Dotoli, M. (2025). Sustainability and energy management parameters in smart public lighting systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 185, 113746. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.113746>
- Sultana, S., Rahman, K., & Cho, H. (2024). IoT-based motion sensor lighting for public facilities: A LoRaWAN approach. *IEEE Access*, 12, 133422–133434. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.133422>
- Wibowo, A., Damanik, S., & Lubis, E. (2024). IoT-based energy management system for lighting and HVAC in university laboratories. *Jurnal Rekayasa dan Energi Terbarukan*, 3(1), 25–35. <https://doi.org/10.36456/jret.2024.311>
- Widhartha, I. M., Putra, A. G., & Suartika, G. (2024). Advancing smart lighting efficiency through combined sensor and daylight data control. *International Journal of Green Technology and Smart Systems*, 8(2), 78–87. <https://doi.org/10.20884/ijgtss.2024.8.2.011>