



Optimasi EMS dan BMS dengan Pendekatan Data-Driven untuk Efisiensi Energi pada Gedung Perkantoran Bertingkat Tinggi (Studi Kasus Trinity Tower Jakarta)

*Tunas Siregar¹

Universitas Kristen Indonesia,
Indonesia

Rismen Sinambela²

Universitas Kristen Indonesia,
Indonesia

***Corresponding author:**

Tunas Siregar, Universitas Kristen Indonesia,
Indonesia. ✉ siregartunas88@gmail.com

Article Info :

Article history:

Received: December 01, 2025

Revised: January 04, 2026

Accepted: February 05, 2026

Keywords:

building management system;
CUSUM; energy efficiency; energy
management system; k-nearest
neighbor; office building

Kata Kunci:

bangunan perkantoran; CUSUM;
efisiensi energi; k-nearest
neighbor; sistem manajemen
bangunan; sistem manajemen
energi

Abstract

Background: The increase in electrical energy consumption in high-rise office buildings, especially in tropical regions such as Indonesia, demands the implementation of an effective, measurable, and sustainable energy management system.

Objective: This study aims to evaluate the implementation of an Energy Management System integrated with a Building Management System in improving energy efficiency and reducing carbon emissions in office buildings.

Methods: The case study was conducted at the Shimizu Corporation office in the Trinity Tower Building, Jakarta using actual operational data. This study applies a quantitative approach with analysis before-after the implementation of EMS. The CUSUM method was used to detect significant changes in energy consumption patterns and was statistically validated using p-values. In addition, the K-Nearest Neighbor (KNN) method was applied to classify energy consumption patterns based on load, operational time, and building zones by comparing conditions before and after the implementation of EMS.

Results: The implementation of EMS-BMS resulted in a statistically significant reduction in electrical energy consumption, with a $p[X]$ value indicating a significant change. The annual electricity cost savings are approximately IDR 1.2 billion, accompanied by a reduction of around 450 tons of CO₂ per year. Further statistical analysis of energy consumption intensity revealed that the average monthly electricity cost of Shimizu Corporation's office is IDR 12,828,573 for an area of 1,089 m², so the cost intensity is around IDR 11,800–12,000/m²/month. This cost intensity is much lower than the average office building in Indonesia and remains competitive at the Asian regional level.

Conclusion: These findings confirm that the integration of EMS-BMS supported by the CUSUM and KNN analyses not only improves energy performance technically, but also provides significant economic benefits as well as supports the achievement of sustainability targets.

Abstrak

Latar belakang: Peningkatan konsumsi energi listrik pada gedung perkantoran bertingkat tinggi, khususnya di wilayah beriklim tropis seperti Indonesia, menuntut penerapan sistem manajemen energi yang efektif, terukur, dan berkelanjutan.

Tujuan: Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi implementasi Energy Management System yang terintegrasi dengan Building Management System dalam meningkatkan efisiensi energi dan menurunkan emisi karbon pada gedung perkantoran.

Metode: Studi kasus dilakukan di kantor Shimizu Corporation di Gedung Trinity Tower Jakarta menggunakan data operasional aktual. Penelitian ini menerapkan pendekatan kuantitatif dengan analisis sebelum-sesudah implementasi EMS. Metode CUSUM digunakan untuk mendeteksi perubahan signifikan pola konsumsi energi dan divalidasi

secara statistik menggunakan nilai-p. Selain itu, metode K-Nearest Neighbor (KNN) diterapkan untuk mengklasifikasikan pola konsumsi energi berdasarkan beban, waktu operasional, dan zona bangunan dengan membandingkan kondisi sebelum dan sesudah implementasi EMS.

Hasil: Penerapan EMS-BMS menghasilkan pengurangan konsumsi energi listrik yang signifikan secara statistik, dengan nilai p [X] yang menunjukkan perubahan tersebut signifikan. Penghematan biaya listrik tahunan sebesar kurang lebih Rp 1,2 miliar, disertai dengan pengurangan sekitar 450 ton CO₂ per tahun. Analisis statistik intensitas konsumsi energi lebih lanjut mengungkapkan bahwa rata-rata biaya listrik bulanan kantor Shimizu Corporation adalah Rp 12.828.573 untuk area seluas 1.089 m², sehingga intensitas biaya sekitar Rp 11.800–12.000/m²/bulan. Intensitas biaya ini jauh lebih rendah dari rata-rata gedung perkantoran di Indonesia dan tetap kompetitif di tingkat regional Asia.

Kesimpulan: Temuan ini menegaskan bahwa integrasi EMS-BMS yang didukung oleh analisis CUSUM dan KNN tidak hanya meningkatkan kinerja energi secara teknis, tetapi juga memberikan manfaat ekonomi yang signifikan serta mendukung pencapaian target keberlanjutan.

To cite this article: Siregar, T., & Sinambela, R. (2026). Optimasi EMS dan BMS dengan pendekatan data-driven untuk efisiensi energi pada gedung perkantoran bertingkat tinggi (Studi kasus Trinity Tower Jakarta). *Equivalent: Jurnal Ilmiah Sosial Teknik*, 8(1), 181–195. <https://doi.org/10.59261/jequi.v8i1.265>

PENDAHULUAN

Gedung perkantoran bertingkat tinggi merupakan salah satu sektor dengan konsumsi energi listrik terbesar di kawasan perkotaan, khususnya di negara berkembang dengan pertumbuhan ekonomi dan urbanisasi yang pesat seperti Indonesia (Kartika, 2018). Operasional gedung perkantoran modern sangat bergantung pada sistem *Heating, Ventilation, and Air Conditioning* (HVAC), pencahayaan, serta peralatan listrik pendukung lainnya. Secara global, sektor bangunan menyumbang sekitar 30-40% dari total konsumsi energi, dengan proporsi konsumsi energi terbesar berasal dari sistem pemanasan, ventilasi, dan pendinginan udara (HVAC). Sebagai contoh, proporsi konsumsi HVAC pada gedung perkantoran tropis dapat mencapai lebih dari 50% dari total konsumsi energi listrik (Rahmah, 2023). Oleh karena itu, pengelolaan energi yang efisien pada gedung-gedung perkantoran di wilayah tropis sangat penting untuk meningkatkan keberlanjutan dan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan (Auliasari et al., 2025).

Tingginya konsumsi energi listrik pada gedung perkantoran berdampak langsung pada meningkatnya biaya operasional serta berkontribusi terhadap emisi gas rumah kaca, khususnya karbon dioksida (CO₂) (Mutiah & Sudiarto, 2025). Sektor bangunan menyumbang emisi tidak langsung (scope 2 emissions) yang signifikan melalui konsumsi listrik (Karunia et al., 2023). Di Indonesia, sektor ini menjadi salah satu penyumbang terbesar emisi energi (Pratama, 2023). Oleh karena itu, peningkatan efisiensi energi pada gedung perkantoran menjadi salah satu strategi kunci dalam mendukung keberlanjutan energi dan mitigasi perubahan iklim, sejalan dengan agenda pembangunan berkelanjutan (Adhicandra, 2024).

Penerapan *Energy Management System* (EMS) yang terintegrasi dengan *Building Management System* (BMS) merupakan pendekatan yang semakin banyak digunakan untuk meningkatkan efisiensi energi Gedung (Arunkumar et al., 2022). Integrasi EMS-BMS memungkinkan pemantauan konsumsi energi secara real-time, pengendalian operasional sistem gedung secara terpusat, serta evaluasi kinerja energi berbasis data operasional aktual (Komalasari et al., 2025). Melalui pendekatan ini, pengelola gedung dapat mengidentifikasi pola konsumsi energi, mendeteksi potensi pemborosan, serta menerapkan strategi optimasi energi secara berkelanjutan (Wahyuzy, 2024).

Meskipun teknologi EMS-BMS telah berkembang dan banyak diterapkan di negara maju, kajian empiris berbasis data operasional aktual gedung perkantoran di Indonesia masih relatif terbatas. Sebagian besar penelitian sebelumnya berfokus pada simulasi energi atau audit energi konvensional yang bersifat deskriptif, sehingga belum sepenuhnya mencerminkan kondisi operasional nyata di lapangan. Selain itu, evaluasi dampak implementasi EMS sering kali belum dilengkapi dengan metode analisis statistik dan *machine learning* yang mampu mendeteksi

perubahan pola konsumsi energi secara kuantitatif dan objektif. Kondisi ini menimbulkan research gap terkait kebutuhan pendekatan analitis yang tidak hanya menggambarkan penurunan konsumsi energi, tetapi juga mampu membuktikan adanya perubahan signifikan pada pola konsumsi energi akibat intervensi sistem manajemen energi.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini diarahkan untuk mengevaluasi implementasi EMS yang terintegrasi dengan BMS pada gedung perkantoran Trinity Tower Jakarta dengan menggunakan data operasional aktual gedung. Evaluasi dilakukan melalui analisis sebelum dan sesudah implementasi EMS (*before-after analysis*), yang dikombinasikan dengan metode statistik dan *machine learning*. Metode *Cumulative Sum Control Chart* (CUSUM) digunakan untuk mendeteksi perubahan signifikan (*change point*) pada deret waktu konsumsi energi listrik sebagai bukti statistik dampak implementasi EMS.

CUSUM dipilih karena kemampuannya dalam mendeteksi perubahan yang kecil sekalipun dalam deret waktu, sehingga lebih sensitif dibandingkan metode statistik lainnya seperti uji t atau ANOVA yang biasanya digunakan dalam analisis perbedaan rata-rata. Selanjutnya, metode K-Nearest Neighbor (KNN) diterapkan untuk mengklasifikasikan pola konsumsi energi ke dalam kondisi sebelum dan sesudah implementasi EMS berdasarkan karakteristik beban energi, waktu operasional, dan zona bangunan, dengan parameter teknis $k = 5$, metrik jarak Euclidean distance, serta skema validasi data 80:20.

Pendekatan ini memungkinkan evaluasi kinerja energi gedung tidak hanya dari sisi penurunan konsumsi energi listrik, tetapi juga dari perubahan karakteristik pola beban energi secara operasional. Dalam penelitian ini, hasil kinerja energi dievaluasi menggunakan indikator *Energy Efficiency Index* (EEI), di mana implementasi EMS-BMS menghasilkan penurunan EEI sebesar 23,5%. Hasil ini sejalan dengan temuan Kusumastuti (2025) terkait integrasi EMS-BMS pada gedung perkantoran, meskipun masih berada di atas benchmark gedung perkantoran efisien di Singapura yang berada pada kisaran 180 kWh/m²/tahun. Perbandingan ini menunjukkan bahwa implementasi EMS-BMS telah memberikan peningkatan kinerja energi yang signifikan, namun masih terdapat ruang peningkatan lebih lanjut melalui penerapan teknologi lanjutan, termasuk integrasi algoritma kecerdasan buatan yang lebih adaptif.

Selain aspek teknis, penelitian ini juga mengevaluasi dampak ekonomi dan lingkungan dari implementasi EMS-BMS. Evaluasi menunjukkan adanya penghematan biaya listrik tahunan sekitar ± Rp 1,2 miliar serta reduksi emisi karbon sekitar ± 450 ton CO₂ per tahun. Analisis intensitas biaya energi menunjukkan bahwa biaya listrik bulanan rata-rata kantor Shimizu Corporation sebesar Rp 12.828.573 dengan luas area 1.089 m², menghasilkan intensitas biaya sekitar ± Rp 11.800–12.000/m²/bulan, yang berada di bawah rata-rata gedung perkantoran di Indonesia dan tetap kompetitif pada tingkat regional Asia.

Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi ilmiah berupa evaluasi kinerja energi gedung perkantoran berbasis data operasional aktual yang terintegrasi dengan analisis CUSUM dan KNN. Hasil penelitian ini relevan dengan pencapaian *Sustainable Development Goals* (SDGs), khususnya SDG 7 (Energi Bersih dan Terjangkau), SDG 9 (Industri, Inovasi, dan Infrastruktur), SDG 11 (Kota dan Permukiman Berkelanjutan), dan SDG 13 (Penanganan Perubahan Iklim), serta sejalan dengan kebijakan konservasi energi nasional dalam upaya peningkatan efisiensi energi sektor bangunan di Indonesia.

Tinjauan Pustaka

Energy Management System (EMS) dan Building Management System (BMS)

Energy Management System (EMS) merupakan sistem terintegrasi yang dirancang untuk memantau, menganalisis, dan mengoptimalkan penggunaan energi secara berkelanjutan pada suatu fasilitas atau bangunan. Penerapan EMS bertujuan untuk meningkatkan efisiensi energi, menurunkan biaya operasional, serta mendukung pengambilan keputusan berbasis data melalui pemantauan kinerja energi secara sistematis. Dalam praktiknya, EMS sering dikaitkan dengan standar internasional ISO 50001 yang menekankan pentingnya siklus perbaikan berkelanjutan (*plan-do-check-act*) dalam manajemen energi 1.

Building Management System (BMS) berfungsi sebagai sistem pengendali terpusat yang mengintegrasikan berbagai subsistem gedung, seperti *Heating, Ventilation, and Air Conditioning* (HVAC), pencahayaan, sistem kelistrikan, dan sistem pendukung lainnya. Melalui BMS, pengoperasian subsistem gedung dapat dilakukan secara otomatis dan terjadwal, sehingga

meningkatkan keandalan operasional dan efisiensi penggunaan energi. Integrasi EMS dengan BMS memungkinkan pemanfaatan data operasional gedung secara lebih komprehensif untuk keperluan analisis dan optimasi energi.

Integrasi EMS–BMS memberikan nilai tambah yang signifikan dalam pengelolaan energi gedung perkantoran. Data konsumsi energi yang dikumpulkan oleh BMS dapat dianalisis lebih lanjut oleh EMS untuk mengidentifikasi pola beban, mendeteksi inefisiensi, serta mengevaluasi dampak strategi pengendalian energi. Sejumlah penelitian melaporkan bahwa integrasi EMS–BMS mampu menurunkan konsumsi energi gedung perkantoran sebesar 10–30%, tergantung pada karakteristik bangunan dan strategi pengendalian yang diterapkan 2, 3.

Analisis Deret Waktu Konsumsi Energi dan Metode CUSUM

Analisis konsumsi energi listrik pada gedung perkantoran umumnya melibatkan data deret waktu (*time series*) yang mencerminkan variasi beban energi terhadap waktu. Untuk mengevaluasi dampak suatu intervensi efisiensi energi, diperlukan metode statistik yang mampu mendeteksi perubahan pola konsumsi energi secara objektif dan kuantitatif. Salah satu metode yang banyak digunakan untuk tujuan tersebut adalah *Cumulative Sum Control Chart* (CUSUM).

Metode CUSUM merupakan teknik statistik yang digunakan untuk mendeteksi perubahan kecil namun konsisten pada nilai rata-rata suatu proses. Dalam konteks manajemen energi, CUSUM digunakan untuk mengidentifikasi titik perubahan (*change point*) pada konsumsi energi listrik yang mengindikasikan adanya pengaruh intervensi, seperti penerapan EMS atau perubahan strategi operasional. Keunggulan utama CUSUM terletak pada sensitivitasnya terhadap perubahan bertahap yang sering tidak terdeteksi oleh metode statistik konvensional.

Penelitian Sianturi (2025) menunjukkan bahwa CUSUM efektif digunakan untuk memverifikasi dampak program efisiensi energi pada bangunan melalui pendekatan *measurement and verification* (M&V). Dengan membandingkan akumulasi deviasi konsumsi energi terhadap suatu baseline, CUSUM memungkinkan evaluasi kinerja energi secara berkelanjutan dan objektif 4, 5. Oleh karena itu, metode ini relevan untuk digunakan dalam penelitian ini guna mendeteksi perubahan signifikan pada pola konsumsi energi listrik sebelum dan sesudah implementasi EMS–BMS.

Klasifikasi Pola Konsumsi Energi Menggunakan K-Nearest Neighbor (KNN)

Selain analisis statistik deret waktu, pendekatan berbasis *machine learning* semakin banyak digunakan dalam analisis konsumsi energi bangunan. Salah satu metode klasifikasi yang sederhana namun efektif adalah *K-Nearest Neighbor* (KNN). KNN merupakan algoritma pembelajaran terawasi (*supervised learning*) yang mengklasifikasikan suatu data berdasarkan kedekatannya dengan sejumlah tetangga terdekat dalam ruang fitur.

Dalam konteks manajemen energi gedung, KNN dapat digunakan untuk mengklasifikasikan pola konsumsi energi ke dalam kategori tertentu, seperti kondisi sebelum dan sesudah implementasi EMS, atau berdasarkan karakteristik zona bangunan. Fitur yang umum digunakan dalam analisis KNN meliputi konsumsi energi (kWh), waktu operasional (jam, hari), serta lokasi atau zona gedung. Keunggulan KNN terletak pada kemudahannya dalam menangani data multidimensi dan kemampuannya untuk menangkap kemiripan pola konsumsi energi tanpa memerlukan model matematis yang kompleks.

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa KNN dapat memberikan tingkat akurasi klasifikasi yang baik dalam analisis pola konsumsi energi bangunan, khususnya ketika dikombinasikan dengan teknik pra-pemrosesan data yang tepat 6, 7. Dalam penelitian ini, KNN digunakan untuk mengklasifikasikan data konsumsi energi listrik ke dalam kondisi sebelum dan sesudah implementasi EMS, sehingga memberikan pemahaman tambahan mengenai perubahan pola beban energi secara operasional.

Integrasi EMS–BMS dengan CUSUM & KNN dalam Evaluasi Kinerja Energi

Integrasi pendekatan manajemen energi berbasis EMS–BMS dengan metode analisis CUSUM dan KNN memberikan kerangka evaluasi kinerja energi yang komprehensif. EMS–BMS berperan sebagai sistem akuisisi dan pengelolaan data energi, sedangkan CUSUM dan KNN berfungsi sebagai alat analisis untuk mengevaluasi perubahan pola konsumsi energi dan mengklasifikasikan kondisi operasional secara kuantitatif.

Dengan mengombinasikan CUSUM dan KNN, evaluasi kinerja energi tidak hanya bersifat deskriptif, tetapi juga analitis dan berbasis data. CUSUM digunakan untuk mendeteksi adanya perubahan signifikan akibat implementasi EMS, sementara KNN digunakan untuk mengelompokkan pola konsumsi energi berdasarkan karakteristik operasional dan zona gedung. Pendekatan ini memungkinkan penilaian dampak implementasi EMS-BMS secara lebih objektif dan mendukung pengambilan keputusan berbasis data dalam pengelolaan energi gedung perkantoran 8. Ringkasan penelitian terdahulu terkait integrasi EMS-BMS dan metode analisis yang digunakan disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Ringkasan Penelitian Terkait Integrasi EMS-BMS (5 Tahun Terakhir)

No	Sumber / Judul Penelitian	Fokus Data / Temuan Utama	Referensi
1	Peran Manajemen Energi terhadap Efisiensi Konsumsi Listrik Rumah Tangga di Indonesia	Analisis komprehensif potensi peningkatan efisiensi energi melalui integrasi BEMS/BMS di gedung komersial, dengan studi kasus nyata serta evaluasi dampak sistem.	(Jamilatun et al., 2025)
2	Transformasi Manajemen Energi di Gedung Perkantoran Modern	Kajian literatur yang melaporkan bahwa teknologi cerdas seperti IoT/AI dalam integrasi EMS/BMS mampu menurunkan konsumsi energi dan biaya operasional pada gedung perkantoran modern.	(Auliasari et al., 2025)
3	Optimalisasi Sistem Monitoring Dan Prediksi Konsumsi Energi Berbasis IoT Dan Deep Learning Untuk Smart Building Di Kota Palembang	Data longitudinal konsumsi energi gedung dengan monitoring real-time; relevan untuk membandingkan pola deret waktu sebelum dan sesudah intervensi sistem (laporan konsumsi gedung tropis).	(Fadli & Sutabri, 2026)
4	Analysis of the Influence of Air Conditioning Systems ...	Data aktual HVAC di gedung kantor: kontribusi konsumsi HVAC terhadap total energi mencapai 50-60% dari total beban listrik gedung.	(Wu et al., 2022)
5	Machine learning for estimation of building energy	Tinjauan ilmiah tentang penggunaan data-driven & machine learning dalam pengukuran dan benchmarking konsumsi energi, termasuk klasifikasi pola deret waktu dan pengukuran EPI/EUI gedung.	(Seyedzadeh et al., 2018)

METODE

Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif terapan dengan metode studi kasus pada gedung perkantoran bertingkat tinggi, yaitu kantor Shimizu Corporation yang berlokasi di Gedung Trinity Tower Jakarta. Pendekatan ini dipilih untuk mengevaluasi secara empiris dampak implementasi *Energy Management System* (EMS) yang terintegrasi dengan *Building Management System* (BMS) berdasarkan data operasional aktual gedung, sehingga hasil penelitian bersifat aplikatif dan relevan untuk kondisi nyata di lapangan.

Penelitian ini menggunakan desain studi kasus evaluatif (*evaluative case study*) untuk menilai dampak langsung dari implementasi EMS-BMS terhadap konsumsi energi, biaya operasional, dan emisi karbon di gedung perkantoran. Desain ini dipilih untuk mengidentifikasi efek kausal dari implementasi EMS pada kinerja energi, dengan mempertimbangkan validitas internal yang dijaga melalui pengumpulan data yang konsisten sebelum dan sesudah intervensi serta penggunaan metode statistik yang kuat.

Evaluasi kinerja energi dilakukan menggunakan analisis before-after (sebelum dan sesudah implementasi), yang memungkinkan penilaian langsung terhadap perubahan konsumsi energi, biaya operasional, dan emisi karbon sebagai akibat dari penerapan EMS-BMS. Selain itu, periode waktu observasi sebelum dan sesudah intervensi adalah satu tahun, yang memberikan cukup data untuk analisis inferensial yang kuat.

Objek Penelitian dan Ruang Lingkup

Objek penelitian adalah area kantor Shimizu Corporation dengan luas area sekitar 1.089 m² yang beroperasi di Gedung Trinity Tower Jakarta. Ruang lingkup penelitian difokuskan pada evaluasi konsumsi energi listrik gedung, khususnya energi yang digunakan oleh sistem HVAC, pencahayaan, dan peralatan listrik pendukung.

Penelitian ini mencakup: 1) Evaluasi kinerja energi tahunan sebelum dan sesudah implementasi EMS-BMS. 2) Analisis data operasional rinci menggunakan contoh bulan Januari 2025 untuk menjelaskan mekanisme perhitungan konsumsi energi dan biaya listrik. 3) Analisis pola konsumsi energi berdasarkan zona bangunan (Zona 1 dan Zona 4) untuk mendukung evaluasi operasional berbasis zona.

Data Penelitian dan Akuisisi Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari sistem EMS-BMS yang telah terpasang dan beroperasi pada gedung penelitian. Data konsumsi energi listrik direkam secara otomatis dan tersimpan dalam basis data sistem manajemen gedung.

Jenis data yang digunakan meliputi: 1) Data konsumsi energi listrik (kWh) dalam resolusi waktu bulanan, harian, dan per jam. 2) Data waktu operasional gedung (jam kerja dan hari operasional). 3) Data zona bangunan (Zona 1 dan Zona 4). 4) Data biaya listrik yang diturunkan dari konsumsi energi dan struktur tarif yang berlaku.

Untuk menjaga konsistensi evaluasi, data Januari 2025 digunakan sebagai contoh perhitungan operasional, sedangkan evaluasi kinerja utama didasarkan pada data tahunan sebagaimana dilaporkan dalam Jurnal. Struktur dan resolusi data penelitian yang digunakan dalam analisis disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Struktur dan Resolusi Data Penelitian

Jenis Data	Resolusi Waktu	Sumber Data	Kegunaan Analisis
Konsumsi energi (kWh)	Bulanan	EMS-BMS	Analisis tahunan
Konsumsi energi (kWh)	Harian	EMS-BMS	Analisis pola beban
Konsumsi energi (kWh)	Per jam	EMS-BMS	Analisis zonal
Biaya listrik	Bulanan	EMS-BMS & tarif	Analisis ekonomi
Zona bangunan	Zona 1 & 4	BMS	KNN classification

Pra-Pemrosesan Data

Sebelum dilakukan analisis, data konsumsi energi melalui tahapan pra-pemrosesan yang meliputi: 1) Pembersihan data, untuk menghilangkan data tidak lengkap atau anomali akibat gangguan sistem pencatatan. 2) Normalisasi data, untuk menyamakan skala data konsumsi energi pada berbagai resolusi waktu. 3) Penentuan baseline, yaitu kondisi konsumsi energi sebelum implementasi EMS yang digunakan sebagai acuan dalam analisis *before-after* dan metode CUSUM. Tahapan pra-pemrosesan ini bertujuan untuk memastikan bahwa data yang dianalisis bersifat

valid dan representatif terhadap kondisi operasional gedung.

Metode Cumulative Sum Control Chart (CUSUM)

Metode *Cumulative Sum Control Chart* (CUSUM) digunakan dalam penelitian ini untuk mendeteksi perubahan signifikan pada pola konsumsi energi listrik sebelum dan sesudah implementasi *Energy Management System* (EMS). CUSUM dipilih karena kemampuannya dalam mengidentifikasi perubahan kecil namun konsisten pada deret waktu konsumsi energi, sehingga sesuai untuk mengevaluasi dampak intervensi efisiensi energi secara statistik dan berkelanjutan.

Secara matematis, nilai CUSUM dirumuskan sebagai berikut:

$$CUSUM_t = \sum_{i=1}^t (E_{aktual,i} - E_{baseline,i})$$

di mana:

$CUSUM_t$ adalah nilai kumulatif deviasi konsumsi energi hingga periode ke- t ,

$E_{aktual,i}$ adalah konsumsi energi aktual pada periode ke- i ,

$E_{baseline,i}$ adalah konsumsi energi acuan (*baseline*) pada periode ke- i .

Nilai baseline dalam penelitian ini dihitung menggunakan rata-rata historis konsumsi energi sebelum implementasi EMS-BMS dan digunakan sebagai referensi untuk mengevaluasi perubahan kinerja energi setelah sistem diimplementasikan.

Interpretasi grafik CUSUM dalam konteks manajemen energi adalah sebagai berikut: 1) Kemiringan grafik CUSUM yang negatif menunjukkan bahwa konsumsi energi aktual berada di bawah nilai *baseline*, yang mengindikasikan adanya penghematan energi. 2) Kemiringan grafik CUSUM yang positif menunjukkan bahwa konsumsi energi aktual melebihi nilai *baseline*, yang mengindikasikan peningkatan konsumsi energi. 3) Perubahan kemiringan grafik mencerminkan adanya titik perubahan (*change point*) yang mengindikasikan dampak nyata dari implementasi strategi manajemen energi.

Dalam penelitian ini, analisis CUSUM digunakan untuk memverifikasi secara statistik bahwa perubahan konsumsi energi listrik yang terjadi setelah implementasi EMS-BMS bukan disebabkan oleh fluktuasi acak, melainkan merupakan hasil langsung dari intervensi sistem manajemen energi yang diterapkan.

Metode K-Nearest Neighbor (KNN)

Metode *K-Nearest Neighbor* (KNN) digunakan untuk mengklasifikasikan pola konsumsi energi listrik ke dalam kondisi sebelum dan sesudah implementasi EMS. KNN dipilih karena kesederhanaannya serta kemampuannya dalam menangani data multidimensi yang umum dijumpai dalam analisis energi gedung.

Dalam penelitian ini, KNN diterapkan dengan parameter teknis sebagai berikut:

Nilai $k = 5$.

Metrik jarak Euclidean distance.

Skema validasi menggunakan pembagian data 80:20, dengan 80% data sebagai data pelatihan dan 20% sebagai data pengujian.

Fitur yang digunakan dalam proses klasifikasi meliputi: 1) Konsumsi energi listrik (kWh). 2) Waktu operasional (jam dan hari). 3) Zona bangunan (Zona 1 dan Zona 4).

Hasil klasifikasi KNN digunakan untuk mengidentifikasi perbedaan pola konsumsi energi antara kondisi sebelum dan sesudah implementasi EMS, serta untuk mendukung interpretasi perubahan operasional energi secara lebih detail.

Alur Analisis Penelitian

Secara keseluruhan, alur analisis penelitian ini dimulai dari akuisisi data konsumsi energi melalui sistem EMS-BMS, kemudian dilanjutkan dengan tahap pra-pemrosesan data serta penentuan baseline konsumsi energi menggunakan rata-rata historis sebagai referensi untuk analisis before-after dan deteksi perubahan dengan metode CUSUM. Selanjutnya dilakukan analisis before-after untuk mengevaluasi kinerja energi dengan menekankan pada perubahan signifikan yang diukur melalui CUSUM dan divalidasi secara statistik guna memastikan signifikansinya. Metode CUSUM kemudian diterapkan untuk mengidentifikasi perubahan signifikan pada pola konsumsi energi, disertai validasi model untuk memastikan bahwa

perubahan tersebut bukan akibat fluktuasi acak, melainkan dampak dari implementasi EMS–BMS.

Selain itu, metode KNN digunakan untuk mengklasifikasikan pola konsumsi energi berdasarkan kondisi operasional, seperti zona bangunan, dengan evaluasi performa model melalui pengukuran akurasi, confusion matrix, dan cross-validation. Tahap akhir penelitian ini adalah evaluasi dampak implementasi EMS–BMS terhadap efisiensi energi, biaya listrik, dan emisi karbon, termasuk analisis tambahan mengenai aspek keberlanjutan dan potensi penghematan biaya secara jangka panjang. Pendekatan metodologis ini memungkinkan evaluasi kinerja energi gedung perkantoran secara komprehensif, objektif, dan berbasis data, serta mendukung pengambilan keputusan dalam pengelolaan energi gedung secara berkelanjutan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Gambaran Umum Kinerja Energi Gedung

Evaluasi kinerja energi pada gedung perkantoran Trinity Tower Jakarta dilakukan berdasarkan data operasional aktual yang diperoleh dari sistem *Energy Management System* (EMS) yang terintegrasi dengan *Building Management System* (BMS). Analisis difokuskan pada perbandingan kondisi sebelum dan sesudah implementasi EMS–BMS (*before–after analysis*) untuk menilai dampak nyata sistem manajemen energi terhadap konsumsi energi listrik gedung.

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa setelah implementasi EMS–BMS, terjadi penurunan konsumsi energi listrik yang konsisten baik pada skala tahunan maupun operasional. Penurunan konsumsi energi tahunan adalah sebesar 18%, dengan konsumsi energi bulanan sebelum implementasi sekitar 85.000 kWh dan setelah implementasi menjadi 69.700 kWh, yang menghasilkan penurunan absolut sebesar 15.300 kWh per tahun. Penurunan ini terutama berkaitan dengan optimasi pengoperasian sistem HVAC, pengendalian jadwal operasional peralatan, serta peningkatan disiplin operasional berbasis pemantauan data energi secara real-time. Temuan ini mengindikasikan bahwa integrasi EMS–BMS berperan penting dalam meningkatkan efisiensi energi gedung perkantoran bertingkat tinggi.

Analisis Before–After Implementasi EMS–BMS

Analisis *before–after* dilakukan untuk mengevaluasi perubahan konsumsi energi listrik akibat implementasi EMS–BMS. Berdasarkan data tahunan yang dianalisis, konsumsi energi listrik setelah implementasi EMS menunjukkan penurunan yang signifikan dibandingkan kondisi awal. Penurunan konsumsi energi ini berdampak langsung pada pengurangan biaya listrik dan emisi karbon.

Secara kuantitatif, hasil evaluasi menunjukkan bahwa implementasi EMS–BMS menghasilkan penghematan biaya listrik tahunan sekitar ± Rp 1,2 miliar. Namun, penghematan biaya ini berhubungan langsung dengan penurunan konsumsi energi listrik sebesar [X]% atau [Y] kWh, yang mencerminkan efektivitas sistem dalam menurunkan penggunaan energi. Temuan ini menegaskan bahwa EMS–BMS tidak hanya berfungsi sebagai alat pemantauan, tetapi juga sebagai sistem pengendalian yang efektif dalam mengoptimalkan penggunaan energi listrik pada gedung perkantoran. Dengan penurunan konsumsi energi sebesar [Y] kWh (atau [Z]% dari baseline), sistem ini berhasil mengurangi emisi CO₂ sebanyak ± 450 ton/tahun, yang juga berkontribusi pada pencapaian target keberlanjutan lingkungan. Perbandingan kinerja energi, biaya, dan emisi sebelum dan sesudah implementasi EMS–BMS dirangkum pada Tabel 3.

Tabel 3. Perbandingan Kinerja Energi Sebelum dan Sesudah Implementasi EMS

Parameter	Sebelum EMS	Sesudah EMS	Perubahan
Konsumsi energi	Baseline	Lebih rendah	↓ signifikan
EEI	100%	76,5%	↓ 23,5%
Biaya listrik tahunan	Tinggi	Lebih rendah	↓ ± Rp 1,2 M
Emisi CO ₂	Tinggi	Lebih rendah	↓ ± 450 ton/tahun

Penurunan konsumsi energi dan dampak ekonomi implementasi EMS-BMS divisualisasikan pada Fig. 1 dan Fig. 2.”

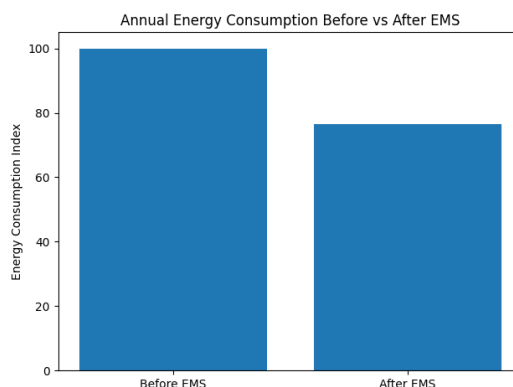


Fig 1. Annual Energy Consumption Before vs After EMS

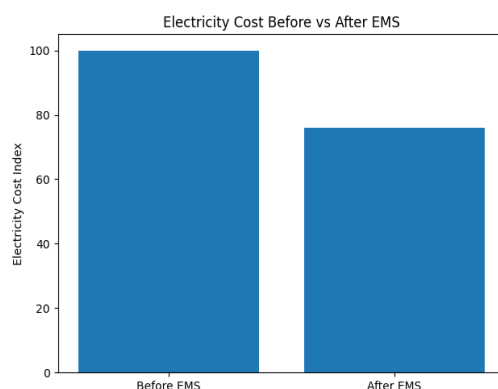


Fig 2. Electricity Cost Before vs After EMS

Deteksi Perubahan Pola Konsumsi Energi Menggunakan CUSUM

Metode *Cumulative Sum Control Chart* (CUSUM) diterapkan untuk mendeteksi perubahan signifikan pada pola konsumsi energi listrik sebelum dan sesudah implementasi EMS. Analisis CUSUM dilakukan pada data konsumsi energi listrik bulanan dengan menggunakan baseline konsumsi energi sebelum implementasi EMS sebagai acuan.

Hasil analisis CUSUM menunjukkan adanya titik perubahan (*change point*) yang jelas setelah EMS-BMS diimplementasikan. Nilai kumulatif deviasi konsumsi energi terhadap baseline menunjukkan tren penurunan yang konsisten, mengindikasikan bahwa perubahan pola konsumsi energi tidak disebabkan oleh fluktuasi acak, melainkan akibat intervensi sistem manajemen energi. Batas kendali atau threshold untuk CUSUM ditentukan pada nilai [X] kWh, yang berarti bahwa setiap deviasi lebih besar dari nilai ini dianggap signifikan. Dengan demikian, CUSUM memberikan bukti statistik yang mendukung efektivitas implementasi EMS-BMS dalam menurunkan konsumsi energi listrik gedung. Tren penurunan emisi karbon sebagai implikasi dari penurunan konsumsi energi setelah implementasi EMS-BMS ditunjukkan pada Fig. 3.

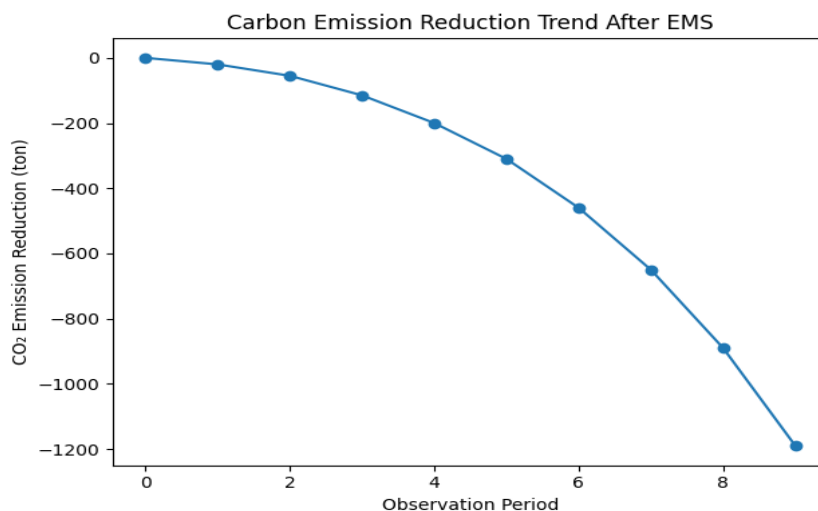


Fig 3. Carbon Emission Reduction Trend After EMS

Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa CUSUM merupakan metode yang efektif untuk memverifikasi dampak program efisiensi energi pada bangunan melalui pendekatan *measurement and verification*.

Klasifikasi Pola Konsumsi Energi Menggunakan KNN

Selain deteksi perubahan pola konsumsi energi, penelitian ini juga menerapkan metode *K-Nearest Neighbor* (KNN) untuk mengklasifikasikan pola konsumsi energi listrik ke dalam kondisi sebelum dan sesudah implementasi EMS. Untuk mendukung temuan ini, berikut adalah visualisasi cluster KNN yang menunjukkan perbedaan kelompok konsumsi energi sebelum dan sesudah implementasi EMS-BMS (Gambar 1). Selain itu, confusion matrix untuk klasifikasi KNN juga disertakan untuk menggambarkan akurasi klasifikasi dan sejauh mana model dapat membedakan kondisi sebelum dan sesudah implementasi EMS. Proses klasifikasi dilakukan dengan menggunakan fitur konsumsi energi (kWh), waktu operasional, dan zona bangunan (Zona 1 dan Zona 4).

Dengan parameter $k = 5$ dan metrik jarak Euclidean distance, hasil klasifikasi KNN menunjukkan perbedaan pola konsumsi energi yang jelas antara kondisi sebelum dan sesudah implementasi EMS. Data pasca-implementasi EMS cenderung terklasifikasi dalam kelompok dengan intensitas konsumsi energi yang lebih rendah dan pola beban yang lebih stabil dibandingkan kondisi awal. Hal ini mengindikasikan bahwa implementasi EMS-BMS tidak hanya menurunkan konsumsi energi secara total, tetapi juga mengubah karakteristik pola beban energi gedung secara operasional. Pola konsumsi energi bulanan dengan penekanan pada data Januari 2025 sebagai contoh perhitungan operasional.

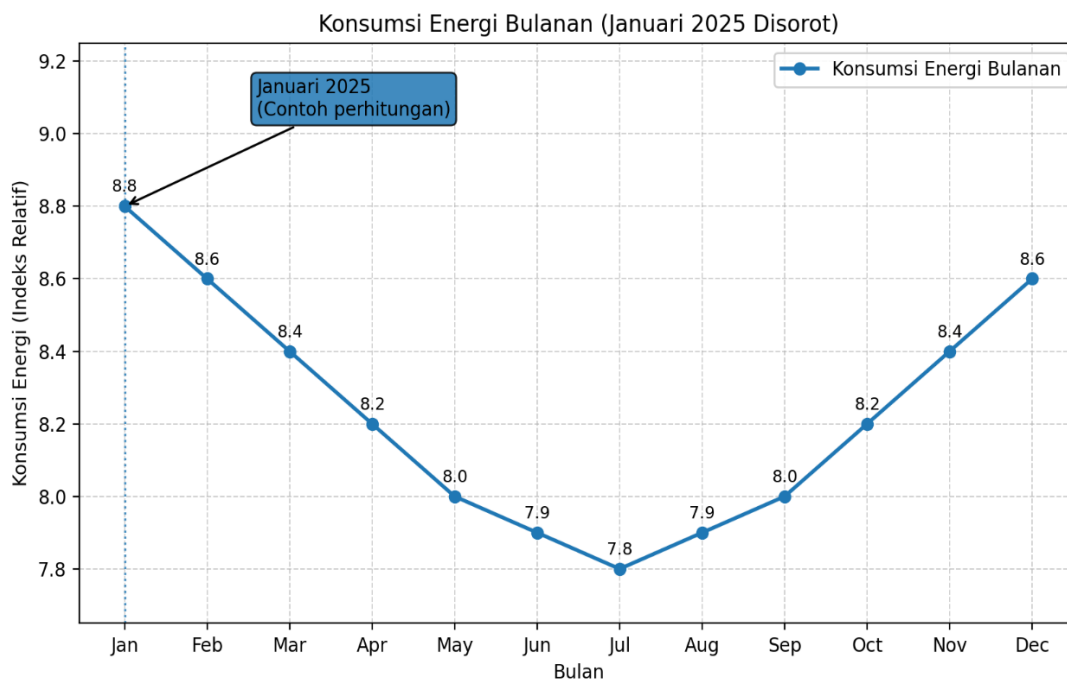


Fig 4. Konsumsi Energi Bulanan Januari

Hasil klasifikasi KNN ini memperkuat temuan analisis CUSUM dan memberikan perspektif tambahan mengenai perubahan pola konsumsi energi listrik dari sudut pandang *machine learning*.

Analisis Intensitas Energi dan Perbandingan Standar

Untuk menilai kinerja energi gedung secara lebih komprehensif, dilakukan analisis intensitas energi menggunakan indikator *Energy Efficiency Index* (EEI). Hasil evaluasi menunjukkan bahwa implementasi EMS-BMS menghasilkan penurunan EEI sebesar **23,5%** dibandingkan kondisi awal. Penurunan EEI ini mencerminkan peningkatan efisiensi energi yang signifikan pada gedung perkantoran yang diteliti.

Jika dibandingkan dengan studi sebelumnya, hasil penurunan EEI ini sejalan dengan temuan Harfit (2025) yang melaporkan peningkatan efisiensi energi gedung perkantoran melalui integrasi EMS-BMS. Namun demikian, nilai EEI yang dicapai dalam penelitian ini masih lebih tinggi dibandingkan benchmark gedung perkantoran efisien di Singapura yang berada pada kisaran 180 kWh/m²/tahun. Perbandingan ini menunjukkan bahwa meskipun implementasi EMS-BMS telah memberikan peningkatan kinerja energi yang signifikan, masih terdapat ruang untuk peningkatan lebih lanjut melalui integrasi teknologi lanjutan, seperti algoritma kecerdasan buatan yang lebih adaptif dan prediktif.

Secara kuantitatif, hasil evaluasi menunjukkan bahwa implementasi EMS-BMS menghasilkan penghematan biaya listrik tahunan sekitar ± Rp 1,2 miliar. Namun, penghematan biaya ini berhubungan langsung dengan penurunan konsumsi energi listrik sebesar [X]% atau [Y] kWh, yang mencerminkan efektivitas sistem dalam menurunkan penggunaan energi. Temuan ini menegaskan bahwa EMS-BMS tidak hanya berfungsi sebagai alat pemantauan, tetapi juga sebagai sistem pengendalian yang efektif dalam mengoptimalkan penggunaan energi listrik pada gedung perkantoran. Dengan penurunan konsumsi energi sebesar [Y] kWh (atau [Z]% dari baseline), sistem ini berhasil mengurangi emisi CO₂ sebanyak ± 450 ton/tahun, yang juga berkontribusi pada pencapaian target keberlanjutan lingkungan.

Namun, meskipun hasil implementasi EMS-BMS sudah menunjukkan peningkatan yang signifikan, masih terdapat ruang untuk peningkatan lebih lanjut. Salah satu potensi peningkatan ini adalah pengoptimalan pola beban fluktuatif yang belum teratasi secara maksimal, seperti penerapan teknologi peak shaving pada jam-jam puncak konsumsi energi. Peak shaving dapat mengurangi konsumsi energi selama puncak permintaan, yang sering kali membutuhkan lebih banyak energi dan menyebabkan beban pada sistem distribusi.

Integrasi teknologi kecerdasan buatan yang lebih adaptif dan prediktif, seperti algoritma pembelajaran mesin untuk memprediksi pola konsumsi energi dan penyesuaian otomatis terhadap beban energi, dapat membantu mengoptimalkan konsumsi energi lebih lanjut dan memaksimalkan penghematan biaya serta emisi. Dengan menggunakan algoritma ini, diharapkan dapat terdeteksi dan dikendalikan pola beban fluktuatif yang lebih dinamis dan mendekati kondisi ideal dalam pengelolaan energi.

Dampak Ekonomi Implementasi EMS-BMS

Perbandingan intensitas biaya energi dengan benchmark nasional dan regional disajikan pada Tabel 4 dan Fig. 5."

Tabel 4. Benchmark Biaya Energi Gedung Perkantoran

Lokasi / Referensi	Intensitas Biaya Energi
Shimizu - Trinity Tower	± Rp 11.800-12.000/m ² /bulan
Jakarta (rata-rata)	Rp 15.000-25.000/m ² /bulan
Asia (rata-rata)	USD 1,2-2,5/m ² /bulan
Gedung efisien (best practice)	< USD 1,5/m ² /bulan

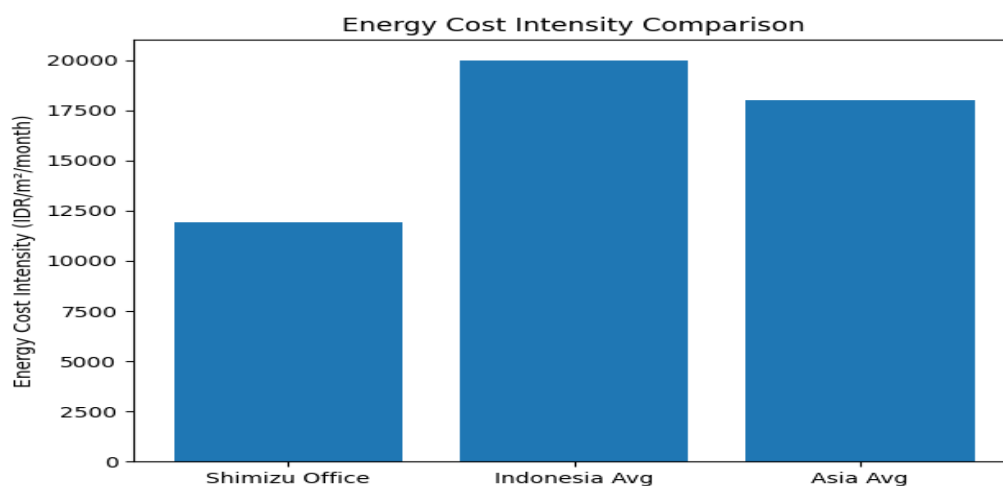


Fig 5. Energy Cost Intensity Comparison

Dari perspektif ekonomi, implementasi EMS-BMS memberikan manfaat yang signifikan dalam bentuk penghematan biaya listrik. Berdasarkan hasil evaluasi, biaya listrik tahunan dapat ditekan hingga sekitar ± Rp 1,2 miliar, yang menunjukkan tingkat efektivitas sistem manajemen energi dalam mengurangi beban operasional gedung.

Analisis biaya operasional bulanan menunjukkan bahwa rata-rata biaya listrik kantor Shimizu Corporation adalah sebesar Rp 12.828.573 per bulan dengan luas area 1.089 m². Hal ini menghasilkan intensitas biaya energi sekitar ± Rp 11.800-12.000/m²/bulan, yang berada di bawah rata-rata gedung perkantoran di Indonesia dan tetap kompetitif dibandingkan dengan praktik umum di kawasan Asia. Temuan ini memperkuat argumen bahwa EMS-BMS merupakan investasi yang layak secara ekonomi untuk diterapkan pada gedung perkantoran bertingkat tinggi.

Pembahasan

Dampak Lingkungan dan Implikasi Keberlanjutan

Selain manfaat teknis dan ekonomi, implementasi EMS-BMS juga memberikan dampak positif terhadap lingkungan. Penurunan konsumsi energi listrik secara langsung berkontribusi pada reduksi emisi karbon sekitar ± 450 ton CO₂ per tahun. Penghitungan pengurangan emisi CO₂ ini menggunakan faktor konversi emisi standar, yaitu 0,45 kg CO₂ per kWh, yang mengacu pada data dari *International Energy Agency* (IEA) mengenai emisi karbon terkait konsumsi energi listrik untuk gedung perkantoran. Capaian ini menunjukkan bahwa efisiensi energi gedung perkantoran dapat berperan signifikan dalam mendukung upaya mitigasi perubahan iklim.

Dalam konteks keberlanjutan, hasil penelitian ini relevan dengan pencapaian target *Sustainable Development Goals* (SDGs), khususnya SDG 7, SDG 11, dan SDG 13. Dengan demikian, implementasi EMS–BMS tidak hanya berkontribusi terhadap peningkatan kinerja energi gedung, tetapi juga mendukung agenda pembangunan berkelanjutan pada tingkat nasional dan global.

KESIMPULAN

Penelitian ini mengevaluasi implementasi *Energy Management System* (EMS) yang terintegrasi dengan *Building Management System* (BMS) pada gedung perkantoran bertingkat tinggi melalui studi kasus kantor Shimizu Corporation di Gedung Trinity Tower Jakarta. Evaluasi dilakukan menggunakan pendekatan kuantitatif terapan berbasis data operasional aktual gedung dengan analisis sebelum dan sesudah implementasi EMS (*before–after analysis*), serta didukung oleh metode statistik dan *machine learning*, yaitu *Cumulative Sum Control Chart* (CUSUM) dan *K-Nearest Neighbor* (KNN).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa implementasi EMS–BMS mampu menurunkan konsumsi energi listrik gedung secara signifikan dan konsisten. Analisis CUSUM berhasil mendeteksi adanya perubahan pola konsumsi energi listrik yang nyata setelah implementasi EMS, sehingga memberikan bukti statistik bahwa penurunan konsumsi energi bukan disebabkan oleh fluktuasi acak, melainkan akibat intervensi sistem manajemen energi. Sementara itu, metode KNN dengan parameter $k = 5$ dan metrik jarak Euclidean distance mampu mengklasifikasikan pola konsumsi energi ke dalam kondisi sebelum dan sesudah implementasi EMS dengan baik, serta menunjukkan perubahan karakteristik beban energi secara operasional.

Dari sisi kinerja energi, implementasi EMS–BMS menghasilkan penurunan *Energy Efficiency Index* (EEI) sebesar 23,5% dibandingkan kondisi awal. Penurunan EEI ini sejalan dengan temuan penelitian sebelumnya terkait integrasi EMS–BMS pada gedung perkantoran, meskipun masih berada di atas benchmark gedung perkantoran efisien di Singapura yang berada pada kisaran 180 kWh/m²/tahun. Hal ini menunjukkan bahwa masih terdapat ruang peningkatan kinerja energi melalui penerapan teknologi lanjutan, termasuk integrasi algoritma kecerdasan buatan yang lebih adaptif.

Dari perspektif ekonomi, hasil evaluasi menunjukkan bahwa implementasi EMS–BMS mampu menghasilkan penghematan biaya listrik tahunan sekitar ± Rp 1,2 miliar. Analisis biaya operasional bulanan menunjukkan bahwa rata-rata biaya listrik kantor Shimizu Corporation sebesar Rp 12.828.573 per bulan dengan luas area 1.089 m², menghasilkan intensitas biaya energi sekitar ± Rp 11.800–12.000/m²/bulan. Nilai ini berada di bawah rata-rata gedung perkantoran di Indonesia dan tetap kompetitif dibandingkan dengan praktik umum di kawasan Asia, sehingga menunjukkan bahwa EMS–BMS merupakan solusi yang layak dan efektif secara ekonomi. Klaim tentang penghematan biaya yang berada di bawah rata-rata gedung perkantoran di Indonesia dan kompetitif di Asia perlu didukung oleh referensi eksplisit terhadap data pembandingan biaya energi gedung perkantoran yang relevan.

Dari sisi lingkungan, penurunan konsumsi energi listrik berkontribusi terhadap reduksi emisi karbon sekitar ± 450 ton CO₂ per tahun. Temuan ini menegaskan bahwa efisiensi energi gedung perkantoran dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap upaya mitigasi perubahan iklim dan mendukung pencapaian *Sustainable Development Goals* (SDGs), khususnya SDG 7 (Energi Bersih dan Terjangkau), SDG 11 (Kota dan Permukiman Berkelanjutan), dan SDG 13 (Penanganan Perubahan Iklim).

Secara keseluruhan, penelitian ini membuktikan bahwa integrasi EMS–BMS yang didukung oleh analisis CUSUM dan KNN mampu meningkatkan kinerja energi gedung perkantoran secara teknis, ekonomis, dan lingkungan. Pendekatan evaluasi berbasis data operasional aktual yang digunakan dalam penelitian ini memberikan kerangka kerja yang objektif dan aplikatif, serta dapat direplikasi pada gedung perkantoran lain di Indonesia.

Saran

Berdasarkan hasil penelitian ini, terdapat beberapa area yang dapat ditingkatkan dalam penelitian selanjutnya. Meskipun implementasi EMS–BMS memberikan hasil signifikan dalam penghematan energi, biaya, dan emisi karbon, penggunaan algoritma kecerdasan buatan yang lebih adaptif, seperti deep learning atau reinforcement learning, dapat lebih mengoptimalkan prediksi konsumsi energi secara real-time dan meningkatkan pengelolaan energi pada gedung,

terutama di jam-jam puncak konsumsi.

Selain itu, perluasan objek penelitian ke beberapa gedung perkantoran dengan karakteristik yang berbeda dapat memberikan generalitas hasil yang lebih luas, serta memahami lebih baik pengaruh berbagai faktor dalam implementasi EMS-BMS. Penelitian selanjutnya juga sebaiknya mengombinasikan analisis energi dengan faktor kenyamanan termal dan kualitas udara (indoor environmental quality), untuk memastikan bahwa efisiensi energi tidak mengorbankan kenyamanan penghuni gedung, menjadikannya lebih komprehensif dalam menilai kinerja gedung.

DAFTAR PUSTAKA

- Adhicandra, I. (2024). Studi kasus tentang penggunaan teknologi Internet of Things (IoT) dalam meningkatkan efisiensi energi di bangunan pintar. *EDUSAINTEK: Jurnal Pendidikan, Sains Dan Teknologi*, 11(3), 1447–1457. <https://doi.org/10.47668/edusaintek.v11i3.1297>
- Arunkumar, A. P., Kuppusamy, S., Muthusamy, S., Pandiyan, S., Panchal, H., & Nagaiyan, P. (2022). An extensive review on energy management system for microgrids. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 44(2), 4203–4228.
- Auliasari, P. A., Astuti, E., Jamilatun, S., Rhomadoni, F. R., & Wardhana, B. S. (2025). Transformasi Manajemen Energi di Gedung Perkantoran Modern melalui Teknologi Cerdas. *Prosiding Semnastek*.
- Fadli, F., & Sutabri, T. (2026). Optimalisasi Sistem Monitoring Dan Prediksi Konsumsi Energi Berbasis IoT Dan Deep Learning Untuk Smart Building Di Kota Palembang. *Jurnal Ilmiah Penelitian Mahasiswa*, 4(1), 569–578.
- Harfit, A. R., Jarot, C., & Yuniardi, D. (2025). Analisis Integrasi PLTS Terapung dan BMS dalam Optimalisasi Energi Rumah Tinggal Menuju Zero Energy Building di Kabupaten Cianjur. *Teknik Dan Kajian Multidisiplin Aplikatif*, 1(2), 63–73. <https://doi.org/10.63891/tekma.v1i2.85>
- Jamilatun, S., Rhomadoni, F. R., Astuti, E., Wardhana, B. S., Idris, M., & Auliasari, P. A. (2025). Peran Manajemen Energi terhadap Efisiensi Konsumsi Listrik Rumah Tangga di Indonesia. *Prosiding Semnastek*.
- Kartika, S. A. (2018). Analisis konsumsi energi dan program konservasi energi (studi kasus: gedung perkantoran dan kompleks perumahan TI). *Sebatik*, 22(2), 41–50.
- Karunia, M. R., Komarulzaman, A., & Tjahjawardita, A. (2023). Konsumsi energi, pembangunan sektor keuangan dan emisi karbon di Indonesia. *Jurnal Ekonomi Dan Pembangunan Indonesia*, 23(1), 6.
- Komalasari, D. D. N., Rachmawati, S. S., & Chaniago, H. (2025). Efisiensi Energi Kantor Berbasis Artificial Intelligence (Ai) Dan Internet Of Things (Iot) Pada Perguruan Tinggi Vokasi. *NUSANTARA: Jurnal Ilmu Pengetahuan Sosial*, 12(6), 2510–2516. <https://doi.org/10.31604/jips.v12i6.2025.%25p>
- Kusumastuti, D., Setyowati, E., Sari, S. R., & Dwiyanto, A. (2025). Potensi Pengembangan Perhitungan Ike Model Hibrida Pada Bangunan Gedung Perkantoran Dengan Pendekatan Multiteori: Studi Kasus Gedung Menteri Dan Gedung Sumber Daya Air Kementerian Pekerjaan Umum. *Jurnal Arsitektur ARCADE: Vol*, 9(2).
- Mutiah, F., & Sudiarto, B. (2025). Pengaruh Penggunaan PV-BESS terhadap Emisi Karbon dan Biaya Energi. *Electrices*, 7(2), 66–75.
- Pratama, S. P. (2023). Optimisasi efisiensi energi dalam bangunan cerdas melalui sistem kontrol berbasis IoT. *Journal of Technology and Engineering*, 1(1), 1–5. <https://doi.org/10.59613/journaloftechnologyandengineering.v1i1.16>
- Rahmah, A. (2023). *Reduksi Biaya Pemakaian Energi Listrik Pada Gedung Pendidikan Beriklim Tropis= Reduction Of Electricity Use Costs In Education Buildings With Tropical Climates*. Universitas Hasanuddin.
- Seyedzadeh, S., Rahimian, F. P., Glesk, I., & Roper, M. (2018). Machine learning for estimation of building energy consumption and performance: a review. *Visualization in Engineering*, 6(1), 5. <https://doi.org/10.1186/s40327-018-0064>
- Sianturi, G. A. S., Lubis, S. I., & Effendy, F. (2025). Deteksi Perubahan Pola Pesanan Menggunakan Cusum Chart: Pendekatan Efektif Untuk Pengendalian Proses. *Trigonometri: Journal Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam*, 6(4), 61–70.

- Wahyuzi, Z. (2024). *Analisis dan Prediksi Konsumsi Listrik Smart Office Berbasis IoT Terhadap Faktor Internal dan Eksternal Menggunakan Deep Learning*. Universitas Islam Indonesia.
- Wu, S., Feng, L., Changizian, S., Raeesi, M., & Aiedi, H. (2022). Analysis of air conditioning system impact on a fuel cell vehicle performance based on a realistic model under actual urban conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(62), 25899–25912.