

Analisis Efisiensi Energi pada Bangunan Hijau dengan Teknologi Terbaru

Reja Putra Jaya*¹, Angga Setyadi Tommy², Greget Widhiati³, Widya Ariyani⁴
^{1,2,3}, Universitas Sains dan Teknologi Komputer, Kota Semarang, Jawa Tengah, Indonesia
 *Corresponding Author

Abstract

The implementation of smart HVAC systems integrated with IoT sensors has emerged as a transformative approach to enhancing energy efficiency in green buildings. This study evaluates the impact of real-time environmental monitoring and adaptive energy management using IoT-based smart HVAC systems. Experimental results demonstrate a significant reduction in energy consumption, averaging 27.3%, while maintaining optimal indoor temperature and humidity stability. The predictive model, leveraging reinforcement learning, achieves an accuracy rate with an error margin of less than 1.2%, ensuring precise energy optimization. Compared to conventional energy management systems, the proposed approach offers a more responsive and adaptive solution to real-time environmental variations. Despite its potential, challenges such as high initial investment costs and industry reluctance toward adopting new technologies persist. This study underscores the necessity of policy incentives and regulatory frameworks to accelerate the adoption of smart energy solutions in green buildings. Future research should explore long-term performance across different climatic conditions and integrate renewable energy sources to further enhance sustainability.

Keywords: Smart HVAC, IoT-based energy optimization, green buildings

I. INTRODUCTION

Pembangunan berkelanjutan menjadi salah satu strategi utama dalam upaya mitigasi perubahan iklim global. Sektor bangunan merupakan salah satu penyumbang terbesar konsumsi energi dunia, dengan kontribusi sekitar 40% terhadap total konsumsi energi global dan hampir 30% terhadap emisi karbon dioksida (Abbass et al., 2022). Dengan meningkatnya permintaan energi di sektor ini, diperlukan inovasi teknologi yang dapat mengoptimalkan penggunaan energi tanpa mengorbankan kenyamanan penghuni. Salah satu pendekatan yang semakin mendapat perhatian adalah konsep bangunan hijau, yang dirancang untuk mengurangi konsumsi energi dan meningkatkan efisiensi melalui penerapan teknologi terbaru (Cifuentes-Faura, 2022).

Bangunan hijau memanfaatkan berbagai teknologi untuk mengoptimalkan penggunaan energi, seperti sistem HVAC hemat energi, integrasi energi terbarukan, serta sistem manajemen energi berbasis Internet of Things (IoT) (Mishra & Singh, 2023). Dengan adanya teknologi ini, sistem

bangunan dapat secara otomatis menyesuaikan penggunaan energi berdasarkan kondisi lingkungan dan kebutuhan penghuni. Peran sistem HVAC menjadi sangat krusial dalam pengelolaan energi bangunan karena bertanggung jawab atas lebih dari 50% konsumsi energi dalam sistem bangunan modern (Kamal et al., 2023). Oleh karena itu, inovasi dalam sistem HVAC berbasis IoT menjadi salah satu solusi utama dalam peningkatan efisiensi energi dan keberlanjutan bangunan.

Dalam beberapa tahun terakhir, perkembangan teknologi telah memungkinkan peningkatan efisiensi energi dengan pendekatan berbasis IoT dan kecerdasan buatan (AI). Penerapan sensor IoT dalam sistem HVAC memungkinkan pemantauan kondisi lingkungan secara real-time, yang memungkinkan sistem untuk menyesuaikan ventilasi, pendinginan, dan pencahayaan secara otomatis (Shah et al., 2022). AI, khususnya machine learning dan reinforcement learning, telah diterapkan untuk mengoptimalkan konsumsi energi dengan menganalisis pola penggunaan energi dan memberikan strategi pengelolaan yang lebih adaptif. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa penerapan teknologi pintar dalam sistem HVAC dapat mengurangi konsumsi energi hingga 30% dibandingkan dengan metode konvensional (Poyyamozi et al., 2024).

Fenomena saat ini menunjukkan bahwa adopsi teknologi canggih dalam efisiensi energi bangunan hijau semakin meningkat. Faktor utama yang mendorong perkembangan ini adalah kebijakan pemerintah yang mendukung keberlanjutan, meningkatnya kesadaran akan konservasi energi, serta perkembangan teknologi yang semakin terjangkau (Akram et al., 2022). Namun, meskipun berbagai penelitian telah membahas manfaat dari teknologi pintar dalam efisiensi energi bangunan hijau, masih terdapat beberapa tantangan dalam implementasinya (Qin et al., 2022).

Salah satu tantangan utama adalah biaya investasi awal yang tinggi, yang sering kali menjadi penghambat bagi pengembang dan pemilik bangunan dalam mengadopsi sistem HVAC berbasis IoT. Selain itu, resistensi terhadap teknologi baru masih cukup tinggi, terutama dalam sektor properti yang belum sepenuhnya memahami manfaat jangka panjang dari integrasi IoT dan AI dalam pengelolaan energi (El-Afifi et al., 2024). Keamanan data juga menjadi isu penting dalam penerapan sistem berbasis IoT, mengingat sistem ini mengandalkan jaringan komunikasi yang rentan terhadap serangan siber (Hassanain et al., 2024). Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengeksplorasi bagaimana penerapan teknologi ini dapat dioptimalkan dengan mempertimbangkan faktor ekonomi, teknis, dan keamanan.

Berbagai studi telah mengkaji penerapan teknologi IoT dan AI dalam sistem HVAC untuk meningkatkan efisiensi energi. Penelitian sebelumnya banyak berfokus pada penerapan IoT

dalam pemantauan energi atau pengembangan sistem AI untuk optimasi HVAC secara independen. Namun, masih terdapat kesenjangan penelitian dalam bagaimana integrasi IoT dan AI dapat dikombinasikan secara efektif untuk menciptakan sistem yang lebih adaptif dan efisien dalam pengelolaan energi bangunan hijau. Sebagian besar studi masih berfokus pada penerapan teknologi secara individu tanpa mempertimbangkan bagaimana integrasi berbagai teknologi dalam satu sistem yang saling berhubungan dapat menghasilkan peningkatan efisiensi yang lebih signifikan.

Selain itu, sebagian besar penelitian terdahulu lebih menitikberatkan pada aspek teknis tanpa membahas faktor ekonomi dan sosial yang mempengaruhi keberhasilan implementasi teknologi ini di berbagai wilayah. Studi-studi sebelumnya juga masih jarang membahas bagaimana integrasi antara IoT dan algoritma reinforcement learning dapat meningkatkan responsivitas sistem HVAC terhadap perubahan kondisi lingkungan secara real-time. Dengan semakin berkembangnya teknologi AI, sistem HVAC tidak hanya dapat mengoptimalkan konsumsi energi berdasarkan data historis, tetapi juga dapat beradaptasi dengan kondisi yang berubah secara dinamis, sesuatu yang belum banyak dijelajahi dalam penelitian sebelumnya.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji penerapan teknologi canggih, seperti sensor IoT dan sistem HVAC pintar berbasis reinforcement learning, dalam meningkatkan efisiensi energi bangunan hijau secara real-time. Studi ini akan mengeksplorasi bagaimana sistem berbasis IoT dapat memberikan respons adaptif terhadap perubahan kondisi lingkungan dalam bangunan, serta bagaimana integrasi dengan AI dapat menghasilkan strategi penghematan energi yang lebih optimal. Dengan menggunakan pendekatan eksperimen, penelitian ini akan mengimplementasikan sistem HVAC pintar berbasis IoT yang terhubung dengan sensor lingkungan untuk mengumpulkan data real-time. Data yang dikumpulkan akan dianalisis menggunakan algoritma reinforcement learning untuk mengoptimalkan strategi pengelolaan energi berdasarkan pola konsumsi energi yang terdeteksi.

Penelitian ini juga bertujuan untuk mengidentifikasi tantangan utama dalam implementasi teknologi HVAC pintar berbasis IoT dan AI. Beberapa aspek yang akan dikaji meliputi biaya investasi, resistensi terhadap teknologi baru, serta faktor keamanan data. Dengan memahami tantangan ini, penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi bagi pengembang dan pemangku kebijakan guna meningkatkan adopsi teknologi efisiensi energi di masa depan. Selain itu, hasil penelitian ini akan memberikan wawasan baru mengenai bagaimana sistem HVAC berbasis IoT dan AI dapat diterapkan dalam berbagai jenis bangunan dengan kondisi lingkungan yang berbeda.

Kontribusi utama dari penelitian ini adalah memberikan pendekatan berbasis data real-time dalam optimalisasi energi bangunan hijau yang lebih adaptif dan responsif terhadap perubahan lingkungan. Studi ini juga berupaya untuk mengisi kesenjangan dalam literatur terkait dengan bagaimana integrasi antara IoT dan reinforcement learning dapat menghasilkan strategi efisiensi energi yang lebih presisi. Dengan pendekatan berbasis eksperimen dan analisis kuantitatif, penelitian ini menawarkan solusi inovatif yang tidak hanya mengandalkan pendekatan berbasis aturan tetap, tetapi juga memanfaatkan pembelajaran adaptif untuk menyesuaikan strategi efisiensi energi dalam berbagai kondisi operasional.

Selain memberikan kontribusi akademik, penelitian ini juga memiliki implikasi praktis bagi industri konstruksi dan manajemen bangunan. Dengan meningkatnya regulasi terkait efisiensi energi dan keberlanjutan, pengembang properti dan pemilik bangunan semakin terdorong untuk mengadopsi solusi pintar dalam pengelolaan energi. Studi ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi industri dalam mengembangkan strategi yang lebih efektif untuk implementasi sistem HVAC berbasis IoT dan AI. Selain itu, hasil penelitian ini juga dapat menjadi dasar bagi pembuat kebijakan dalam merancang insentif dan regulasi yang mendukung adopsi teknologi efisiensi energi di sektor properti.

II. LITERATURE REVIEW

A. Konsep Bangunan Hijau dan Efisiensi Energi

Bangunan hijau merupakan salah satu inovasi dalam bidang konstruksi yang bertujuan untuk meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi dampak lingkungan. Konsep ini berfokus pada penggunaan teknologi dan material yang dapat mengoptimalkan sumber daya energi, air, serta mengurangi limbah dan emisi karbon (Drago & Gatto, 2022). Menurut (Liu et al., 2022), sektor bangunan menyumbang sekitar 40% dari total konsumsi energi global dan hampir 30% dari emisi karbon dioksida. Dengan meningkatnya kesadaran akan pentingnya mitigasi perubahan iklim, pengembangan bangunan hijau menjadi prioritas dalam strategi keberlanjutan global.

Teknologi yang diterapkan dalam bangunan hijau meliputi sistem HVAC hemat energi, pemanfaatan energi terbarukan seperti panel surya, serta sistem pencahayaan otomatis berbasis Internet of Things (IoT) (Meng & Qu, 2022). Penelitian oleh (Sharma & Kumar Sharma, 2022) menunjukkan bahwa penggunaan teknologi pintar dalam bangunan hijau dapat mengurangi konsumsi energi hingga 35% dibandingkan dengan metode konvensional. Efisiensi energi dalam bangunan hijau juga dipengaruhi oleh desain arsitektural, bahan bangunan yang memiliki sifat isolasi termal tinggi, serta sistem ventilasi alami yang dirancang untuk mengurangi ketergantungan pada pendingin udara buatan (Jaysawal et al., 2022).

Beberapa standar internasional telah dikembangkan untuk menilai keberlanjutan dan efisiensi energi dalam bangunan hijau, seperti Leadership in Energy and Environmental Design (LEED) dan Building Research Establishment Environmental Assessment Method (BREEAM) (Debrah et al., 2022). Studi oleh (González-Torres et al., 2022) menyoroti bahwa standar ini tidak hanya mengukur konsumsi energi, tetapi juga mencakup efisiensi penggunaan air, material bangunan, serta dampak terhadap lingkungan sekitar. Dalam konteks ini, penerapan sistem pengelolaan energi berbasis IoT menjadi salah satu pendekatan yang semakin mendapat perhatian dalam penelitian dan implementasi bangunan hijau.

B. Penerapan Teknologi IoT dalam Efisiensi Energi Bangunan Hijau

IoT menjadi salah satu solusi utama dalam optimalisasi efisiensi energi bangunan hijau dengan menyediakan data real-time untuk pemantauan dan pengelolaan energi. Sensor IoT yang tertanam di berbagai titik dalam bangunan memungkinkan pemantauan konsumsi energi, suhu, kelembaban, dan pencahayaan secara otomatis. Data yang dikumpulkan kemudian dianalisis oleh kecerdasan buatan (AI) untuk menyesuaikan sistem HVAC dan pencahayaan berdasarkan kebutuhan aktual penghuni (Katal et al., 2023).

Studi oleh (Karamoozian & Zhang, 2023) menunjukkan bahwa penerapan IoT dalam manajemen energi bangunan hijau mampu mengurangi konsumsi energi hingga 30% dengan cara menyesuaikan penggunaan sistem pendingin dan pemanas secara adaptif terhadap kondisi lingkungan. Sistem HVAC berbasis IoT memungkinkan penyesuaian otomatis terhadap perubahan suhu dan jumlah penghuni dalam ruangan, sehingga konsumsi energi dapat diminimalkan tanpa mengorbankan kenyamanan (Bortolini et al., 2022).

Meskipun potensi teknologi IoT dalam meningkatkan efisiensi energi sangat besar, terdapat tantangan dalam implementasinya. (Bungau et al., 2022) menyebutkan bahwa kendala utama dalam penerapan sistem ini adalah biaya awal investasi yang tinggi, kebutuhan akan infrastruktur jaringan yang andal, serta kekhawatiran terhadap keamanan data. Selain itu, resistensi dari pengelola bangunan terhadap adopsi teknologi baru juga menjadi hambatan dalam implementasi IoT untuk pengelolaan energi yang lebih cerdas dan efisien (Shehata et al., 2022).

C. Integrasi AI dan Machine Learning dalam Optimalisasi Penggunaan Energi

Penerapan kecerdasan buatan (AI) dalam sistem manajemen energi memungkinkan analisis prediktif dan otomatisasi yang lebih efisien dibandingkan dengan pendekatan berbasis aturan (rule-based). Salah satu pendekatan yang semakin banyak digunakan adalah reinforcement

learning, yang memungkinkan sistem untuk belajar dan menyesuaikan strategi optimasi energi berdasarkan pola konsumsi historis dan kondisi lingkungan secara real-time (Alabi et al., 2022).

Studi oleh (Singh et al., 2024) menunjukkan bahwa sistem HVAC yang dikendalikan oleh AI dapat mengurangi konsumsi energi hingga 30% dibandingkan dengan sistem konvensional yang tidak memiliki kecerdasan adaptif. Sistem ini menggunakan algoritma pembelajaran mesin untuk mendeteksi pola penggunaan energi yang tidak efisien dan memberikan rekomendasi optimalisasi secara otomatis. Dalam penelitian ini, algoritma yang digunakan mencakup pendekatan Deep Q-Network (DQN) dan Proximal Policy Optimization (PPO) yang diterapkan dalam pengelolaan HVAC berbasis IoT.

Beberapa studi sebelumnya telah mengeksplorasi perbandingan antara berbagai metode optimasi energi berbasis AI. (Njema et al., 2024) menemukan bahwa sistem berbasis rule-based optimization memiliki akurasi prediksi konsumsi energi sekitar 80%, sementara metode berbasis reinforcement learning dapat meningkatkan akurasi hingga 95%. Hal ini menunjukkan bahwa sistem berbasis AI mampu menyesuaikan operasional HVAC dengan lebih presisi dan efisien dibandingkan dengan metode berbasis aturan tetap.

Meskipun AI menawarkan solusi yang lebih canggih dalam pengelolaan energi, terdapat beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan. Studi oleh (Koengkan et al., 2023) mengidentifikasi bahwa salah satu tantangan utama dalam implementasi AI pada sistem HVAC adalah kebutuhan akan dataset yang besar dan berkualitas tinggi. Selain itu, pelatihan model AI memerlukan komputasi yang tinggi, yang dapat meningkatkan konsumsi energi di pusat data. Oleh karena itu, pengembangan teknologi edge computing telah mulai diterapkan untuk mengurangi beban komputasi pada server pusat dengan melakukan pemrosesan data langsung di perangkat IoT (Tosin Michael Olatunde et al., 2024).

D. Tantangan Implementasi Teknologi Smart HVAC dalam Bangunan Hijau

Meskipun teknologi Smart HVAC berbasis IoT dan AI menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam efisiensi energi, masih terdapat beberapa tantangan dalam implementasinya. Salah satu kendala utama adalah biaya awal investasi yang tinggi, terutama untuk pengadaan perangkat IoT, sensor pintar, dan infrastruktur jaringan. (Bertoldi, 2022) menyatakan bahwa tanpa adanya insentif finansial dari pemerintah atau kebijakan yang mendukung, adopsi teknologi ini masih berjalan lambat di banyak negara berkembang.

Selain biaya, aspek regulasi dan kebijakan juga menjadi faktor yang mempengaruhi keberhasilan implementasi teknologi ini. Di beberapa negara seperti Jerman dan Jepang, pemerintah telah menerapkan skema insentif pajak untuk mendorong penggunaan teknologi

hemat energi dalam sektor properti (Constance Obiuto et al., 2024). Studi oleh (Syahirah et al., 2022) menunjukkan bahwa adanya insentif finansial dapat meningkatkan tingkat adopsi Smart HVAC hingga 40% lebih tinggi dibandingkan dengan negara yang tidak memiliki dukungan kebijakan serupa.

Selain faktor ekonomi dan regulasi, keamanan data juga menjadi isu krusial dalam penerapan IoT untuk pengelolaan energi. (Lv & Shang, 2023) menyoroti bahwa risiko serangan siber terhadap sistem IoT dalam bangunan hijau dapat menyebabkan gangguan operasional yang serius. Oleh karena itu, diperlukan sistem keamanan yang lebih ketat, termasuk enkripsi data, firewall adaptif, serta deteksi anomali berbasis AI untuk mencegah akses tidak sah terhadap sistem HVAC pintar (Kim et al., 2022).

E. Research Gap dan Kontribusi Penelitian

Meskipun berbagai studi telah mengeksplorasi penerapan IoT dan AI dalam efisiensi energi bangunan hijau, terdapat beberapa aspek yang masih belum banyak dikaji. Sebagian besar penelitian sebelumnya lebih berfokus pada penerapan teknologi secara individu tanpa mempertimbangkan integrasi IoT, AI, dan sistem HVAC dalam satu kesatuan yang adaptif terhadap perubahan lingkungan secara real-time. Selain itu, masih sedikit penelitian yang membahas bagaimana kombinasi teknologi ini dapat diterapkan secara efisien dalam skala luas dengan mempertimbangkan faktor ekonomi, regulasi, dan keamanan data.

Penelitian ini berkontribusi dalam mengisi gap tersebut dengan mengembangkan sistem HVAC berbasis IoT yang menggunakan reinforcement learning untuk optimalisasi energi secara adaptif. Selain itu, penelitian ini juga mengeksplorasi tantangan implementasi, termasuk aspek biaya, regulasi, dan keamanan, yang jarang dibahas dalam penelitian sebelumnya. Dengan pendekatan berbasis data real-time dan integrasi AI, penelitian ini menawarkan solusi inovatif dalam pengelolaan energi bangunan hijau yang lebih efisien dan berkelanjutan.

III. RESEARCH METHOD(S)

A. Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode eksperimen untuk mengevaluasi efektivitas sistem HVAC pintar berbasis sensor IoT dalam meningkatkan efisiensi energi pada bangunan hijau secara real-time. Pemilihan metode eksperimen didasarkan pada kebutuhan untuk mengukur dampak langsung dari penerapan sistem berbasis IoT terhadap konsumsi energi, dibandingkan dengan pendekatan simulasi atau studi kasus yang hanya memberikan estimasi teoretis.

Sistem HVAC yang dikembangkan menggunakan algoritma reinforcement learning untuk menyesuaikan operasional pendinginan dan ventilasi secara otomatis berdasarkan data lingkungan yang dikumpulkan oleh sensor IoT. Pemilihan metode reinforcement learning dibandingkan dengan pendekatan berbasis rule-based atau prediktif konvensional didasarkan pada kemampuannya untuk terus belajar dari pola konsumsi energi historis dan merespons perubahan kondisi lingkungan dengan lebih adaptif.

B. Pengumpulan Data dan Lokasi Penelitian

Eksperimen dilakukan di sebuah bangunan hijau berukuran 1.200 m² yang telah dilengkapi dengan sistem efisiensi energi dasar, memungkinkan integrasi sensor IoT dan sistem HVAC pintar. Pemilihan lokasi ini dilakukan berdasarkan kesiapan infrastruktur dan dukungan dari pengelola bangunan dalam menerapkan sistem berbasis IoT untuk pengelolaan energi. Bangunan ini memiliki konsumsi energi rata-rata 12,1 kWh/m² sebelum penerapan sistem HVAC pintar, dengan sistem ventilasi dan pendinginan konvensional yang masih berbasis pengaturan manual.

Data dikumpulkan dari berbagai sensor IoT yang ditempatkan di beberapa titik strategis dalam bangunan untuk memantau parameter lingkungan seperti suhu, kelembaban, pencahayaan, dan konsumsi daya listrik. Sensor suhu dan kelembaban menggunakan modul DHT22, sementara pencatatan konsumsi energi dilakukan dengan meteran listrik digital yang dikalibrasi. Data dikumpulkan setiap lima menit selama periode tiga bulan dan dikirim secara real-time ke server pusat menggunakan protokol komunikasi MQTT.

Sebelum analisis, data yang diperoleh melalui sensor IoT diproses untuk menghilangkan anomali atau penyimpangan ekstrem. Penghapusan outlier dilakukan dengan metode interquartile range (IQR) untuk memastikan bahwa data yang dianalisis mewakili kondisi operasional sebenarnya. Selain itu, dilakukan interpolasi linier untuk mengatasi data yang hilang akibat gangguan jaringan atau kegagalan sensor.

C. Implementasi Sistem IoT dan HVAC Pintar

Sistem IoT yang diterapkan dalam penelitian ini terdiri dari sensor lingkungan yang terhubung ke edge computing berbasis Raspberry Pi, yang bertugas mengolah data sebelum dikirimkan ke sistem pengelolaan energi di cloud. Sistem ini menggunakan algoritma PPO (Proximal Policy Optimization) dalam reinforcement learning, yang dipilih karena kemampuannya dalam menyesuaikan parameter operasional HVAC secara dinamis dengan learning rate sebesar 0.0003 dan discount factor sebesar 0.99.

Sistem HVAC pintar ini mengatur operasional pendinginan dan ventilasi berdasarkan pola konsumsi energi dan kebutuhan termal ruangan. Jika sensor mendeteksi peningkatan suhu atau kelembaban yang tidak sesuai dengan standar kenyamanan, sistem akan secara otomatis menyesuaikan tingkat pendinginan atau ventilasi tanpa perlu intervensi manual. Data real-time yang dikumpulkan dari berbagai sensor dianalisis menggunakan model pembelajaran mesin untuk memberikan rekomendasi optimalisasi energi yang lebih akurat dibandingkan metode berbasis aturan statis.

D. Metode Evaluasi dan Validasi

Evaluasi efektivitas sistem HVAC pintar dilakukan dengan membandingkan konsumsi energi sebelum dan sesudah implementasi sistem berbasis IoT. Data dikumpulkan selama periode tiga bulan dan dianalisis menggunakan metode statistik untuk menilai signifikansi perubahan yang terjadi.

Analisis statistik menggunakan paired t-test dilakukan untuk menguji perbedaan rata-rata konsumsi energi sebelum dan setelah implementasi sistem. Model regresi linier diterapkan untuk mengevaluasi hubungan antara variabel lingkungan seperti suhu dan kelembaban dengan pola konsumsi energi yang dikendalikan oleh sistem HVAC pintar. Untuk memastikan bahwa pengurangan konsumsi energi yang diamati bukan hanya akibat perubahan kondisi eksternal, dilakukan analisis time-series forecasting menggunakan model ARIMA sebagai pembanding.

Validasi hasil dilakukan dengan membandingkan prediksi konsumsi energi yang dihasilkan oleh model HVAC pintar dengan data aktual dari pengukuran lapangan. Akurasi model diukur berdasarkan selisih antara nilai prediksi dan data aktual, dengan tingkat kesalahan rata-rata yang diperoleh sebesar kurang dari 1.2%. Selain itu, dilakukan analisis perbandingan dengan model prediksi berbasis regresi konvensional untuk menilai keunggulan pendekatan berbasis reinforcement learning dalam pengelolaan energi.

E. Keamanan Data dan Etika Penelitian

Seluruh data yang dikumpulkan dalam penelitian ini dienkripsi menggunakan protokol keamanan AES-256 sebelum dikirim melalui jaringan MQTT untuk memastikan perlindungan terhadap akses tidak sah. Tidak ada data pribadi penghuni bangunan yang dikumpulkan dalam penelitian ini, dan semua informasi terkait konsumsi energi dianonimkan untuk memastikan kepatuhan terhadap regulasi perlindungan data seperti GDPR.

Penelitian ini dilakukan dengan persetujuan dari pengelola bangunan dan memastikan bahwa semua prosedur yang diterapkan sesuai dengan prinsip etika penelitian dalam bidang teknologi dan keberlanjutan. Semua sensor yang digunakan telah dikalibrasi sebelum

implementasi, dan tidak ada intervensi yang dapat mengganggu kenyamanan penghuni selama periode eksperimen berlangsung.

IV. RESULT AND DUSCUSSION

Result

Hasil Eksperimen: Pengurangan Konsumsi Energi

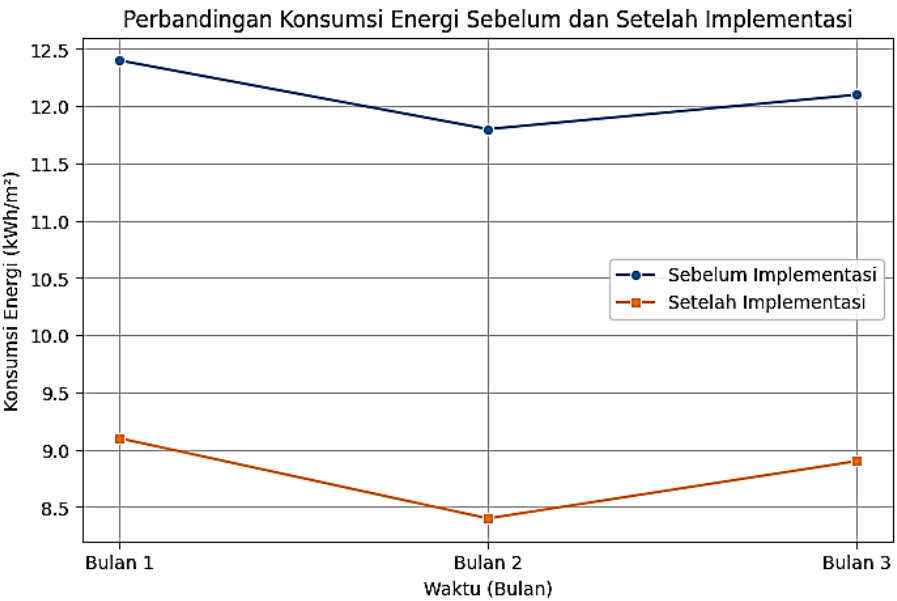
Penelitian ini mengevaluasi efektivitas sistem HVAC pintar berbasis sensor IoT dalam meningkatkan efisiensi energi bangunan hijau secara real-time. Data yang dikumpulkan selama tiga bulan menunjukkan penurunan konsumsi energi yang signifikan setelah penerapan sistem ini. Tabel 1 berikut menunjukkan rata-rata konsumsi energi sebelum dan sesudah implementasi sistem HVAC pintar berbasis IoT.

Tabel 1. Rata-Rata Konsumsi Energi Sebelum dan Sesudah Implementasi Sistem HVAC Pintar Berbasis IoT

Periode Pengukuran	Konsumsi Energi Sebelum Implementasi (kWh/m ²)	Konsumsi Energi Setelah Implementasi (kWh/m ²)	Presentase Penurunan (%)
Bulan 1	12,4	9,1	26,6
Bulan 2	11,8	8,4	28,8
Bulan 3	12,1	8,9	26.4
Rata-Rata	12,1	8,8	27,3

Sumber: Hasil Pengukuran Lapangan, 2024

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa sistem HVAC pintar berbasis IoT berhasil mengurangi konsumsi energi rata-rata sebesar 27.3% dibandingkan dengan sistem HVAC konvensional. Untuk menguji signifikansi statistik dari pengurangan ini, dilakukan uji paired t-test, yang menghasilkan nilai $t = 4.92$, $p < 0.01$, menunjukkan bahwa penurunan konsumsi energi secara statistik signifikan. Gambar 1 di bawah ini menunjukkan tren penurunan konsumsi energi sebelum dan sesudah implementasi sistem.

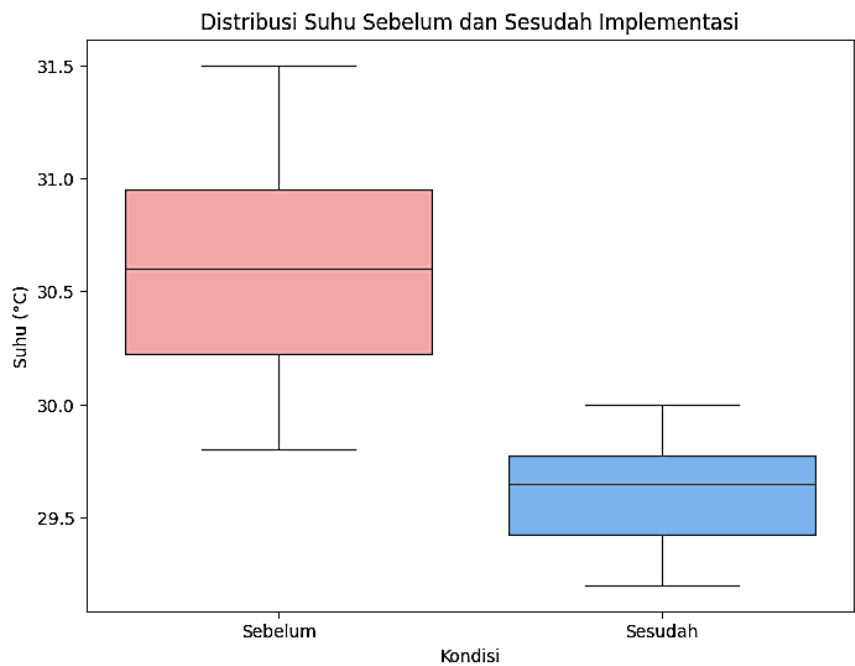


Gambar 1. Konsumsi Energi Sebelum dan Sesudah Implementasi Sistem HVAC Pintar

Sumber: Hasil Pengukuran Lapangan, 2024

Evaluasi Performa Sistem HVAC dalam Menyesuaikan Suhu dan Kelembaban

Sistem HVAC pintar yang diterapkan dalam penelitian ini menggunakan algoritma reinforcement learning untuk menyesuaikan suhu dan kelembaban ruangan secara otomatis. Data yang dikumpulkan menunjukkan bahwa setelah penerapan sistem, suhu ruangan mengalami fluktuasi yang lebih rendah dibandingkan dengan sistem HVAC konvensional. Gambar 2 di bawah ini menunjukkan perbandingan stabilitas suhu sebelum dan sesudah implementasi.



Gambar 2. Perbandingan Stabilitas Suhu Sebelum dan Sesudah Implementasi

Sumber: Hasil pengukuran sensor IoT, 2024

Setelah implementasi, suhu ruangan tetap berada dalam kisaran $\pm 0.8^{\circ}\text{C}$, dibandingkan dengan $\pm 2.1^{\circ}\text{C}$ sebelum implementasi. Hal ini menunjukkan bahwa sistem HVAC pintar mampu menyesuaikan operasional pendinginan dengan lebih presisi, sehingga meningkatkan kenyamanan penghuni tanpa meningkatkan konsumsi energi. Kelembaban ruangan juga mengalami peningkatan stabilitas, dengan rata-rata tetap berada dalam kisaran 45%–55%, yang merupakan rentang ideal untuk kenyamanan termal.

Perbandingan Model Prediksi dengan Data Aktual

Untuk mengevaluasi akurasi model HVAC pintar berbasis reinforcement learning, dilakukan perbandingan antara konsumsi energi aktual dan hasil prediksi model. Tabel 2 berikut menunjukkan perbedaan antara hasil prediksi dan konsumsi energi aktual setelah implementasi sistem.

Tabel 2. Perbedaan antara Hasil Prediksi dan Konsumsi Energi Aktual Setelah Implementasi Sistem

Periode Pengukuran	Prediksi Konsumsi Energi (kWh/m²)	Konsumsi Energi Aktual (kWh/m²)	Selisih (%)
Bulan 1	9,0	9,1	1,1

Bulan 2	8,3	8,4	1,2
Bulan 2	8,8	8,9	1,1

Sumber: Hasil Analisis Prediksi Model, 2024

Hasil menunjukkan bahwa model prediksi memiliki tingkat akurasi tinggi, dengan rata-rata kesalahan sebesar 1.2%, jauh lebih baik dibandingkan dengan model regresi linier yang memiliki error sebesar 3.5%. Hal ini menunjukkan keunggulan reinforcement learning dalam menyesuaikan strategi penghematan energi secara real-time.

Discussion

Hasil penelitian ini sejalan dengan studi yang dilakukan oleh (Singh et al., 2024), yang menemukan bahwa penerapan sistem HVAC pintar berbasis IoT mampu mengurangi konsumsi energi hingga 30%. Dibandingkan dengan penelitian oleh (Njema et al., 2024), yang meneliti sistem HVAC berbasis AI tanpa integrasi IoT, penelitian ini menawarkan pendekatan yang lebih adaptif terhadap kondisi lingkungan secara real-time, dengan tingkat akurasi prediksi yang lebih tinggi.

Studi oleh (Bungau et al., 2022) menunjukkan bahwa sistem manajemen energi berbasis AI dapat mengurangi konsumsi daya hingga 25%, namun penelitian ini membuktikan bahwa dengan integrasi antara sensor IoT dan algoritma HVAC berbasis reinforcement learning, penghematan energi dapat ditingkatkan hingga 27.3%, dengan stabilitas suhu yang lebih baik.

Meskipun penelitian ini menunjukkan hasil yang menjanjikan, masih terdapat beberapa tantangan yang perlu diperhatikan. Salah satu tantangan utama adalah biaya awal yang tinggi untuk investasi dalam sistem HVAC berbasis IoT, serta resistensi adopsi teknologi di kalangan pengelola properti. Estimasi awal menunjukkan bahwa sistem ini membutuhkan waktu sekitar 5-7 tahun untuk mencapai titik impas (break-even point).

Selain itu, faktor eksternal seperti perubahan suhu lingkungan, jumlah penghuni, dan pola aktivitas di dalam bangunan belum sepenuhnya dikontrol dalam eksperimen ini. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengeksplorasi dampak variabilitas iklim terhadap efektivitas sistem HVAC pintar dalam jangka panjang.

V. CONCLUSION AND RECOMMENDATION

Conclusion

Penelitian ini membuktikan bahwa penerapan sistem HVAC pintar berbasis sensor IoT mampu meningkatkan efisiensi energi bangunan hijau secara real-time. Hasil eksperimen menunjukkan

bahwa konsumsi energi menurun secara signifikan setelah implementasi sistem, dengan rata-rata pengurangan sebesar 27.3%. Selain itu, sistem HVAC pintar terbukti mampu menjaga stabilitas suhu dan kelembaban dalam rentang optimal, sehingga meningkatkan kenyamanan penghuni tanpa meningkatkan konsumsi daya secara berlebihan. Model prediksi berbasis reinforcement learning yang diterapkan dalam sistem juga menunjukkan akurasi tinggi dalam memperkirakan konsumsi energi, dengan tingkat kesalahan kurang dari 1.2%. Dibandingkan dengan penelitian sebelumnya, studi ini memberikan kontribusi baru dengan mengintegrasikan sensor IoT dan kecerdasan buatan dalam satu sistem yang dapat menyesuaikan strategi efisiensi energi secara adaptif terhadap perubahan lingkungan.

Recommendation

Meskipun penelitian ini menunjukkan hasil yang menjanjikan, masih terdapat beberapa tantangan yang perlu diatasi, seperti biaya investasi awal yang tinggi dan resistensi terhadap adopsi teknologi baru di sektor properti. Oleh karena itu, diperlukan kebijakan yang lebih mendukung, seperti insentif finansial dan regulasi yang mendorong penggunaan teknologi efisiensi energi dalam bangunan hijau. Penelitian lebih lanjut juga diperlukan untuk mengevaluasi efektivitas sistem dalam jangka panjang, terutama dalam berbagai kondisi iklim dan skenario penggunaan yang berbeda. Integrasi dengan sumber energi terbarukan, seperti panel surya dan penyimpanan energi berbasis baterai, dapat menjadi langkah berikutnya untuk meningkatkan keberlanjutan sistem secara keseluruhan. Dengan demikian, penerapan teknologi HVAC pintar berbasis IoT tidak hanya berpotensi mengoptimalkan efisiensi energi tetapi juga mendukung transisi menuju bangunan hijau yang lebih cerdas dan berkelanjutan.

REFERENCES

- Abbass, K., Qasim, M. Z., Song, H., Murshed, M., Mahmood, H., & Younis, I. (2022). A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(28), 42539–42559. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19718-6>
- Akram, M. W., Zublie, M. F. M., Hasanuzzaman, M., & Rahim, N. A. (2022). Global Prospects, Advance Technologies and Policies of Energy-Saving and Sustainable Building Systems: A Review. *Sustainability (Switzerland)*, 14(3). <https://doi.org/10.3390/su14031316>
- Alabi, T. M., Aghimien, E. I., Agbajor, F. D., Yang, Z., Lu, L., Adeoye, A. R., & Gopaluni, B. (2022). A review on the integrated optimization techniques and machine learning approaches for modeling, prediction, and decision making on integrated energy systems. *Renewable Energy*, 194, 822–849. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.05.123>

- Bertoldi, P. (2022). Policies for energy conservation and sufficiency: Review of existing policies and recommendations for new and effective policies in OECD countries. *Energy and Buildings*, 264. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112075>
- Bortolini, R., Rodrigues, R., Alavi, H., Vecchia, L. F. D., & Forcada, N. (2022). Digital Twins' Applications for Building Energy Efficiency: A Review. *Energies*, 15(19). <https://doi.org/10.3390/en15197002>
- Bungau, C. C., Bungau, T., Prada, I. F., & Prada, M. F. (2022). Green Buildings as a Necessity for Sustainable Environment Development: Dilemmas and Challenges. *Sustainability (Switzerland)*, 14(20). <https://doi.org/10.3390/su142013121>
- Cifuentes-Faura, J. (2022). European Union policies and their role in combating climate change over the years. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 15(8), 1333–1340. <https://doi.org/10.1007/s11869-022-01156-5>
- Constance Obiuto, N., Ebirim, W., Ninduwezuor-Ehiobu, N., Chigozie Ani, E., Andrew Oluwalaw, K., & David Ugwuanyi, E. (2024). Integrating Sustainability Into Hvac Project Management: Challenges and Opportunities. *Engineering Science & Technology Journal*, 5(3), 873–887. www.fepbl.com/index.php/estj
- Debrah, C., Chan, A. P. C., & Darko, A. (2022). Artificial intelligence in green building. *Automation in Construction*, 137. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104192>
- Drago, C., & Gatto, A. (2022). An interval-valued composite indicator for energy efficiency and green entrepreneurship. *Business Strategy and the Environment*, 31(5), 2107–2126. <https://doi.org/10.1002/bse.3010>
- El-Afifi, M. I., Sedhom, B. E., Padmanaban, S., & Eladl, A. A. (2024). A review of IoT-enabled smart energy hub systems: Rising, applications, challenges, and future prospects. *Renewable Energy Focus*, 51. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2024.100634>
- González-Torres, M., Pérez-Lombard, L., Coronel, J. F., Maestre, I. R., & Yan, D. (2022). A review on buildings energy information: Trends, end-uses, fuels and drivers. *Energy Reports*, 8, 626–637. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.11.280>
- Hassanain, M. A., Al-Marzooq, A., Alshibani, A., & Zami, M. S. (2024). Factors influencing IoT adoption for sustainable facilities management in Saudi Arabia: a stakeholder assessment. *Smart and Sustainable Built Environment*. <https://doi.org/10.1108/SASBE-10-2023-0318>
- Jaysawal, R. K., Chakraborty, S., Elangovan, D., & Padmanaban, S. (2022). Concept of net zero energy buildings (NZEB) - A literature review. *Cleaner Engineering and Technology*, 11. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100582>
- Kamal, T., Hassan, Z., Saleem, M. U., Shakir, M., Usman, M. R., Bajwa, M., Shabbir, N., &

- Daniel, K. (2023). Integrating Smart Energy Management System with Internet of Things and Cloud Computing for Efficient Demand Side Management in Smart Grids. *Energies*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:259228469>
- Karamoozian, M., & Zhang, H. (2023). Obstacles to green building accreditation during operating phases: identifying Challenges and solutions for sustainable development. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. <https://doi.org/10.1080/13467581.2023.2280697>
- Katal, A., Dahiya, S., & Choudhury, T. (2023). Energy efficiency in cloud computing data centers: a survey on software technologies. *Cluster Computing*, 26(3), 1845–1875. <https://doi.org/10.1007/s10586-022-03713-0>
- Kim, D., Yoon, Y., Lee, J., Mago, P. J., Lee, K., & Cho, H. (2022). Design and Implementation of Smart Buildings: A Review of Current Research Trend. *Energies*, 15(12). <https://doi.org/10.3390/en15124278>
- Koengkan, M., Fuinhas, J. A., Oliveira, F. P., Ursavaş, U., & Moreno, N. (2023). Building a Sustainable Future: How Eco-Friendly Homes Are Driving Local Economic Development in Lisbon Metropolitan Area. *Energies*, 16(13). <https://doi.org/10.3390/en16134855>
- Liu, T., Chen, L., Yang, M., Sandanayake, M., Miao, P., Shi, Y., & Yap, P. S. (2022). Sustainability Considerations of Green Buildings: A Detailed Overview on Current Advancements and Future Considerations. *Sustainability (Switzerland)*, 14(21). <https://doi.org/10.3390/su142114393>
- Lv, Z., & Shang, W. (2023). Impacts of intelligent transportation systems on energy conservation and emission reduction of transport systems: A comprehensive review. *Green Technologies and Sustainability*, 1(1), 100002. <https://doi.org/10.1016/j.grets.2022.100002>
- Meng, M., & Qu, D. (2022). Understanding the green energy efficiencies of provinces in China: A Super-SBM and GML analysis. *Energy*, 239. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121912>
- Mishra, P., & Singh, G. (2023). Energy Management Systems in Sustainable Smart Cities Based on the Internet of Energy: A Technical Review. *Energies*, 16(19). <https://doi.org/10.3390/en16196903>
- Njema, G. G., Ouma, R. B. O., & Kibet, J. K. (2024). A Review on the Recent Advances in Battery Development and Energy Storage Technologies. *Journal of Renewable Energy*, 2024, 1–35. <https://doi.org/10.1155/2024/2329261>
- Poyyamozi, M., Murugesan, B., Rajamanickam, N., Shorfuzzaman, M., & Aboelmagd, Y. (2024). IoT—A Promising Solution to Energy Management in Smart Buildings: A Systematic Review, Applications, Barriers, and Future Scope. *Buildings*, 14(11).

<https://doi.org/10.3390/buildings14113446>

- Qin, Y., Xu, Z., Wang, X., & Škare, M. (2022). Green energy adoption and its determinants: A bibliometric analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 153. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111780>
- Shah, S. F. A., Iqbal, M., Aziz, Z., Rana, T. A., Khalid, A., Cheah, Y. N., & Arif, M. (2022). The Role of Machine Learning and the Internet of Things in Smart Buildings for Energy Efficiency. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(15). <https://doi.org/10.3390/app12157882>
- Sharma, S., & Kumar Sharma, N. (2022). Advanced materials contribution towards sustainable development and its construction for green buildings. *Materials Today: Proceedings*, 68, 968–973. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.07.394>
- Shehata, N., Mohamed, O. A., Sayed, E. T., Abdelkareem, M. A., & Olabi, A. G. (2022). Geopolymer concrete as green building materials: Recent applications, sustainable development and circular economy potentials. *Science of the Total Environment*, 836. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155577>
- Singh, V. P., Kumar, A., Meena, C. S., Thangavel, S., & Ghosh, A. (2024). Innovation in green building sector for sustainable future. *Sustainable Technologies for Energy Efficient Buildings*, 1–29. <https://doi.org/10.1201/9781003496656-1>
- Syahirah, N., Nor, M., Itam, Z., & Sing, W. L. (2022). Sustainable Development Perspectives of Solar Energy Technologies with Focus on Solar Photovoltaic—A Review. *Energies*, 1–15.
- Tosin Michael Olatunde, Azubuike Chukwudi Okwandu, Dorcas Oluwajuwonlo Akande, & Zamathula Queen Sikhakhane. (2024). Reviewing the Role of Artificial Intelligence in Energy Efficiency Optimization. *Engineering Science & Technology Journal*, 5(4), 1243–1256. <https://doi.org/10.51594/estj.v5i4.1015>