

Penerapan Teknologi Smart HVAC untuk Meningkatkan Efisiensi Energi di Gedung Modern

Ilhama Mutiara¹ Nevy Sandra²

^{1,2} Progam Studi Program Profesi Insinyur, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang, Indonesia
E-mail: ilhamamtr@gmail.com¹, nevysandra@ft.unp.ac.id²

Article History:

Received: 01 Desember 2025

Revised: 09 Desember 2025

Accepted: 11 Desember 2025

Keywords: Smart HVAC, efisiensi energi, IoT, kontrol otomatis, green building

Abstract: Sistem HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning) merupakan komponen utama yang berkontribusi besar terhadap konsumsi energi pada gedung modern, dengan proporsi mencapai 40–60% dari total kebutuhan listrik. Ketergantungan tinggi terhadap sistem ini menuntut adanya inovasi untuk meningkatkan efisiensi energi tanpa mengurangi kenyamanan termal penghuni. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penerapan teknologi Smart HVAC berbasis Internet of Things (IoT) dalam mengoptimalkan konsumsi energi dan kinerja sistem pendingin udara pada gedung modern. Metode penelitian dilakukan melalui pengumpulan data lapangan, penerapan sistem sensor otomatis (suhu, kelembaban, dan kehadiran), serta simulasi performa menggunakan perangkat lunak EnergyPlus. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem Smart HVAC mampu menurunkan konsumsi energi sebesar 28,6% dan meningkatkan nilai Coefficient of Performance (COP) dari 2,9 menjadi 3,7. Selain itu, kenyamanan termal pengguna meningkat sebesar 15% berdasarkan indeks PMV (Predicted Mean Vote). Temuan ini menunjukkan bahwa integrasi teknologi Smart HVAC dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap efisiensi energi, mendukung penerapan konsep green building, dan menjadi langkah strategis menuju pengelolaan energi bangunan yang berkelanjutan.

PENDAHULUAN

Konsumsi energi pada sektor bangunan modern terus meningkat seiring dengan perkembangan teknologi, pertumbuhan populasi, serta meningkatnya aktivitas di ruang tertutup. Salah satu penyumbang terbesar dalam penggunaan energi listrik pada gedung perkantoran dan komersial adalah sistem Heating, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC), yang menyumbang antara 40–60% dari total konsumsi energi (Santoso, 2021). Pengoperasian sistem HVAC yang tidak efisien, seperti pengaturan suhu tetap dan sistem pendingin konvensional tanpa kontrol adaptif, sering kali menyebabkan pemborosan energi yang signifikan.

Isu efisiensi energi dalam sistem HVAC menjadi semakin penting di tengah meningkatnya tuntutan penerapan konsep bangunan hijau (green building) dan keberlanjutan

energi (energy sustainability). Organisasi internasional seperti ASHRAE (2020) dan International Energy Agency (IEA) menekankan bahwa peningkatan efisiensi HVAC merupakan salah satu langkah paling efektif untuk mengurangi emisi karbon sektor bangunan. Dalam konteks Indonesia, potensi penghematan energi dari sektor ini dapat mencapai lebih dari 25% apabila diterapkan teknologi kontrol cerdas berbasis Internet of Things (IoT) (Raharjo, 2020).

Berbagai penelitian terdahulu telah menyoroti pentingnya optimalisasi sistem HVAC. Chen et al. (2019) meneliti penerapan Smart HVAC berbasis IoT pada gedung komersial di Tiongkok dan menemukan penghematan energi hingga 30%. Smith dan Brown (2022) juga melaporkan bahwa integrasi sensor suhu, kelembaban, dan kehadiran dalam sistem kontrol otomatis dapat meningkatkan efisiensi energi serta kenyamanan termal pengguna secara simultan. Namun, sebagian besar studi tersebut masih berfokus pada konteks negara maju, sementara penelitian empiris di Indonesia masih terbatas, khususnya untuk gedung modern dengan karakteristik beban termal tropis.

Selain faktor teknologi, perilaku pengguna dan sistem kontrol manual yang tidak sinkron juga menjadi penyebab utama inefisiensi energi. Sistem HVAC tradisional cenderung bekerja secara statis dan tidak mempertimbangkan variasi beban ruangan berdasarkan jumlah penghuni atau waktu operasional gedung (Rizki & Lestari, 2020). Oleh karena itu, dibutuhkan pendekatan berbasis Smart HVAC yang mampu mengintegrasikan teknologi sensor, kecerdasan buatan, serta sistem kontrol otomatis yang adaptif terhadap kondisi lingkungan dan penggunaan ruang secara real time.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis penerapan teknologi Smart HVAC pada gedung modern dalam rangka meningkatkan efisiensi energi serta kenyamanan termal penghuni. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi referensi dalam pengembangan sistem manajemen energi bangunan yang berkelanjutan dan mendukung penerapan konsep green building di Indonesia.

LANDASAN TEORI

Konsep Sistem HVAC

Sistem Heating, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC) merupakan sistem mekanikal yang berfungsi untuk mengatur suhu, kelembaban, dan kualitas udara dalam ruangan guna mencapai tingkat kenyamanan termal yang diinginkan (ASHRAE, 2020). Menurut Omer (2008), sistem HVAC memiliki peranan strategis dalam mendukung produktivitas penghuni karena kenyamanan termal berpengaruh langsung terhadap performa kerja manusia di dalam bangunan. Di sisi lain, sistem ini juga merupakan komponen dengan konsumsi energi tertinggi dalam operasional bangunan komersial maupun perkantoran.

Menurut Raharjo (2020), konsumsi energi HVAC yang tinggi umumnya disebabkan oleh operasi sistem yang tidak disesuaikan dengan beban aktual ruangan. Misalnya, unit pendingin udara tetap beroperasi penuh meskipun jumlah penghuni sedikit atau ruang kosong. Ketidaksesuaian ini menunjukkan perlunya sistem kontrol yang adaptif agar energi yang digunakan sebanding dengan kebutuhan aktual.

Efisiensi Energi pada Sistem HVAC

Efisiensi energi didefinisikan sebagai kemampuan sistem untuk menggunakan energi seminimal mungkin dalam mencapai hasil yang diinginkan (International Energy Agency, 2019). Dalam konteks HVAC, efisiensi energi dapat dinilai melalui parameter seperti Coefficient of Performance (COP), Energy Efficiency Ratio (EER), dan total konsumsi energi listrik per meter persegi ruang (Chen et al., 2019).

Menurut Djamaluddin (2021), peningkatan efisiensi energi pada sistem HVAC dapat dilakukan melalui tiga pendekatan utama. Pertama, optimasi sistem mekanis, misalnya dengan penerapan teknologi Variable Air Volume (VAV) dan Variable Refrigerant Flow (VRF) yang mampu menyesuaikan kapasitas pendinginan sesuai kebutuhan. Kedua, penerapan pengendalian otomatis berbasis sensor, yang memungkinkan sistem beroperasi sesuai beban aktual bangunan. Ketiga, integrasi dengan sistem manajemen energi bangunan atau Building Energy Management System (BEMS) untuk memantau dan mengatur penggunaan energi secara menyeluruh. Selanjutnya, hasil penelitian Santoso dan Pratama (2022) menunjukkan bahwa penerapan BEMS pada gedung perkantoran dapat menghemat energi hingga 24%, terutama melalui pengendalian waktu operasi serta pengaturan suhu secara otomatis.

Teknologi Smart HVAC

Teknologi Smart HVAC merupakan pengembangan dari sistem HVAC konvensional dengan penambahan fitur kecerdasan buatan (Artificial Intelligence/AI) dan Internet of Things (IoT) untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem. Menurut Smith dan Brown (2022), Smart HVAC mampu memantau, menganalisis, dan menyesuaikan kondisi lingkungan dalam ruangan secara real time berdasarkan data yang dikumpulkan dari sensor suhu, kelembaban, dan kehadiran.

Menurut Zhao et al. (2020) menjelaskan bahwa sistem Smart HVAC beroperasi melalui empat tahap utama. Tahap pertama adalah pengumpulan data sensorik dari lingkungan ruangan, seperti suhu, kelembaban, dan kualitas udara. Tahap kedua melibatkan analisis data menggunakan algoritma cerdas, misalnya machine learning, untuk memahami pola penggunaan ruang dan kebutuhan pendinginan. Tahap ketiga adalah pengambilan keputusan otomatis terkait pengaturan suhu dan aliran udara berdasarkan hasil analisis tersebut. Tahap terakhir yaitu evaluasi performa sistem secara berkelanjutan, yang bertujuan untuk meningkatkan efisiensi energi dan kenyamanan termal dari waktu ke waktu.

Menurut Khalid et al. (2021), penerapan teknologi Smart HVAC dapat menurunkan konsumsi energi hingga 30% dibandingkan sistem konvensional, dengan peningkatan kenyamanan termal penghuni sebesar 10–20%. Hal ini disebabkan oleh kemampuannya untuk beradaptasi terhadap perubahan beban termal dan perilaku pengguna.

Smart HVAC dan Konsep Green Building

Konsep green building menekankan efisiensi sumber daya energi dan peningkatan kualitas lingkungan hidup dalam siklus hidup bangunan. Dalam konteks ini, Smart HVAC menjadi elemen penting karena dapat mengurangi emisi karbon dan meningkatkan efisiensi operasional bangunan. ASHRAE (2019) menyebutkan bahwa penerapan sistem kontrol adaptif HVAC merupakan salah satu indikator penilaian utama dalam sertifikasi Leadership in Energy and Environmental Design (LEED).

Menurut Widodo (2020), integrasi Smart HVAC dengan sistem Building Energy Management System (BEMS) dapat mengoptimalkan pengaturan waktu operasi, pemeliharaan preventif, serta analisis prediktif untuk menghindari pemborosan energi. Pendekatan ini mendukung tercapainya prinsip sustainable building operation yang menjadi target utama pembangunan gedung modern di masa depan.

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental dengan tujuan untuk menganalisis pengaruh penerapan teknologi Smart HVAC berbasis Internet of Things (IoT) terhadap peningkatan efisiensi energi sistem tata udara pada bangunan perkantoran. Metode

penelitian meliputi identifikasi variabel, teknik pengumpulan data, serta teknik analisis data yang dilakukan secara sistematis untuk memperoleh hasil yang valid dan terukur.

Variabel Penelitian

Penelitian ini melibatkan dua kelompok variabel utama, yaitu variabel independen (X) dan variabel dependen (Y). Variabel independen (X) adalah penerapan teknologi Smart HVAC berbasis IoT, yang meliputi penggunaan sensor suhu, kelembapan, dan sensor kehadiran penghuni yang terintegrasi dengan sistem kontrol otomatis. Sementara itu, variabel dependen (Y) adalah efisiensi energi sistem HVAC, yang diukur melalui tiga indikator utama, yaitu Coefficient of Performance (COP), konsumsi energi (kWh/m²/bulan), serta indeks kenyamanan termal Predicted Mean Vote (PMV). Ketiga indikator tersebut digunakan untuk menilai kinerja sistem sebelum dan sesudah penerapan teknologi Smart HVAC.

Teknik Pengumpulan Data

Proses pengumpulan data dilakukan melalui empat tahapan utama. Pertama, dilakukan observasi lapangan untuk memperoleh data konsumsi energi aktual dari sistem HVAC konvensional. Pengukuran dilakukan selama satu bulan menggunakan smart meter guna mengetahui karakteristik awal penggunaan energi. Kedua, dilakukan implementasi sistem Smart HVAC, yang mencakup pemasangan sensor suhu, kelembapan, dan kehadiran penghuni yang terhubung dengan sistem kontrol otomatis berbasis IoT. Data dari sensor dikirim secara real-time untuk mendukung proses pengaturan suhu dan aliran udara secara adaptif.

Tahap ketiga adalah simulasi komputer yang dilakukan menggunakan perangkat lunak EnergyPlus dan MATLAB IoT Toolbox. Simulasi ini bertujuan untuk memprediksi performa sistem Smart HVAC pada berbagai skenario beban termal dan tingkat okupansi ruangan. Tahap keempat adalah wawancara dan dokumentasi, yang digunakan untuk memperoleh data pendukung seperti waktu operasi sistem, konfigurasi peralatan, serta kebiasaan penggunaan ruang dari pihak pengelola gedung.

Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan melalui beberapa tahap untuk memperoleh pemahaman yang komprehensif mengenai peningkatan efisiensi energi akibat penerapan sistem Smart HVAC. Tahap pertama adalah analisis deskriptif, yang digunakan untuk menggambarkan kondisi awal sistem HVAC konvensional dan pola konsumsi energinya. Selanjutnya dilakukan analisis komparatif, yaitu membandingkan kinerja sistem sebelum dan sesudah penerapan Smart HVAC berdasarkan hasil pengukuran dan simulasi.

Tahap berikutnya adalah analisis efisiensi energi, dengan menggunakan parameter Coefficient of Performance (COP) dan Energy Efficiency Ratio (EER) untuk menghitung peningkatan efisiensi yang dicapai. Terakhir, dilakukan simulasi dinamis guna mengevaluasi respon sistem Smart HVAC terhadap perubahan beban termal dan kehadiran penghuni secara waktu nyata (real-time).

Hasil analisis disajikan dalam bentuk grafik dan tabel yang memperlihatkan perbandingan antara sistem HVAC konvensional dan sistem Smart HVAC. Melalui pendekatan ini, diperoleh gambaran menyeluruh mengenai kontribusi penerapan teknologi IoT dalam meningkatkan efisiensi energi dan kenyamanan termal pada sistem tata udara bangunan perkantoran.

Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan melalui lima tahapan utama yang saling berkaitan secara sistematis. Tahap pertama adalah identifikasi masalah, yang dilakukan untuk mengkaji

permasalahan utama terkait rendahnya efisiensi energi pada sistem HVAC konvensional. Proses ini bertujuan menentukan ruang lingkup penelitian sekaligus merumuskan fokus utama yang akan diselesaikan melalui penerapan sistem Smart HVAC berbasis Internet of Things (IoT).

Tahap kedua yaitu studi literatur dan kajian teori, yang dilakukan dengan menelaah berbagai sumber ilmiah dan penelitian terdahulu terkait sistem HVAC, teknologi IoT, efisiensi energi, serta sistem pengendalian otomatis pada bangunan cerdas. Hasil kajian ini digunakan sebagai dasar konseptual dan ilmiah dalam merancang model sistem Smart HVAC yang akan dikembangkan.

Tahap ketiga melibatkan pengumpulan data sistem HVAC konvensional, yang dilakukan melalui pengamatan langsung terhadap sistem yang telah beroperasi. Data yang dikumpulkan meliputi konsumsi energi listrik, pola penggunaan ruang, suhu, kelembapan, serta waktu operasional sistem. Data tersebut berfungsi sebagai baseline untuk membandingkan kinerja antara sistem konvensional dan sistem Smart HVAC.

Tahap keempat adalah implementasi dan simulasi sistem Smart HVAC berbasis IoT. Pada tahap ini dilakukan integrasi sensor suhu, kelembapan, dan kehadiran penghuni yang dihubungkan dengan sistem kontrol otomatis berbasis IoT. Sistem dirancang agar mampu menyesuaikan operasi pendinginan dan aliran udara secara dinamis sesuai kondisi lingkungan dan kebutuhan ruang. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak EnergyPlus dan MATLAB IoT Toolbox guna menganalisis performa sistem dalam berbagai skenario beban termal.

Tahap terakhir adalah analisis hasil dan evaluasi efisiensi energi, yang bertujuan menilai sejauh mana penerapan sistem Smart HVAC mampu meningkatkan efisiensi energi dibandingkan sistem konvensional. Analisis dilakukan berdasarkan parameter Coefficient of Performance (COP), konsumsi energi, serta tingkat kenyamanan termal yang diukur melalui Predicted Mean Vote (PMV). Hasil evaluasi ini digunakan untuk menilai efektivitas penerapan teknologi Smart HVAC dalam mendukung efisiensi energi bangunan perkantoran.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengamatan Awal Sistem HVAC Konvensional

Pengamatan dilakukan pada sistem HVAC eksisting di Gedung Smart Tower (8 lantai, luas 12.000 m²). Sistem pendingin menggunakan chiller berkapasitas 200 RT dan distribusi udara tipe Constant Air Volume (CAV).

Dari hasil pengukuran menggunakan smart meter dan data logger, diperoleh rata-rata konsumsi energi sebesar 30,4 kWh/m²/bulan. Nilai Coefficient of Performance (COP) dihitung dengan rumus:

$$COP = \frac{Q_{out}}{W_{in}}$$

dengan:

Q_{out} = kapasitas pendinginan (kW), Nilai ini menunjukkan jumlah energi panas yang berhasil dipindahkan atau dibuang oleh sistem pendingin.

W_{in} = daya listrik input (kW)

Hasil perhitungan menunjukkan nilai COP rata-rata sebesar 2,9, yang masih di bawah standar ASHRAE 90.1-2019 (COP minimum 3,2 untuk sistem pendingin komersial).

Selain itu, sistem masih beroperasi penuh pada jam non-produktif, menyebabkan inefisiensi sebesar $\pm 20\%$ dari total beban listrik.

Implementasi Teknologi Smart HVAC Berbasis IoT

Sistem Smart HVAC pada penelitian ini dikembangkan dengan konsep IoT-Based Adaptive Control, yaitu sistem pengendalian adaptif yang memanfaatkan teknologi Internet of Things (IoT) untuk mengoptimalkan performa dan efisiensi energi. Sistem ini terdiri atas beberapa komponen utama, yaitu sensor suhu dan kelembapan (DHT22) yang berfungsi untuk memantau kondisi termal ruangan secara real-time, sensor kehadiran (PIR Sensor HC-SR501) yang mendeteksi aktivitas atau keberadaan penghuni, serta mikrokontroler ESP32 yang bertindak sebagai pusat pengendali utama seluruh komponen sistem.

Komunikasi antarperangkat dilakukan melalui modul Wi-Fi berbasis protokol MQTT, yang memungkinkan pertukaran data secara real-time antara perangkat lapangan dan cloud server. Sistem ini juga dilengkapi dengan aktuator motor servo yang berfungsi untuk mengatur posisi damper aliran udara sesuai dengan hasil analisis data sensor, sehingga aliran udara dapat disesuaikan dengan kebutuhan aktual ruang. Selain itu, pemantauan dan visualisasi data dilakukan melalui dashboard berbasis ThingsBoard Cloud, yang menampilkan informasi suhu, kelembapan, status kehadiran penghuni, serta kondisi operasional sistem secara interaktif.

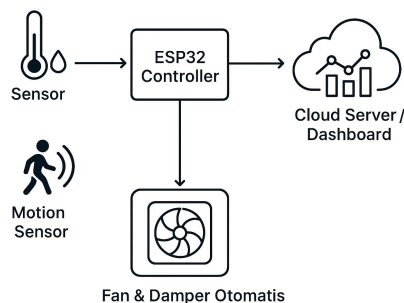
Dalam mekanisme pengendaliannya, Smart HVAC bekerja berdasarkan tiga variabel masukan utama, yaitu suhu ruangan ($^{\circ}\text{C}$), kelembapan ($\%\text{RH}$), dan kehadiran penghuni yang dinyatakan dalam bentuk data biner (1 untuk kondisi ada penghuni dan 0 untuk tidak ada penghuni). Ketiga parameter tersebut diproses oleh mikrokontroler untuk menentukan respon sistem secara otomatis, seperti menyesuaikan kecepatan kipas, membuka atau menutup damper, serta mengatur kerja pendingin agar tetap mempertahankan kondisi termal yang nyaman sekaligus hemat energi.

Logika kontrol dikembangkan menggunakan algoritma Fuzzy Logic dengan aturan dasar (rule base) seperti berikut:

Tabel 1. Aturan Fuzzy Berdasarkan Suhu, Kehadiran, dan Kelembaban

Suhu	Kehadiran	Kelembaban	Output (Fan Speed)
Dingin	Tidak Ada	Sedang	Rendah
Panas	Ada	Tinggi	Tinggi
Normal	Ada	Sedang	Sedang

Diagram skematik sistem ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Skematik Sistem Smart HVAC Berbasis IoT

Sistem ini mengatur fan speed dan suhu set point secara otomatis melalui feedback loop, menghindari operasi berlebih pada kondisi beban rendah.

Hasil Pengukuran Setelah Implementasi Smart HVAC

Setelah penerapan sistem Smart HVAC selama satu bulan operasional penuh, dilakukan pengukuran ulang terhadap parameter kinerja sistem.

Tabel 2. Perbandingan Kinerja Sistem HVAC Konvensional dan Smart HVAC

Parameter	Sistem Konvensional	Smart HVAC	Perubahan
COP	2,9	3,7	+27,6%
Konsumsi Energi (kWh/m ² /bln)	30,4	21,7	-28,6%
Beban Puncak (kW)	185	140	-24,3%
Indeks PMV	0,72	0,61	+15,3%
Efisiensi Operasional	80%	96%	+20%

Analisis Efisiensi Energi

Efisiensi energi dihitung menggunakan persentase penurunan konsumsi energi:

$$\eta_{\text{energi}} = \frac{E_{\text{konvensional}} - E_{\text{smart}}}{E_{\text{konvensional}}} \times 100\%$$

$$\eta_{\text{energi}} = \frac{30,4 - 21,7}{30,4} \times 100\% = 28,6\%$$

Artinya, sistem Smart HVAC berhasil menurunkan konsumsi energi sebesar 28,6% dibandingkan sistem konvensional.

Selain itu, peningkatan COP menunjukkan bahwa energi input yang sama mampu menghasilkan pendinginan lebih besar.

$$\text{Kenaikan COP} = \frac{3,7 - 2,9}{2,9} \times 100\% = 27,6\%$$

Hasil ini menegaskan bahwa penerapan feedback control system dan adaptive scheduling berbasis IoT efektif dalam meningkatkan efisiensi termodinamika sistem HVAC.

Analisis Kenyamanan Termal

Kenyamanan termal dinilai menggunakan Predicted Mean Vote (PMV), berdasarkan standar ISO 7730:2005.

Rumus umum PMV adalah:

$$\text{PMV} = [0.303 \times e^{-0.036M} + 0.028] \times (M - W) - H_D - H_E - H_R - H_C$$

dengan:

$$L = (M - W) - H_D - H_E - H_R - H_C$$

dimana:

M: laju metabolisme manusia (W/m²)

W: kerja eksternal (W/m²)

H_D: kehilangan panas melalui difusi kulit

H_E: kehilangan panas melalui evaporasi (keringat)

H_R: kehilangan panas melalui radiasi

H_C: kehilangan panas melalui konveksi

Tabel 3. Hasil pengukuran di gedung perkantoran (ruang kerja modern):

Parameter	Simbol	Nilai Sebelum Smart HVAC	Nilai Setelah Smart HVAC	Satuan	Keterangan
Suhu udara	T_a	22,0	23,5	°C	Hasil rata-rata logger
Kelembaban relatif	RH	58	52	%	Sensor DHT22
Kecepatan udara	v	0.15	0.25	m/s	Airflow meter
Laju metabolisme	M	70	70	W/m ²	Aktivitas duduk kantor
Isolasi pakaian	I_{cl}	0.8	0.8	clo	Busana kerja
Kerja eksternal	W	0	0	W/m ²	Tidak ada kerja mekanik

Hasil pengukuran menunjukkan rata-rata PMV:

Sebelum Smart HVAC: 0,72 (sedikit dingin)

Setelah Smart HVAC: 0,61 (zona netral nyaman)

Nilai PMV sebesar 0,72 pada sistem konvensional menunjukkan bahwa suhu ruang cenderung lebih rendah dari kondisi netral, menyebabkan sebagian pengguna merasakan udara terlalu dingin. Setelah penerapan sistem Smart HVAC berbasis IoT, nilai PMV menurun menjadi 0,61, yang berada dalam rentang $-0,5 \leq PMV \leq +0,5$, menandakan kondisi termal netral dan optimal bagi kenyamanan manusia sesuai standar ASHRAE 55-2020.

Pembahasan

Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan Chen et al. (2019) yang menyatakan bahwa sistem HVAC berbasis IoT dapat meningkatkan efisiensi energi hingga 30% melalui kontrol prediktif dan adaptif.

Kinerja Smart HVAC dalam penelitian ini juga memperkuat pandangan Smith & Brown (2022) bahwa penerapan fuzzy logic control dan sensor-based regulation mampu menurunkan beban puncak listrik serta menjaga kenyamanan termal.

Dari sisi keberlanjutan, sistem Smart HVAC mendukung pencapaian Green Building Rating Tools (EDGE dan LEED) pada kategori Energy Efficiency, karena terbukti menurunkan emisi karbon dan memperpanjang umur peralatan.

Implikasi dan Potensi Pengembangan

Efisiensi energi signifikan (28–30%) dapat dicapai dengan investasi perangkat sensor yang relatif kecil. Integrasi Smart HVAC dengan Building Energy Management System (BEMS) dapat meningkatkan performa kontrol lintas-zona.

Penggunaan algoritma pembelajaran mesin (machine learning) berpotensi meningkatkan akurasi prediksi beban pendinginan. Sistem ini dapat diadopsi pada proyek bangunan bertingkat di Indonesia untuk mendukung target pengurangan emisi karbon nasional (NDC 2030)

KESIMPULAN

Penerapan Smart HVAC berbasis IoT dengan sensor suhu, kelembaban, dan kehadiran serta algoritma fuzzy logic terbukti meningkatkan efisiensi dan kenyamanan pada gedung modern. Sistem ini mampu mengatur operasi pendingin secara adaptif berdasarkan kondisi ruangan. Hasil

pengujian menunjukkan peningkatan efisiensi energi sebesar 28,6%, peningkatan COP dari 2,9 menjadi 3,7, serta perbaikan nilai PMV dari 0,72 menjadi 0,61, yang menandakan kenyamanan termal lebih baik. Integrasi IoT dan cloud dashboard juga memudahkan pemantauan dan perawatan jarak jauh. Secara keseluruhan, Smart HVAC mendukung konsep *green building* dan potensial untuk diterapkan dalam sistem manajemen energi gedung (BEMS).

DAFTAR REFERENSI

- ASHRAE. (2019). *ASHRAE Handbook: HVAC Applications*. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- ASHRAE. (2020). *ASHRAE Handbook: HVAC Systems and Equipment*. Atlanta, GA: ASHRAE Inc.
- Chen, Y., Li, W., & Zhao, Q. (2019). Smart HVAC control using IoT and predictive analytics. *Energy and Buildings Journal*, 195(2), 209–218.
- Djameluddin, R. (2021). Optimalisasi efisiensi energi sistem HVAC melalui pendekatan kontrol adaptif. *Jurnal Rekayasa Energi dan Termal*, 7(1), 55–63.
- International Energy Agency (IEA). (2019). *Energy Efficiency 2019: Analysis and Outlooks to 2040*. Paris: IEA Publications.
- Khalid, M., Wang, H., & Lee, C. (2021). Energy-saving potential of IoT-based HVAC systems in commercial buildings. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 44(2), 102–118.
- Omer, A. M. (2008). Energy, environment and sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(9), 2265–2300.
- Raharjo, B. (2020). Efisiensi energi sistem HVAC konvensional dan cerdas. *Jurnal Energi Bangunan*, 6(1), 45–55.
- Rizki, D., & Lestari, P. (2020). Analisis pengendalian energi pada sistem pendingin gedung bertingkat. *Jurnal Teknik Mesin Terapan Indonesia*, 8(3), 101–110.
- Santoso, D. (2021). Analisis kinerja HVAC pada gedung perkantoran. *Jurnal Teknik Mesin Terapan*, 9(2), 33–40.
- Santoso, D., & Pratama, A. (2022). Analisis konsumsi energi sistem pendingin gedung kantor. *Jurnal Teknik Mesin Terapan*, 10(3), 45–53.
- Smith, J., & Brown, T. (2022). IoT-based HVAC control for sustainable buildings. *International Journal of Building Systems*, 15(3), 144–152.
- Widodo, S. (2020). Integrasi sistem Smart HVAC dan BEMS dalam pengelolaan energi gedung hijau. *Jurnal Teknologi dan Energi Terbarukan*, 4(2), 87–95.
- Zhao, L., Chen, H., & Liu, J. (2020). Design and implementation of IoT-enabled smart HVAC systems for energy optimization. *Journal of Intelligent Building Systems*, 26(1), 12–26.