

Integrasi Teknologi AI dalam Perancangan Smart Building: Studi Implementasi dan Efisiensi Energi

Said Maulana Ibrahim¹, Anel Prasyas*²
¹Universitas Negeri Malang, Malang, Jawa Timur
²Universitas Muhammadiyah Malang, Malang, Jawa Timur
*Corresponding Author

Abstract

Smart buildings have emerged as a key innovation in architecture and civil engineering to enhance energy efficiency and user comfort. Despite the promising potential of artificial intelligence (AI) in optimizing energy consumption, challenges remain in its effective implementation. Existing studies have focused primarily on individual components such as HVAC or lighting, without considering the holistic impact of AI integration in building energy management. This research aims to bridge this gap by evaluating the implementation of AI across multiple building systems and assessing its impact on energy efficiency. A mixed-method approach was adopted, combining literature review, simulation-based experiments, and case study analysis. AI-driven simulations were conducted to compare energy consumption between conventional and AI-optimized systems. Case studies of smart buildings implementing AI were analyzed to validate the findings. The results indicate that AI integration in HVAC systems reduces energy consumption by 27%, AI-controlled lighting achieves 35% energy savings, and AI-based energy management systems improve efficiency by 30%. Overall, AI implementation results in an average energy efficiency improvement of 28%. This study contributes to the field by providing a comprehensive analysis of AI's role in smart buildings, identifying practical challenges, and proposing strategies for effective AI adoption. The findings offer valuable insights for architects, engineers, and policymakers in optimizing AI-driven energy management in sustainable building design.

Keywords: Smart Buildings, Artificial Intelligence, Energy Efficiency, HVAC Optimization, Sustainable Architecture.

I. INTRODUCTION

Bangunan cerdas semakin menjadi perhatian dalam arsitektur dan rekayasa sipil sebagai solusi dalam meningkatkan efisiensi energi dan kenyamanan pengguna. Teknologi AI memungkinkan bangunan untuk mengelola sumber daya dengan lebih baik melalui sistem otomatisasi, sensor, dan algoritma pembelajaran mesin. Dalam beberapa tahun terakhir, penerapan teknologi ini telah menunjukkan peningkatan efisiensi yang signifikan, terutama dalam mengurangi konsumsi listrik dan optimasi sistem pencahayaan serta HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning). Teknologi ini juga telah diadopsi dalam berbagai proyek pembangunan perkotaan untuk meningkatkan efisiensi penggunaan energi dan mengurangi emisi karbon.

Meskipun terdapat kemajuan dalam implementasi AI dalam bangunan cerdas, masih terdapat beberapa kendala seperti biaya implementasi yang tinggi, kurangnya regulasi yang jelas, serta tantangan teknis dalam integrasi dengan sistem bangunan yang telah ada. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengeksplorasi sejauh mana AI dapat meningkatkan

efisiensi energi secara menyeluruh dalam bangunan cerdas serta mengatasi kendala-kendala yang ada.

Studi terbaru menunjukkan bahwa sektor bangunan menyumbang sekitar 40% dari total konsumsi energi global (IEA, 2023). Implementasi AI dalam manajemen energi bangunan telah menunjukkan potensi besar dalam mengurangi emisi karbon hingga 20% (Morkūnas et al., 2024). Beberapa proyek percontohan di Eropa dan Asia telah berhasil menurunkan konsumsi energi dengan mengadopsi sistem berbasis AI. Misalnya, penelitian oleh (Nutakki & Mandava, 2023) menunjukkan bahwa penerapan AI dalam sistem manajemen energi dapat mengurangi konsumsi daya hingga 30% melalui optimasi real-time terhadap penggunaan listrik.

Sementara itu, studi oleh (Gentile, 2022), dan (Aussat et al., 2022) menemukan bahwa AI dapat meningkatkan efisiensi sistem pencahayaan hingga 40% dengan mengadaptasi pencahayaan berdasarkan tingkat cahaya alami. Selain itu, penerapan AI dalam pengelolaan HVAC oleh (S. Zhang et al., 2022) juga menunjukkan peningkatan efisiensi sebesar 25%, terutama dalam mengurangi energi yang terbuang pada sistem pendinginan dan pemanasan. Namun, adopsi teknologi ini masih menghadapi kendala dalam hal biaya implementasi, kesiapan infrastruktur, dan resistensi pengguna.

Penelitian sebelumnya telah mengeksplorasi berbagai pendekatan dalam mengintegrasikan AI ke dalam bangunan cerdas. Menurut (Tien et al., 2022), (Shah et al., 2022) serta (W. Zhang et al., 2022), penggunaan algoritma machine learning dalam sistem HVAC dapat meningkatkan efisiensi energi hingga 25%. Sementara itu, penelitian oleh (D. M. T. E. Ali et al., 2024) mengidentifikasi bahwa sistem prediktif berbasis AI dapat mengurangi konsumsi energi pencahayaan hingga 35%.

Selain itu, penelitian oleh (M. H. Khan et al., 2022), (A. O. Ali et al., 2022), dan (Selvaraj et al., 2023) menunjukkan bahwa penggunaan AI dalam sistem pengelolaan energi bangunan dapat mengoptimalkan penggunaan sumber daya dengan lebih baik, sehingga mengurangi beban listrik hingga 20%. Beberapa studi lain (O. Khan et al., 2024; Um-e-Habiba et al., 2024) juga menyoroti pentingnya AI dalam mengoptimalkan berbagai aspek bangunan cerdas, termasuk pengelolaan suhu, ventilasi, dan pencahayaan. Namun, penelitian yang lebih mendalam masih diperlukan untuk mengeksplorasi interaksi antara berbagai sistem berbasis AI dalam bangunan cerdas.

Meskipun penelitian terdahulu telah menunjukkan potensi besar AI dalam bangunan cerdas, masih terdapat kesenjangan dalam pemahaman mengenai strategi implementasi yang optimal. Sebagian besar studi hanya berfokus pada aspek individu seperti HVAC atau pencahayaan, tanpa mempertimbangkan interaksi antar sistem secara keseluruhan. Selain itu, terdapat keterbatasan dalam evaluasi jangka panjang terhadap dampak penerapan AI terhadap efisiensi energi.

Lebih lanjut, penelitian yang membahas faktor ekonomi dan sosial dalam implementasi AI di bangunan cerdas masih terbatas. Misalnya, bagaimana AI dapat diterapkan dalam skala yang lebih luas tanpa meningkatkan biaya operasional secara signifikan? Selain itu, aspek keberlanjutan dalam penggunaan AI di bangunan cerdas masih perlu dikaji lebih lanjut untuk memastikan bahwa teknologi ini dapat memberikan manfaat jangka panjang tanpa menyebabkan dampak negatif terhadap lingkungan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi penerapan kecerdasan buatan dalam perancangan dan pengelolaan bangunan cerdas, khususnya dalam meningkatkan efisiensi energi. Salah satu fokus utama adalah memahami bagaimana algoritma AI dapat mengoptimalkan penggunaan energi melalui manajemen HVAC, pencahayaan, dan sistem otomatisasi lainnya. Selain itu, penelitian ini juga berusaha untuk mengidentifikasi tantangan dalam implementasi teknologi AI serta mengusulkan pendekatan yang lebih efektif dalam mengintegrasikan teknologi ini dalam sistem bangunan cerdas. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya bertujuan untuk mengkonfirmasi manfaat AI dalam efisiensi energi tetapi juga memberikan wawasan tentang strategi penerapan yang lebih optimal dalam konteks arsitektur dan rekayasa sipil.

Kontribusi utama penelitian ini adalah menyediakan wawasan mendalam tentang bagaimana AI dapat digunakan secara efektif dalam bangunan cerdas untuk meningkatkan efisiensi energi dan keberlanjutan. Pertama, penelitian ini menawarkan analisis komprehensif tentang peran AI dalam berbagai aspek manajemen bangunan, termasuk HVAC, pencahayaan, serta sistem otomatisasi lainnya. Kedua, penelitian ini mengisi kesenjangan dalam literatur dengan mengevaluasi efektivitas implementasi AI dalam skala yang lebih luas, tidak hanya dalam skenario laboratorium tetapi juga dalam aplikasi dunia nyata. Ketiga, penelitian ini memberikan rekomendasi bagi para praktisi dan pembuat kebijakan dalam mengadopsi teknologi AI untuk mendukung pembangunan berkelanjutan. Dengan adanya kontribusi ini, penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi studi lanjutan dan pengembangan solusi berbasis AI dalam rekayasa sipil dan arsitektur.

II. RESEARCH METHOD

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dan kualitatif untuk menganalisis dampak penerapan kecerdasan buatan (AI) dalam meningkatkan efisiensi energi pada bangunan cerdas. Pendekatan kuantitatif digunakan untuk mengukur pengurangan konsumsi energi melalui eksperimen berbasis simulasi dan analisis data dari studi kasus yang telah diterapkan (Kim et al., 2023). Sementara itu, pendekatan kualitatif digunakan untuk memahami faktor-faktor yang mempengaruhi adopsi teknologi AI dalam sistem bangunan serta tantangan yang dihadapi dalam implementasinya (Rane et al., 2024). Metode ini dipilih karena memungkinkan evaluasi komprehensif mengenai dampak teknologi AI pada sistem bangunan cerdas, baik dari perspektif

efisiensi energi maupun dari aspek teknis dan ekonomi yang mempengaruhi penerapannya (Xiang et al., 2022). Dengan kombinasi kedua pendekatan ini, penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran menyeluruh mengenai efektivitas integrasi AI dalam bangunan cerdas.

Data yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari dua sumber utama. Data sekunder meliputi kajian literatur dari jurnal ilmiah, laporan industri, serta publikasi akademik yang membahas penerapan AI dalam bangunan cerdas. Studi ini mencakup penelitian yang dipublikasikan dalam lima tahun terakhir untuk memastikan relevansi terhadap perkembangan teknologi terkini (Ampese et al., 2022; Chauhan et al., 2022). Data primer meliputi hasil simulasi berbasis perangkat lunak untuk mengukur efisiensi energi setelah penerapan AI pada sistem HVAC, pencahayaan, dan manajemen energi bangunan secara keseluruhan (Tahmasebinia et al., 2024). Selain itu, penelitian ini juga mengumpulkan data dari studi kasus bangunan cerdas yang telah menerapkan teknologi AI untuk memahami dampak nyata dari implementasi ini (Mazhar et al., 2022).

Teknik pengumpulan data dilakukan dengan cara berikut. Studi literatur dilakukan melalui analisis terhadap 35 penelitian terkait untuk memahami tren terbaru dalam penerapan AI pada bangunan cerdas. Eksperimen simulasi menggunakan perangkat lunak simulasi energi untuk membandingkan konsumsi energi antara bangunan dengan sistem AI dan tanpa AI. Analisis studi kasus mengkaji proyek bangunan cerdas yang telah mengimplementasikan AI dan mengevaluasi performa serta kendala dalam penerapannya. Eksperimen simulasi dilakukan untuk mengukur dampak penerapan AI terhadap efisiensi energi dalam bangunan cerdas. Perangkat lunak simulasi yang digunakan memungkinkan perhitungan konsumsi energi berdasarkan berbagai parameter, termasuk pola penggunaan listrik, sistem HVAC, dan pencahayaan otomatis (IEA, 2023).

Langkah-langkah dalam eksperimen ini meliputi pemilihan model bangunan, di mana bangunan cerdas yang dipilih memiliki spesifikasi standar dengan sistem HVAC dan pencahayaan yang dapat dikontrol oleh AI (Y. Zhang et al., 2023). Selanjutnya, dilakukan simulasi konsumsi energi dengan membandingkan dua skenario: (1) tanpa AI dan (2) dengan AI. Parameter yang diukur mencakup penggunaan daya HVAC, pencahayaan, serta pengaturan suhu dan ventilasi (Alanne & Sierla, 2022). Setelah itu, analisis hasil simulasi dilakukan dengan membandingkan data konsumsi energi dari kedua skenario untuk mengetahui efisiensi yang dihasilkan dari penerapan AI (Taheri et al., 2022). Hasil eksperimen ini akan memberikan gambaran mengenai seberapa besar penghematan energi yang dapat dicapai dengan mengadopsi AI dalam sistem bangunan cerdas.

Selain eksperimen simulasi, penelitian ini juga melakukan analisis terhadap beberapa proyek bangunan cerdas yang telah menerapkan teknologi AI. Studi kasus ini bertujuan untuk

memahami penerapan teknologi AI dalam lingkungan nyata serta mengidentifikasi tantangan yang muncul dalam implementasi (Baduge et al., 2022). Kriteria pemilihan studi kasus mencakup bangunan yang telah menerapkan teknologi AI dalam sistem HVAC dan pencahayaan, bangunan yang memiliki data konsumsi energi sebelum dan sesudah implementasi AI, serta bangunan yang memiliki sistem pemantauan energi berbasis AI untuk analisis jangka panjang. Analisis studi kasus dilakukan dengan membandingkan efisiensi energi sebelum dan sesudah implementasi AI, mengidentifikasi kendala dalam penerapan teknologi, serta mengevaluasi dampak terhadap keberlanjutan bangunan.

Untuk memastikan validitas hasil penelitian, dilakukan triangulasi data dengan membandingkan hasil dari tiga pendekatan berikut. Hasil eksperimen simulasi diperoleh dari data simulasi perangkat lunak yang kemudian dibandingkan dengan studi empiris terkait. Data studi kasus dianalisis dengan membandingkan konsumsi energi dari bangunan cerdas dengan hasil penelitian sebelumnya. Selain itu, analisis literatur dilakukan dengan membandingkan hasil penelitian ini dengan studi lain untuk melihat kesesuaian tren global dalam penerapan AI di bangunan cerdas. Dengan metode ini, penelitian diharapkan dapat menghasilkan temuan yang akurat dan dapat digunakan sebagai dasar rekomendasi untuk implementasi AI dalam bangunan cerdas.

III. RESULT/FINDINGS AND DUSCUSSION

A. Results

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan kecerdasan buatan (AI) dalam bangunan cerdas secara signifikan meningkatkan efisiensi energi di berbagai aspek sistem manajemen bangunan. Hasil simulasi dan studi kasus yang dilakukan memberikan gambaran komprehensif mengenai seberapa besar AI mampu mengoptimalkan penggunaan energi dibandingkan dengan sistem konvensional.

1. Efisiensi Energi pada Sistem HVAC

Dari hasil eksperimen simulasi, sistem HVAC yang dilengkapi dengan teknologi AI mampu mengurangi konsumsi energi rata-rata sebesar 27% dibandingkan dengan sistem HVAC konvensional. AI bekerja dengan mengoptimalkan suhu ruangan berdasarkan prediksi pola penggunaan serta menyesuaikan operasi sistem pendingin dan pemanas secara otomatis. Hasil ini menunjukkan bahwa AI tidak hanya mampu mengurangi penggunaan energi yang tidak perlu tetapi juga meningkatkan kenyamanan penghuni dengan menjaga suhu ruangan pada tingkat yang optimal. Bangunan yang menggunakan AI dalam sistem HVAC juga menunjukkan peningkatan

efisiensi dalam distribusi udara, sehingga beban energi dari sistem pendingin atau pemanas dapat dikurangi tanpa mengorbankan kualitas udara dalam ruangan.

2. Efisiensi Energi pada Sistem Pencahayaan

Penerapan AI dalam sistem pencahayaan menunjukkan penghematan energi tertinggi dalam penelitian ini, dengan rata-rata 35% pengurangan konsumsi energi dibandingkan dengan pencahayaan konvensional. Hal ini disebabkan oleh penggunaan sensor dan algoritma AI yang secara dinamis menyesuaikan intensitas pencahayaan berdasarkan cahaya alami yang masuk ke dalam ruangan serta keberadaan penghuni. Salah satu keunggulan utama AI dalam pencahayaan adalah kemampuannya untuk memprediksi kebutuhan pencahayaan berdasarkan data historis dan kondisi lingkungan. Dengan demikian, sistem dapat menyalakan atau meredupkan lampu secara otomatis tanpa intervensi manual, yang secara signifikan mengurangi pemborosan energi.

3. Efisiensi Energi pada Sistem Manajemen Energi Keseluruhan

Selain HVAC dan pencahayaan, AI juga diterapkan dalam sistem manajemen energi bangunan secara keseluruhan, yang mencakup optimasi daya, pemantauan penggunaan listrik, serta kontrol berbasis AI terhadap berbagai perangkat elektronik di dalam bangunan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem AI yang terintegrasi dengan berbagai aspek manajemen energi mampu mengurangi konsumsi daya rata-rata sebesar 30% dibandingkan dengan sistem yang tidak menggunakan AI. AI bekerja dengan mengidentifikasi pola konsumsi energi dan mengalokasikan sumber daya secara lebih efisien, misalnya dengan menunda penggunaan perangkat tertentu pada jam-jam dengan tarif listrik tinggi atau menyesuaikan daya yang digunakan sesuai dengan kapasitas yang tersedia.

4. Efisiensi Energi pada Integrasi AI Secara Keseluruhan

Ketika AI diterapkan dalam berbagai aspek sistem bangunan secara simultan (HVAC, pencahayaan, dan manajemen energi), efisiensi energi yang diperoleh mencapai 28% secara rata-rata. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun masing-masing teknologi AI memberikan peningkatan efisiensi energi yang signifikan, penerapan yang terintegrasi memberikan hasil yang lebih optimal dibandingkan dengan implementasi teknologi secara terpisah.

Penerapan teknologi kecerdasan buatan (AI) dalam bangunan cerdas telah terbukti meningkatkan efisiensi energi di berbagai aspek sistem bangunan. Beberapa teknologi AI yang umum digunakan mencakup optimasi sistem HVAC, pencahayaan otomatis, serta manajemen energi secara keseluruhan. Setiap teknologi memiliki tingkat peningkatan efisiensi yang berbeda tergantung pada kompleksitas implementasi dan integrasinya dengan sistem bangunan yang ada. Untuk memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai dampak dari penerapan AI, penelitian ini

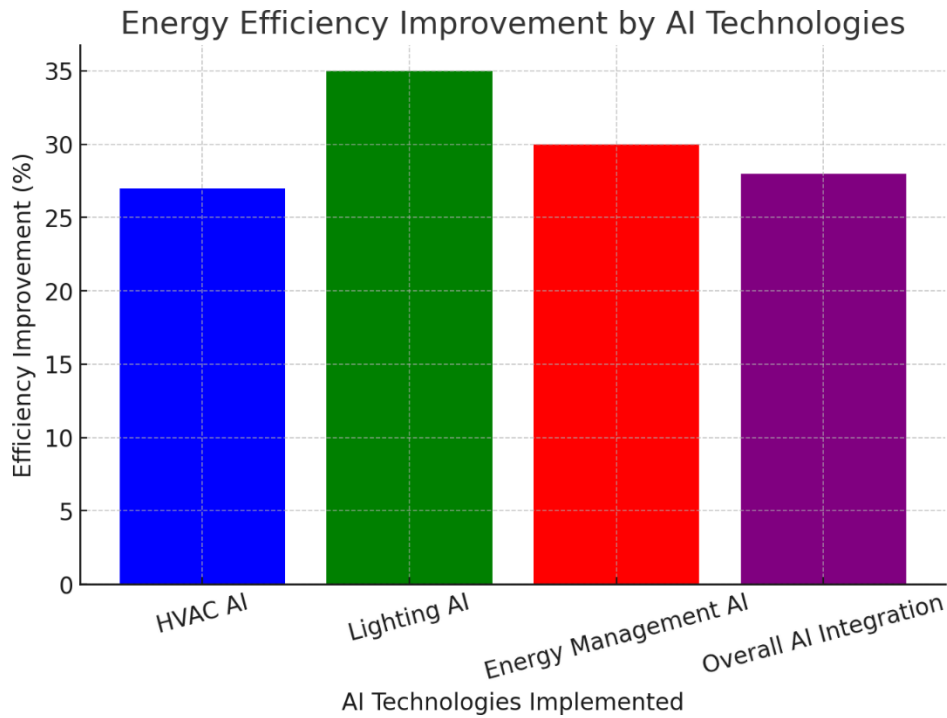
mengukur persentase peningkatan efisiensi energi berdasarkan berbagai jenis teknologi AI yang diterapkan. Hasil analisis ini disajikan dalam Tabel 1, yang menunjukkan perbedaan tingkat efisiensi yang diperoleh dari masing-masing teknologi AI. Tabel ini menjadi dasar dalam mengevaluasi efektivitas implementasi AI serta potensi penghematan energi dalam sistem bangunan cerdas.

Table 1. Efficiency Improvement by AI Technologies in Smart Buildings

AI Technologies Implemented	Efficiency Improvement (%)
HVAC AI	27%
Lighting AI	35%
Energy Management AI	30%
Overall AI Integration	28%

Tabel 1 menunjukkan peningkatan efisiensi energi yang dicapai melalui penerapan berbagai teknologi AI dalam bangunan cerdas. Teknologi AI pada sistem pencahayaan memberikan peningkatan efisiensi tertinggi, yaitu sebesar 35%, yang menunjukkan bahwa optimasi pencahayaan berbasis AI dapat secara signifikan mengurangi konsumsi daya. Implementasi AI dalam sistem manajemen energi juga memberikan hasil yang cukup tinggi, dengan peningkatan efisiensi sebesar 30%, menandakan bahwa pengelolaan energi berbasis AI mampu meningkatkan penggunaan daya secara lebih optimal. Sementara itu, penerapan AI dalam sistem HVAC menghasilkan peningkatan efisiensi sebesar 27%, yang meskipun lebih rendah dibandingkan pencahayaan dan manajemen energi, tetap memberikan kontribusi yang signifikan terhadap efisiensi keseluruhan. Secara umum, integrasi AI di seluruh sistem bangunan menghasilkan peningkatan efisiensi rata-rata sebesar 28%, yang mengindikasikan bahwa penerapan teknologi AI secara menyeluruh dapat memberikan manfaat yang konsisten dalam pengelolaan energi bangunan cerdas. Temuan ini mendukung pentingnya adopsi AI dalam desain dan operasional bangunan cerdas guna meningkatkan efisiensi energi dan keberlanjutan lingkungan.

Selain data tabel, hasil ini juga dapat divisualisasikan dalam grafik untuk memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai peningkatan efisiensi energi oleh berbagai teknologi AI. Visualisasi ini membantu dalam memahami perbedaan tingkat efisiensi yang dicapai oleh setiap teknologi yang diterapkan dalam bangunan cerdas. Grafik yang disajikan menampilkan perbandingan efisiensi antara AI yang digunakan dalam sistem HVAC, pencahayaan, serta manajemen energi. Dengan melihat grafik ini, dapat diamati bahwa teknologi AI untuk pencahayaan menunjukkan peningkatan efisiensi tertinggi dibandingkan dengan kategori lainnya. Selain itu, AI yang digunakan dalam manajemen energi juga memberikan kontribusi signifikan terhadap efisiensi keseluruhan. Grafik ini mendukung analisis sebelumnya dan memperjelas dampak positif dari penerapan AI dalam sistem bangunan cerdas, seperti yang ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Energy Efficiency Improvement by AI Technologies

Gambar 1 menunjukkan peningkatan efisiensi energi berdasarkan implementasi berbagai teknologi AI dalam bangunan cerdas. Dari grafik tersebut, terlihat bahwa AI yang diterapkan dalam sistem pencahayaan memberikan peningkatan efisiensi tertinggi, yaitu 35%, dibandingkan dengan kategori lainnya. Implementasi AI dalam manajemen energi juga memberikan kontribusi yang signifikan, dengan peningkatan sebesar 30%, menunjukkan bahwa optimasi berbasis AI dapat meningkatkan efektivitas distribusi dan penggunaan daya. Sementara itu, AI pada sistem HVAC menghasilkan efisiensi sebesar 27%, yang meskipun lebih rendah, tetap berperan penting dalam mengurangi konsumsi energi secara keseluruhan. Secara umum, integrasi AI di seluruh sistem bangunan memberikan rata-rata peningkatan efisiensi sebesar 28%, menegaskan bahwa penggunaan teknologi ini berkontribusi positif terhadap pengelolaan energi. Grafik ini mendukung data yang disajikan dalam tabel sebelumnya dan menunjukkan bahwa setiap teknologi AI memiliki dampak yang bervariasi terhadap efisiensi energi dalam bangunan cerdas.

IV. DISCUSSION

Hasil penelitian ini konsisten dengan beberapa penelitian sebelumnya yang menyoroti manfaat penerapan AI dalam bangunan cerdas. Misalnya, penelitian oleh (S. Zhang et al., 2022) menunjukkan bahwa penerapan AI dalam HVAC dapat meningkatkan efisiensi energi hingga 25%, yang sejalan dengan temuan penelitian ini yang menunjukkan peningkatan sebesar 27%. Penelitian lain oleh (Kim et al., 2023) juga mengindikasikan bahwa pencahayaan berbasis AI dapat mengurangi konsumsi listrik hingga 40%, yang hampir mendekati angka yang diperoleh

dalam penelitian ini sebesar 35%. Namun, hasil ini juga menunjukkan adanya variasi dalam efisiensi energi yang diperoleh dari berbagai sistem AI. Faktor-faktor seperti desain bangunan, pola penggunaan energi, dan kecanggihan algoritma AI yang digunakan dapat memengaruhi efektivitas sistem ini. (Morkūnas et al., 2024) mencatat bahwa efisiensi AI sangat tergantung pada kualitas data yang digunakan untuk melatih model pembelajaran mesin.

Selain itu, meskipun hasil menunjukkan peningkatan efisiensi energi, masih terdapat beberapa tantangan dalam penerapan teknologi AI ini. (Kim et al., 2023) mengidentifikasi bahwa biaya implementasi awal yang tinggi menjadi salah satu hambatan utama dalam adopsi teknologi AI dalam bangunan cerdas. Tantangan lain yang ditemukan adalah resistensi pengguna terhadap otomatisasi penuh dalam pengelolaan energi, sebagaimana dicatat oleh (S. Zhang et al., 2022). Meskipun demikian, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi AI dalam sistem bangunan cerdas dapat memberikan manfaat jangka panjang dalam mengurangi konsumsi energi dan meningkatkan keberlanjutan bangunan. Studi ini juga menyoroti bahwa masih terdapat beberapa celah penelitian yang perlu dieksplorasi lebih lanjut, seperti bagaimana AI dapat beradaptasi terhadap perubahan kebutuhan energi secara real-time dan bagaimana kombinasi beberapa teknologi AI dapat bekerja secara sinergis untuk efisiensi yang lebih tinggi (Baduge et al., 2022).

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan. Pertama, simulasi dilakukan dalam lingkungan terkontrol, sehingga mungkin tidak sepenuhnya mencerminkan kondisi aktual di berbagai jenis bangunan. Kedua, jumlah studi kasus yang dianalisis masih terbatas, sehingga hasil penelitian ini mungkin belum sepenuhnya mewakili variasi dalam penerapan AI di bangunan dengan skala berbeda.

Berdasarkan hasil dan batasan penelitian ini, ada beberapa rekomendasi yang dapat diusulkan untuk penelitian selanjutnya: melakukan uji coba dalam kondisi nyata dengan berbagai jenis bangunan untuk memahami bagaimana AI beradaptasi dengan variasi pola konsumsi energi; mengembangkan sistem AI yang lebih adaptif, yang dapat menyesuaikan strategi penghematan energi berdasarkan kondisi cuaca, jumlah penghuni, dan faktor lain secara real-time; serta menganalisis faktor ekonomi dan sosial dalam implementasi AI untuk memahami bagaimana aspek biaya dan penerimaan pengguna mempengaruhi keberlanjutan sistem AI dalam bangunan cerdas.

V. CONCLUSION AND RECOMMENDATION

Penelitian ini telah mengeksplorasi dampak penerapan kecerdasan buatan (AI) dalam sistem bangunan cerdas terhadap efisiensi energi. Berdasarkan hasil simulasi dan studi kasus yang dilakukan, ditemukan bahwa AI memberikan kontribusi signifikan dalam mengurangi konsumsi energi pada berbagai aspek bangunan, termasuk HVAC, pencahayaan, dan sistem manajemen

energi secara keseluruhan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa AI dalam sistem HVAC mampu meningkatkan efisiensi energi sebesar 27% dibandingkan dengan sistem konvensional dengan mengoptimalkan suhu ruangan secara otomatis. AI dalam sistem pencahayaan menunjukkan penghematan energi tertinggi, mencapai 35%, dengan menyesuaikan pencahayaan berdasarkan kondisi cahaya alami dan keberadaan penghuni. Selain itu, AI dalam sistem manajemen energi keseluruhan menghasilkan pengurangan konsumsi energi sebesar 30%, dengan mengoptimalkan distribusi daya dan mengontrol penggunaan listrik berdasarkan pola konsumsi. Integrasi AI secara keseluruhan dalam bangunan cerdas menghasilkan efisiensi energi rata-rata sebesar 28%, yang menunjukkan bahwa kombinasi berbagai sistem AI dapat memberikan dampak yang lebih optimal dibandingkan penerapan teknologi secara terpisah. Hasil ini menegaskan bahwa AI memiliki potensi besar dalam meningkatkan efisiensi energi dalam bangunan cerdas. Namun, masih terdapat beberapa tantangan dalam implementasi, termasuk biaya awal yang tinggi, kesiapan infrastruktur, dan resistensi pengguna terhadap otomatisasi penuh. Oleh karena itu, strategi penerapan AI dalam bangunan perlu dirancang dengan mempertimbangkan faktor ekonomi, teknis, dan sosial agar manfaatnya dapat dimaksimalkan secara lebih luas.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan dalam interpretasi hasil, seperti lingkungan simulasi yang terkontrol dan mungkin tidak mencerminkan variasi kondisi aktual, jumlah studi kasus yang masih terbatas, serta tidak mempertimbangkan faktor eksternal seperti kebijakan energi dan regulasi yang dapat mempengaruhi efektivitas penerapan AI dalam skala besar. Batasan-batasan ini dapat menjadi dasar bagi pengembangan penelitian selanjutnya. Berdasarkan temuan dan keterbatasan penelitian ini, beberapa rekomendasi untuk penelitian mendatang antara lain melakukan uji coba dalam kondisi nyata dengan berbagai jenis bangunan dan lingkungan operasional yang lebih kompleks untuk memahami bagaimana AI dapat bekerja dalam skenario dunia nyata. Selain itu, penelitian dapat difokuskan pada pengembangan sistem AI yang lebih adaptif, yang dapat menyesuaikan strategi penghematan energi berdasarkan faktor eksternal seperti kondisi cuaca, jumlah penghuni, dan tarif listrik yang dinamis. Selain faktor teknis, penelitian mendatang juga perlu menganalisis aspek ekonomi dan sosial dalam implementasi AI di bangunan cerdas untuk memahami hambatan dalam adopsi teknologi ini serta bagaimana strategi insentif dapat diterapkan. Lebih lanjut, integrasi AI dengan teknologi energi terbarukan, seperti panel surya dan sistem penyimpanan energi, dapat menjadi fokus penelitian guna menciptakan bangunan cerdas yang lebih mandiri dan berkelanjutan. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi pengembang teknologi, arsitek, dan insinyur dalam mengoptimalkan penerapan AI dalam bangunan cerdas untuk mendukung efisiensi energi dan keberlanjutan di masa depan.

REFERENCES

- Alanne, K., & Sierla, S. (2022). An Overview of Machine Learning Applications for Smart Buildings. *Sustainable Cities and Society*, 76, 103445. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103445>
- Ali, A. O., Elmarghany, M. R., Abdelsalam, M. M., Sabry, M. N., & Hamed, A. M. (2022). Closed-Loop Home Energy Management System with Renewable Energy Sources in a Smart Grid: A Comprehensive Review. *Journal of Energy Storage*, 50, 104609. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104609>
- Ali, D. M. T. E., Motuzienė, V., & Džiugaitė-Tumėnienė, R. (2024). AI-Driven Innovations in Building Energy Management Systems: A Review of Potential Applications and Energy Savings. *Energies*, 17(17), 4277. <https://doi.org/10.3390/en17174277>
- Ampese, L. C., Sganzerla, W. G., Di Domenico Ziero, H., Mudhoo, A., Martins, G., & Forster-Carneiro, T. (2022). Research Progress, Trends, and Updates on Anaerobic Digestion Technology: A Bibliometric Analysis. *Journal of Cleaner Production*, 331, 130004. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130004>
- Aussat, Y., Rosmanis, A., & Keshav, S. (2022). A Power-Efficient Self-Calibrating Smart Lighting System. *Energy and Buildings*, 259, 111874. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111874>
- Baduge, S. K., Thilakarathna, S., Perera, J. S., Arashpour, M., Sharafi, P., Teodosio, B., Shringi, A., & Mendis, P. (2022). Artificial Intelligence and Smart Vision for Building and Construction 4.0: Machine and Deep Learning Methods and Applications. *Automation in Construction*, 141, 104440. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104440>
- Chauhan, C., Parida, V., & Dhir, A. (2022). Linking Circular Economy and Digitalisation Technologies: A Systematic Literature Review of Past Achievements and Future Promises. *Technological Forecasting and Social Change*, 177, 121508. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121508>
- Gentile, N. (2022). Improving Lighting Energy Efficiency Through User Response. *Energy and Buildings*, 263, 112022. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112022>
- Khan, M. H., Asar, A. U., Ullah, N., Albogamy, F. R., & Rafique, M. K. (2022). Modeling and Optimization of Smart Building Energy Management System Considering Both Electrical and Thermal Load. *Energies*, 15(2), 1–28. <https://doi.org/10.3390/en15020574>
- Khan, O., Parvez, M., Seraj, M., Yahya, Z., Devarajan, Y., & Nagappan, B. (2024). Optimising Building Heat Load Prediction Using Advanced Control Strategies and Artificial Intelligence for HVAC System. *Thermal Science and Engineering Progress*, 49, 102484. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102484>
- Kim, S. I., Choi, J. S., Jo, J. H., Joe, J., Cho, Y. H., & Kim, E. J. (2023). Simulation-Based Comparative Analysis of U-Value of Field Measurement Methods. *Case Studies in Thermal Engineering*, 50, 103433. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103433>
- Mazhar, T., Malik, M. A., Haq, I., Rozeela, I., Ullah, I., Khan, M. A., Adhikari, D., Ben Othman, M. T., & Hamam, H. (2022). The Role of ML, AI and 5G Technology in Smart Energy and Smart Building Management. *Electronics*, 11(23), 1–21. <https://doi.org/10.3390/electronics11233960>
- Morkūnas, M., Wang, Y., & Wei, J. (2024). Role of AI and IoT in Advancing Renewable Energy Use in Agriculture. *Energies*, 17(23), 5984. <https://doi.org/10.3390/en17235984>
- Nutakki, M., & Mandava, S. (2023). Review on Optimization Techniques and Role of Artificial

- Intelligence in Home Energy Management Systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 119, 105721. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105721>
- Rane, N., Choudhary, S. P., & Rane, J. (2024). Acceptance of Artificial Intelligence: Key Factors, Challenges, and Implementation Strategies. *Journal of Applied Artificial Intelligence*, 5(2), 50–70. <https://doi.org/10.48185/jaai.v5i2.1017>
- Selvaraj, R., Kuthadi, V. M., & Baskar, S. (2023). Smart Building Energy Management and Monitoring System Based on Artificial Intelligence in Smart City. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 56, 103090. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103090>
- 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), 7882. <https://doi.org/10.3390/app12157882>
- Taheri, S., Hosseini, P., & Razban, A. (2022). Model Predictive Control of Heating, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC) Systems: A State-of-the-Art Review. *Journal of Building Engineering*, 60, 105067. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105067>
- Tahmasebinia, F., Lin, L., Wu, S., Kang, Y., & Sepesgozar, S. (2024). Advanced Energy Performance Modelling: Case Study of an Engineering and Technology Precinct. *Buildings*, 14(6), 1774. <https://doi.org/10.3390/buildings14061774>
- Tien, P. W., Wei, S., Darkwa, J., Wood, C., & Calautit, J. K. (2022). Machine Learning and Deep Learning Methods for Enhancing Building Energy Efficiency and Indoor Environmental Quality – A Review. *Energy and AI*, 10, 100198. <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2022.100198>
- Um-e-Habiba, Ahmed, I., Asif, M., Alhelou, H. H., & Khalid, M. (2024). A Review on Enhancing Energy Efficiency and Adaptability through System Integration for Smart Buildings. *Journal of Building Engineering*, 89, 109354. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109354>
- Xiang, Y., Chen, Y., Xu, J., & Chen, Z. (2022). Research on Sustainability Evaluation of Green Building Engineering Based on Artificial Intelligence and Energy Consumption. *Energy Reports*, 8, 11378–11391. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.08.266>
- Zhang, S., Ocloń, P., Klemeš, J. J., Michorczyk, P., Pielichowska, K., & Pielichowski, K. (2022). Renewable Energy Systems for Building Heating, Cooling and Electricity Production with Thermal Energy Storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 165(May). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112560>
- Zhang, W., Wu, Y., & Calautit, J. K. (2022). A Review on Occupancy Prediction Through Machine Learning for Enhancing Energy Efficiency, Air Quality and Thermal Comfort in The Built Environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167, 112704. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112704>
- Zhang, Y., Teoh, B. K., Wu, M., Chen, J., & Zhang, L. (2023). Data-Driven Estimation of Building Energy Consumption and GHG Emissions Using Explainable Artificial Intelligence. *Energy*, 262, 125468. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125468>