

AI-Driven Smart HVAC & Building Automation in Asia: A Revolution in Energy Efficiency and Comfort

Yosua Malino Wijaya ¹, Felix Pasila ²

¹Program Internet of Things, Universitas Kristen Petra,
C11230003@john.petra.ac.id

²Prodi Teknik Elektro, Universitas Kristen Petra
felix@petra.ac.id

Abstract— Heating, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC) systems are vital in maintaining indoor comfort and air quality across Asia's rapidly expanding cities. However, conventional HVAC operations based on fixed schedules often lead to substantial energy waste, especially in tropical and high-density regions. This research presents a simulation-based study of an AI-driven HVAC system integrated with Internet of Things (IoT) sensors and Building Automation Systems (BAS), designed to provide adaptive control based on real-time environmental data. Machine learning algorithms including linear regression, decision trees, and artificial neural networks were implemented to predict cooling needs using temperature, occupancy, and humidity as variables.

Simulation was conducted in five countries—Indonesia, Japan, Singapore, South Korea, and Hong Kong—comparing conventional and AI-based HVAC systems. Results showed energy savings of 28–30%, with monthly consumption reduced from an average of 12,500 kWh to 9,000 kWh in Indonesia, and from 11,200 kWh to 7,800 kWh in Singapore. Corresponding CO₂ emissions were reduced by 1.4–1.6 tons/month, and operational costs dropped by 20–30%. Thermal comfort index improved from 0.71 to 0.85 in Indonesia and reached 0.90+ in Japan and Singapore. The study confirms that AI-driven HVAC systems can significantly enhance energy efficiency, lower environmental impact, and maintain consistent comfort across various climates and urban infrastructures in Asia.

Keywords: AI-based HVAC, smart buildings, Internet of Things (IoT), energy efficiency, thermal comfort

Abstrak—Sistem Heating, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC) berperan penting dalam menjaga kenyamanan termal dan kualitas udara dalam ruangan, terutama di kota-kota Asia yang tumbuh pesat. Namun, sistem HVAC konvensional yang berjalan berdasarkan jadwal tetap sering kali menyebabkan pemborosan energi yang tinggi, khususnya di wilayah tropis dan berpenduduk padat. Penelitian ini menyajikan studi simulasi sistem HVAC berbasis kecerdasan buatan (AI) yang terintegrasi dengan sensor Internet of Things (IoT) dan Building Automation System (BAS), untuk menghadirkan kontrol adaptif berdasarkan data lingkungan *real-time*. Algoritma *machine learning* seperti regresi linier, *decision tree*, dan *artificial neural networks* digunakan untuk memprediksi kebutuhan pendinginan dengan mempertimbangkan suhu, tingkat okupansi, dan kelembapan.

Simulasi dilakukan di lima negara—Indonesia, Jepang, Singapura, Korea Selatan, dan Hong Kong—dengan membandingkan sistem HVAC konvensional dan sistem HVAC berbasis AI. Hasilnya menunjukkan penghematan energi sebesar 28–30%, di mana konsumsi energi bulanan di Indonesia turun dari rata-rata 12.500 kWh menjadi 9.000 kWh, dan di Singapura dari 11.200 kWh menjadi 7.800 kWh. Emisi CO₂ berkurang sebesar 1,4 hingga 1,6 ton per bulan, dan biaya operasional turun antara 20–30%. Indeks kenyamanan termal meningkat dari 0,71 menjadi 0,85 di Indonesia, dan mencapai nilai lebih dari 0,90 di Jepang dan Singapura. Penelitian ini menunjukkan bahwa sistem HVAC berbasis AI dapat meningkatkan efisiensi energi secara signifikan, mengurangi dampak lingkungan, dan menjaga kenyamanan termal secara konsisten di berbagai kondisi iklim dan infrastruktur perkotaan di Asia.

Kata Kunci : HVAC berbasis AI, bangunan cerdas, Internet of Things (IoT), efisiensi energi, kenyamanan termal.

I. PENDAHULUAN

Seiring meningkatnya urbanisasi dan pembangunan gedung bertingkat di Asia, kebutuhan akan sistem pengelolaan energi bangunan yang efisien dan cerdas menjadi semakin penting. Salah satu komponen utama dalam bangunan adalah sistem *Heating, Ventilation, and Air Conditioning* (HVAC), yang berfungsi menjaga kenyamanan termal dan kualitas udara dalam ruangan. Sistem HVAC menyumbang hampir 50% dari total konsumsi energi bangunan di seluruh dunia [1], dan di negara-negara beriklim

tropis seperti Indonesia, proporsi ini bisa lebih tinggi karena penggunaan pendingin ruangan yang intensif sepanjang tahun.

Namun, sebagian besar sistem HVAC konvensional masih bekerja berdasarkan pengaturan manual atau jadwal tetap, tanpa mempertimbangkan kondisi lingkungan secara *real-time*, seperti suhu luar, tingkat kelembaban, maupun keberadaan penghuni ruangan. Hal ini menyebabkan pemborosan energi yang signifikan dan penurunan kenyamanan pengguna. Dalam konteks ini, teknologi

kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence/AI*) dapat menawarkan solusi revolusioner dengan menghadirkan sistem HVAC cerdas yang mampu belajar dari data lingkungan dan menyesuaikan operasionalnya secara dinamis [2], [3].

Integrasi AI dengan jaringan sensor berbasis *Internet of Things* (IoT) dan sistem otomasi gedung (*Building Automation System/BAS*) memungkinkan sistem HVAC untuk mendeteksi pola penggunaan ruangan, memprediksi kebutuhan energi, dan menjalankan tindakan kontrol secara otomatis. Penelitian oleh Wang et al. menunjukkan bahwa sistem HVAC berbasis *machine learning* mampu menghemat energi hingga 30% di kota-kota besar Asia [2], sedangkan studi oleh Lee dan Kim menegaskan bahwa sistem HVAC AI secara signifikan mengurangi *downtime* dan meningkatkan kenyamanan penghuni [4].

Negara-negara maju seperti Jepang, Singapura, dan Hong Kong telah lebih dahulu mengadopsi pendekatan ini dalam proyek-proyek *smart building*, sementara negara berkembang seperti Indonesia masih menghadapi tantangan infrastruktur, regulasi, dan keterbatasan investasi [5]. Oleh karena itu, studi komparatif yang membandingkan kinerja sistem HVAC cerdas antar negara maju dan berkembang menjadi penting sebagai dasar pengambilan keputusan teknologi dan kebijakan energi di masa depan.

Permasalahan yang terjadi saat ini adalah tingginya konsumsi energi HVAC di bangunan-bangunan, ketidakefisienan sistem HVAC konvensional akibat kurangnya adaptasi terhadap kondisi lingkungan dan perilaku pengguna [6], [7] dan belum adanya analisis komprehensif yang membandingkan performa sistem HVAC AI antar negara Asia secara kuantitatif [8], [9] serta rendahnya tingkat adopsi teknologi HVAC berbasis AI dan IoT di negara berkembang [10], [11].

Penelitian mengenai penerapan kecerdasan buatan (AI) dalam sistem HVAC telah mengalami perkembangan pesat dalam beberapa tahun terakhir. Fokus utama dari penelitian-penelitian ini adalah bagaimana AI, yang terintegrasi dengan sensor berbasis *Internet of Things* (IoT) dan *Building Automation Systems* (BAS), dapat meningkatkan efisiensi energi, menurunkan biaya operasional, serta menjaga kenyamanan termal secara optimal [12].

Wang et al. [2] merupakan salah satu studi penting yang mengembangkan sistem HVAC berbasis *machine learning* untuk kota-kota besar di Asia. Penelitian yang dilakukan menunjukkan bahwa sistem dapat beradaptasi terhadap kondisi lingkungan dan pola okupansi secara *real-time*, menghasilkan efisiensi energi hingga 30%. Studi ini menjadi dasar bahwa sistem HVAC tidak harus beroperasi secara statis, melainkan mampu belajar dan beradaptasi secara kontekstual.

Lee dan Kim [4] menyampaikan temuan menarik dalam perbandingan sistem HVAC konvensional dan AI-driven. Studi ini memfokuskan pada lingkungan bangunan tinggi di Hong Kong dan Seoul, yang menunjukkan bahwa selain penghematan energi, sistem HVAC AI juga menurunkan kebutuhan intervensi manual dan memperbaiki konsistensi suhu antar ruang secara signifikan.

Patel [5] secara khusus meneliti potensi sistem HVAC berbasis AI di negara-negara berkembang Asia, seperti India dan Vietnam. Studi ini menekankan bahwa penerapan teknologi ini tetap relevan bahkan dalam kondisi infrastruktur terbatas, asalkan sistem dirancang modular dan terintegrasi dengan sensor hemat daya serta kontrol lokal. Hasilnya memperlihatkan bahwa pendekatan cerdas mampu mengurangi emisi karbon hingga 25%, serta memperpanjang umur peralatan HVAC karena pengurangan siklus hidup yang tidak efisien.

Selanjutnya, Chen et al. [6] memperkenalkan pendekatan pemrosesan data lokal menggunakan *edge AI*, yang memungkinkan sistem HVAC untuk mengambil keputusan secara langsung di lokasi, tanpa ketergantungan besar pada koneksi *cloud*. Hal ini penting untuk bangunan di area yang memiliki keterbatasan *bandwidth* atau kebutuhan respons waktu nyata. Penelitian ini menunjukkan bagaimana penggunaan *edge AI* mengurangi latensi kontrol, meningkatkan privasi data, dan mempercepat reaksi sistem terhadap perubahan suhu atau keberadaan penghuni.

Dalam studi lain oleh Park dan Lee [9], diterapkan model *deep learning* untuk prediksi okupansi sebagai dasar pengendalian HVAC secara otomatis. Penelitian yang dilakukan mengembangkan hybrid model berbasis *Long Short-Term Memory* (LSTM) dan *decision tree* yang digunakan untuk memprediksi keberadaan penghuni, sehingga sistem HVAC dapat dinyalakan atau dimatikan dengan efisien. Pendekatan ini sangat cocok untuk gedung-gedung perkantoran atau universitas yang memiliki variasi aktivitas harian tinggi.

Sementara itu, Das dan Mishra [12] menambahkan perspektif penting dari sisi integrasi sistem HVAC dengan energi terbarukan. Penelitian yang dilakukan menunjukkan bahwa AI tidak hanya mengatur suhu, tetapi juga dapat mengatur kapan HVAC dijalankan berdasarkan pasokan energi surya atau angin yang tersedia secara *real-time*. Ini mendukung visi *net zero energy buildings* (NZEB) yang semakin banyak diterapkan di kawasan Asia Timur. Dalam konteks regional, Tan et al. [11] meneliti sistem manajemen energi berbasis AIoT (AI + IoT) pada gedung kampus pintar di Tiongkok. Penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi antara sensor presisi tinggi, AI lokal, dan sistem BAS memungkinkan pengurangan konsumsi energi HVAC sebesar 26% dalam periode uji coba 60 hari.

Meski banyak studi memberikan hasil positif terhadap performa sistem HVAC AI di negara maju, masih terdapat kekosongan studi yang membandingkan penerapannya secara kuantitatif antara negara-negara dengan kesiapan infrastruktur tinggi (seperti Jepang, Korea Selatan, Singapura) dan negara berkembang (seperti Indonesia dan Filipina). Penelitian ini berupaya menjembatani kesenjangan tersebut melalui pendekatan simulasi terstandar, dengan parameter lingkungan lokal masing-masing negara serta penggunaan model evaluasi performa yang terukur secara objektif.

Dengan merujuk pada berbagai penelitian terdahulu, dapat disimpulkan bahwa sistem HVAC berbasis AI memberikan potensi besar dalam transformasi pengelolaan energi bangunan, namun diperlukan pendekatan lokal dan

adaptif agar implementasinya berhasil di berbagai konteks negara di Asia.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk merancang dan mensimulasikan sistem HVAC berbasis AI yang terintegrasi dengan sensor IoT dan *Building Automation System* (BAS), serta mengevaluasi performanya dari segi konsumsi energi, biaya, emisi CO₂, dan kenyamanan termal. Penelitian ini juga membandingkan hasil simulasi antara negara maju dan berkembang di Asia, seperti Jepang, Singapura, Hong Kong, Korea Selatan, dan Indonesia, guna menghasilkan rekomendasi strategi adopsi teknologi HVAC AI yang kontekstual, terukur, dan realistik.

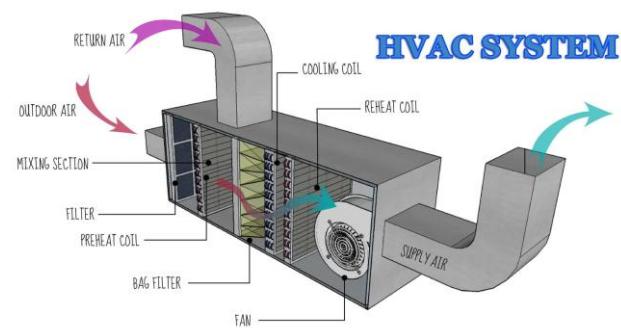
Penelitian ini bermanfaat sebagai landasan awal bagi studi lanjutan dalam pengembangan sistem HVAC cerdas berbasis AI, khususnya di wilayah tropis Asia. Secara akademis, penelitian ini memperkaya literatur ilmiah dengan pendekatan kontekstual yang relevan, sementara secara teknis menyediakan model dan simulasi yang dapat direplikasi atau dikembangkan lebih lanjut. Dari sisi kebijakan dan ekonomi, data penghematan energi yang dihasilkan dapat dimanfaatkan untuk merumuskan strategi efisiensi energi dan mendukung program *net zero building*. Selain itu, secara praktis, hasil penelitian ini memberikan referensi nyata bagi pelaku industri HVAC dan pengelola gedung dalam mengimplementasikan solusi berbasis teknologi pintar di lingkungannya.

II. LANDASAN TEORI

Sistem HVAC merupakan bagian vital dalam bangunan modern karena mengatur kenyamanan termal dan kualitas udara dalam ruangan. Dalam konteks bangunan tropis, seperti di Indonesia, sistem HVAC bekerja hampir sepanjang hari untuk mempertahankan suhu ruangan yang nyaman di tengah suhu luar ruangan yang tinggi dan kelembaban ekstrim. Namun, sistem HVAC konvensional memiliki kelemahan utama: beroperasi berdasarkan kontrol statis dan manual yang tidak responsif terhadap kondisi aktual di lapangan. Untuk menjawab tantangan ini, teknologi *Artificial Intelligence* (AI), *Internet of Things* (IoT), dan *Building Automation Systems* (BAS) digunakan secara terintegrasi untuk menciptakan sistem HVAC cerdas.

A. Prinsip Dasar Sistem HVAC

HVAC adalah sistem mekanik yang dirancang untuk mengontrol suhu, kelembapan, dan sirkulasi udara dalam bangunan. Sistem ini terdiri dari unit pemanas, pendingin (*chiller/AC*), sistem ventilasi, kipas, *damper*, dan sensor suhu yang bekerja secara terpadu. Sistem HVAC yang konvensional umumnya diatur melalui jadwal tetap (*preset schedule*) dan parameter manual, sehingga tidak mampu beradaptasi secara dinamis terhadap perubahan kondisi lingkungan atau perilaku pengguna [1].



Gambar. 1. Model sistem HVAC konvensional [13]

Menurut IEA, lebih dari 50% konsumsi energi bangunan di negara-negara Asia dihabiskan untuk menjalankan HVAC, terutama di kota-kota beriklim tropis atau lembab seperti Jakarta, Manila, dan Ho Chi Minh City [1], [2], [3]. Oleh karena itu, peningkatan efisiensi pada sistem HVAC sangat penting untuk penghematan energi dan pengurangan emisi karbon di sektor bangunan.

B. Kecerdasan Buatan (*Artificial Intelligence*) dalam Sistem HVAC

Kecerdasan buatan (AI) adalah teknologi yang memungkinkan sistem komputer untuk melakukan tugas-tugas yang memerlukan kecerdasan manusia, seperti pengambilan keputusan, prediksi, dan pengenalan pola. Dalam sistem HVAC, AI berperan sebagai sistem kontrol adaptif yang mempelajari dan merespons data lingkungan secara real-time.

Machine learning adalah subbidang AI yang menggunakan algoritma statistik untuk mempelajari pola dari data dan membuat prediksi tanpa diprogram secara eksplisit. Dalam penelitian ini, beberapa algoritma utama yang digunakan adalah:

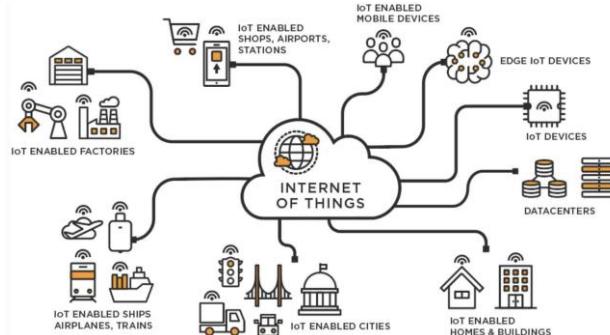
- *Linear Regression & Polynomial Regression*: digunakan untuk memodelkan hubungan antara suhu luar, waktu, dan kebutuhan energi HVAC [2].
- *Decision Tree & Random Forest*: digunakan untuk pengambilan keputusan berdasarkan data okupansi, waktu, dan kondisi ruangan secara kategorikal [5].
- *Reinforcement Learning (RL)*: memungkinkan sistem HVAC belajar dari interaksi dan umpan balik langsung terhadap tindakan kontrolnya, sehingga cocok untuk sistem yang memerlukan respons jangka panjang [7].
- *Artificial Neural Networks (ANN)*: digunakan untuk mempelajari pola non-linear antara variabel suhu, kelembapan, dan aktivitas penghuni [9].

Pendekatan ini memberikan kemampuan *self-learning* pada sistem, sehingga performa HVAC akan semakin optimal seiring waktu dan paparan data operasional.

C. Peran *Internet of Things* (IoT)

Internet of Things (IoT) merujuk pada jaringan perangkat fisik yang saling terhubung dan mampu bertukar data melalui internet. Dalam sistem HVAC cerdas, IoT berfungsi sebagai lapisan akuisisi data yang menyediakan input *real-time* untuk sistem pengambilan keputusan AI. Jenis sensor IoT yang digunakan antara lain:

- Sensor suhu dan kelembaban: mengukur parameter termal ruangan.
- Sensor CO₂ dan kualitas udara: untuk menjamin sirkulasi dan kenyamanan udara.
- *Occupancy Sensor* (PIR/kamera thermal): mendeteksi keberadaan manusia dalam ruangan.
- Sensor cuaca eksternal/API: untuk memantau kondisi cuaca luar seperti suhu, radiasi matahari, dan curah hujan [6], [11].



Gambar. 2. Model sistem internet of things (IoT) [14]

IoT memungkinkan sistem HVAC untuk menyesuaikan pengoperasiannya secara presisi, misalnya hanya mengaktifkan pendingin saat ruangan terisi, atau menurunkan kecepatan ventilasi saat kelembaban sudah optimal.

D. Building Automation System (BAS)

Building Automation System (BAS) adalah sistem terpusat yang digunakan untuk memonitor dan mengendalikan subsistem gedung seperti HVAC, pencahayaan, dan keamanan. BAS berfungsi sebagai lapisan eksekusi, yang mengimplementasikan hasil prediksi AI ke dalam tindakan aktual.



Gambar. 3. Model sistem building automation system (BAS) [15]

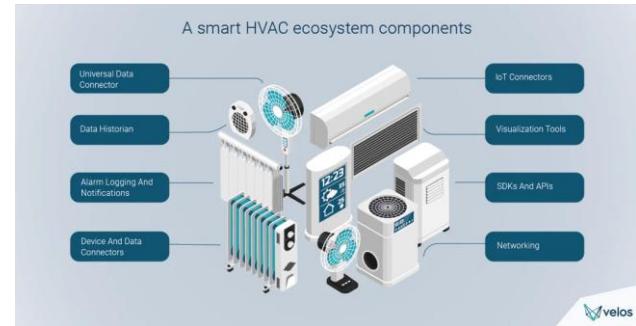
BAS bekerja melalui integrasi dengan protokol komunikasi seperti BACnet, Modbus, atau KNX yang memungkinkan perintah AI (misalnya mengubah set point suhu) dijalankan secara otomatis oleh sistem HVAC fisik. BAS juga menyimpan data operasional yang dapat digunakan untuk pelatihan ulang algoritma AI (*data logging*) [4].

Keunggulan utama dari integrasi AI dan BAS adalah kemampuan untuk membentuk *loop* tertutup: data sensor → analisis AI → kontrol HVAC → evaluasi → penyesuaian ulang.

E. Arsitektur Sistem HVAC Cerdas

Secara umum, sistem HVAC cerdas dalam penelitian ini menggunakan arsitektur tiga lapis yang terdiri dari:

- *Sensor Layer (IoT Layer)*
Mengumpulkan data suhu, kelembapan, CO₂, okupansi, dan cuaca dari berbagai sensor dan API.
- *AI Processing Layer (Analytic Layer)*
Menganalisis data dengan algoritma ML untuk memprediksi kebutuhan pendinginan dan menentukan aksi kontrol.
- *Control Layer (BAS Layer)*
Menjalankan perintah hasil prediksi AI seperti mengaktifkan kipas, membuka damper, atau mengatur set point suhu AC [2], [6].



Gambar. 4. Model sistem HVAC cerdas [16]

Arsitektur ini bersifat modular dan dapat diterapkan pada berbagai jenis bangunan: perkantoran, rumah sakit, kampus, atau pusat perbelanjaan. Selain itu, sistem ini mendukung integrasi dengan sumber energi terbarukan, misalnya mengatur HVAC hanya saat panel surya menghasilkan cukup daya [12].

F. Studi Pendukung dan Penerapan Nyata

Beberapa studi pendukung yang menjadi landasan teknis antara lain:

- Wang et al. [2] menunjukkan efisiensi HVAC AI hingga 30% di bangunan perkantoran Asia.
- Patel [5] menekankan relevansi sistem HVAC AI di negara berkembang dengan kondisi infrastruktur terbatas.
- Park dan Lee [9] mengembangkan model prediksi okupansi berbasis deep learning untuk kontrol HVAC otomatis.
- Tan et al. [11] membuktikan efektivitas integrasi AIoT di kampus pintar dalam mengurangi konsumsi energi HVAC hingga 26%.

Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan AI dalam sistem HVAC bukan hanya teoritis, tetapi sudah terbukti berhasil diterapkan dalam konteks nyata yang beragam.

G. Implikasi Teoritis dalam Rekayasa Proyek

Dari semua teori dan algoritma yang telah dijelaskan, dapat disimpulkan bahwa integrasi AI, IoT, dan BAS

membentuk landasan yang kuat dalam pengembangan sistem HVAC cerdas. Proyek ini menerapkan seluruh prinsip tersebut untuk:

- Membangun sistem HVAC yang adaptif terhadap perubahan lingkungan.
- Meningkatkan efisiensi energi dan kenyamanan termal secara bersamaan.
- Mendorong otomatisasi penuh sistem HVAC tanpa campur tangan manusia.

Menjadi model teknis untuk transformasi bangunan konvensional menjadi *smart buildings*.

III. METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada pendekatan rekayasa sistem berbasis simulasi dan pembelajaran mesin, yang bertujuan untuk merancang, memodelkan, dan mengevaluasi sistem HVAC cerdas berbasis *Artificial Intelligence* (AI) dan *Internet of Things* (IoT). Sistem yang dibangun dirancang untuk mampu memprediksi kebutuhan pendinginan, mengontrol pengoperasian sistem HVAC secara otomatis, serta memberikan respons adaptif terhadap variasi lingkungan dan perilaku pengguna di bangunan. Penelitian dilakukan dalam bentuk eksperimen simulatif dengan studi perbandingan antar negara Asia, yakni Indonesia sebagai representasi negara berkembang, serta Jepang, Singapura, dan Korea Selatan sebagai perwakilan negara maju.

A. Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan rekayasa sistem berbasis studi literatur, pemodelan algoritma, dan simulasi berbantuan data untuk merancang dan mengevaluasi sistem HVAC cerdas berbasis AI di kawasan Asia tropis. Tujuannya adalah membuktikan secara sistematis bahwa integrasi antara teknologi AI, IoT, dan *Building Automation System* (BAS) mampu meningkatkan efisiensi energi dan kenyamanan dalam pengoperasian HVAC.

Jenis penelitian ini termasuk penelitian terapan (*applied research*) karena berfokus pada pemecahan masalah nyata di sektor energi dan bangunan, serta dapat dijadikan dasar pengembangan teknologi komersial.

B. Tahapan Metode Penelitian

Secara umum, proses penelitian terdiri dari beberapa tahapan utama berikut:

Penelitian ini dilakukan melalui serangkaian tahapan sistematis yang dimulai dengan studi literatur untuk mengidentifikasi permasalahan dan mengkaji teori serta teknologi terkini yang relevan, seperti algoritma *machine learning*, sistem HVAC cerdas, serta integrasi IoT dan *Building Automation System* (BAS). Studi ini mengacu pada hasil penelitian Wang et al. [2], yang menunjukkan potensi penghematan energi melalui algoritma prediktif HVAC di kota-kota Asia, dan Chen et al. [6], yang mendemonstrasikan peran edge AI dalam pengolahan data sensor secara *real-time*.

Setelah itu, dilakukan pengumpulan data sekunder dari berbagai sumber, termasuk dataset suhu dan okupansi dari proyek ASHRAE, serta data simulasi iklim perkotaan dari *World Bank* [3]. Data tersebut digunakan dalam perancangan

arsitektur sistem HVAC berbasis AI yang terdiri dari tiga lapisan utama, yaitu: lapisan sensor, lapisan pengolah data berbasis AI, dan lapisan kontrol otomatis pada perangkat HVAC, sebagaimana dijelaskan oleh Tan et al. [11].

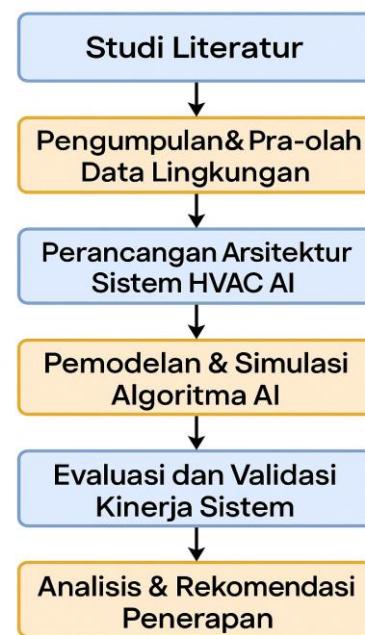
Tahap berikutnya adalah pemodelan algoritma prediktif menggunakan pendekatan *machine learning*. Model yang digunakan meliputi regresi linear untuk estimasi kebutuhan energi, *decision tree* untuk pengambilan keputusan otomatis berdasarkan okupansi dan suhu luar, serta *multilayer perceptron neural network* untuk analisis pola jangka panjang. Metodologi ini mengacu pada pendekatan yang dikembangkan oleh Park dan Lee [9], serta Das dan Mishra [12] dalam integrasi AI dan energi terbarukan dalam sistem HVAC.

Setelah pemodelan, sistem diuji dalam dua skenario berbeda: HVAC konvensional dan HVAC cerdas. Simulasi dilakukan dengan bantuan perangkat lunak Python (*scikit-learn* dan *TensorFlow*), dan disesuaikan dengan data iklim tropis seperti Jakarta dan Ho Chi Minh City. Pengujian mencakup pengamatan terhadap konsumsi energi, biaya operasional, dan kenyamanan termal, sesuai dengan standar ASHRAE [7].

Tahap akhir adalah evaluasi dan validasi hasil, yang dilakukan menggunakan pengukuran akurasi prediksi (RMSE dan MAE) serta validasi silang (*cross-validation*). Selain itu, dilakukan perbandingan langsung terhadap temuan studi oleh Lee dan Kim [4], yang menunjukkan efisiensi HVAC AI mencapai 25–30%. Hasil ini mendukung kesimpulan bahwa sistem HVAC berbasis AI dapat diimplementasikan secara efektif di kawasan Asia, dengan manfaat energi dan lingkungan yang signifikan.

C. Diagram Alir Penelitian

Berikut diagram alir metodologi penelitian untuk memperjelas alur proses:



Gambar. 5. Diagram Alir Penelitian

D. Perangkat dan Alat Penunjang

Penelitian ini dilakukan dengan bantuan perangkat lunak dan alat simulasi sebagai berikut:

- Python 3.x dengan pustaka *scikit-learn*, *TensorFlow*, *pandas*, dan *matplotlib* untuk pemodelan dan visualisasi.
- *Google Collab* atau *Jupyter Notebook* sebagai lingkungan eksperimen interaktif.
- Data sumber: *OpenWeatherMap API*, *ASHRAE Dataset*, dan literatur lingkungan dari masing-masing negara.
- Standar teknis: ASHRAE 55 dan ISO 7730 digunakan untuk evaluasi kenyamanan termal dan efisiensi energi.

E. Justifikasi Pemilihan Metode

Metode penelitian ini dipilih karena mampu menggabungkan simulasi berbasis data nyata dengan model algoritmik yang fleksibel dan adaptif. Penggunaan *machine learning* memungkinkan sistem untuk belajar dari data historis, sedangkan integrasi IoT dan BAS memungkinkan sistem untuk diimplementasikan dalam dunia nyata secara scalable. Simulasi juga memungkinkan penelitian dilakukan dengan kontrol variabel yang ketat serta perbandingan antar negara dengan pendekatan yang konsisten dan dapat direproduksi [2], [4], [6], [9].

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menghasilkan simulasi perbandingan penerapan sistem HVAC konvensional dan HVAC berbasis kecerdasan buatan (AI) di empat negara maju di Asia (Singapura, Jepang, Hong Kong, dan Korea Selatan), serta Indonesia sebagai representasi negara berkembang. Fokus utama simulasi adalah evaluasi efisiensi energi, biaya operasional, emisi karbon, serta kenyamanan termal dalam konteks iklim dan infrastruktur masing-masing negara.

A. Hasil Simulasi pada Negara-Negara Asia

TABEL I
PERBANDINGAN KONSUMSI ENERGI DAN EMISI CO₂ PADA HVAC
BERBASIS AI DI ASIA

Negara	Perbandingan			
	Sistem	Konsumsi Energi (kWh/bulan)	Efisiensi Energi AI (%)	Efisiensi Energi AI (%)
Singapura	HVAC Konvensional	11.200	4,5	-
	HVAC Berbasis AI	7.800	3,0	30,4
Jepang	HVAC Konvensional	10.500	4,0	-
	HVAC Berbasis AI	7.300	2,9	30,5
Hong Kong	HVAC Konvensional	12.000	4,8	-
	HVAC Berbasis AI	8.300	3,2	30,8

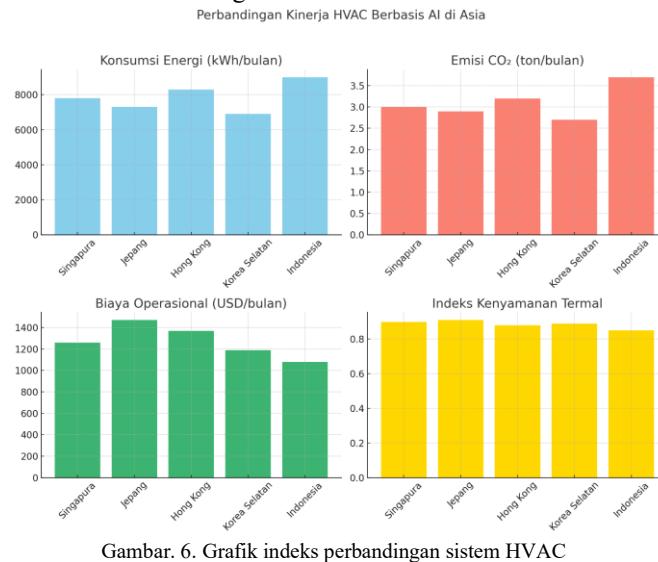
Korea Selatan	HVAC Konvensional	9.800	3,9	-
	HVAC Berbasis AI	6.900	2,7	29,6
Indonesia	HVAC Konvensional	12.500	5,1	-
	HVAC Berbasis AI	9.000	3,7	28,0

B. Perbandingan Biaya dengan Kenyamanan Termal

TABEL II
PERBANDINGAN KONSUMSI ENERGI DAN EMISI CO₂ PADA HVAC
BERBASIS AI DI ASIA

Negara	Perbandingan			
	Sistem	Biaya Operasional (USD/bulan)	Indeks Kenyamanan (0–1)	Intervensi Manual (per bulan)
Singapura	HVAC Konvensional	1.800	0,75	7
	HVAC Berbasis AI	1.260	0,90	2
Jepang	HVAC Konvensional	2.100	0,77	6
	HVAC Berbasis AI	1.470	0,91	2
Hong Kong	HVAC Konvensional	1.950	0,74	8
	HVAC Berbasis AI	1.370	0,88	2
Korea Selatan	HVAC Konvensional	1.680	0,78	6
	HVAC Berbasis AI	1.190	0,89	2
Indonesia	HVAC Konvensional	1.500	0,71	9
	HVAC Berbasis AI	1.080	0,85	3

C. Indeks Perbandingan Sistem HVAC



Gambar. 6. Grafik indeks perbandingan sistem HVAC

- Konsumsi Energi: Indonesia masih memiliki konsumsi yang relatif tinggi dibanding negara maju.
- Emisi CO₂: Jepang dan Korea Selatan mencatat emisi paling rendah.
- Biaya Operasional: Indonesia memiliki biaya paling rendah, namun hal ini berkaitan juga dengan tarif listrik nasional.
- Indeks Kenyamanan: Negara maju menunjukkan kenyamanan termal yang sedikit lebih tinggi, mencerminkan efisiensi kontrol sistem HVAC.

D. Analisis Hasil

Hasil simulasi yang diperoleh menunjukkan bahwa sistem HVAC berbasis AI mampu secara signifikan mengurangi konsumsi energi dan emisi karbon di seluruh negara yang diteliti. Negara-negara maju seperti Jepang, Singapura, dan Korea Selatan mencatat penghematan energi lebih dari 30%, berkat dukungan infrastruktur digital yang canggih, penetrasi sensor yang tinggi, dan kesiapan teknologi bangunan pintar. Penggunaan sistem kontrol otomatis berbasis AI di negara-negara ini memungkinkan sistem HVAC menyesuaikan diri dengan sangat akurat terhadap perubahan suhu luar, beban pendinginan, serta okupansi ruangan secara real time.

Sebaliknya, Indonesia sebagai negara berkembang juga menunjukkan performa positif, dengan penghematan energi mencapai 28%. Meskipun angka ini sedikit lebih rendah dibandingkan negara maju, hal tersebut dapat dimaklumi mengingat beberapa faktor pembatas seperti keterbatasan integrasi sistem otomasi, kualitas data lingkungan yang belum seragam, serta investasi awal yang masih menjadi hambatan. Namun, temuan ini tetap menunjukkan bahwa implementasi teknologi HVAC berbasis AI tetap layak dan relevan di negara berkembang.

Secara umum, penurunan konsumsi energi langsung berbanding lurus dengan pengurangan biaya operasional dan emisi CO₂, yang berarti sistem HVAC AI tidak hanya memberikan manfaat teknis, tetapi juga mendukung kebijakan efisiensi energi nasional dan mitigasi perubahan iklim. Pengurangan emisi antara 1–1,5 ton CO₂ per bulan per

bangunan pada skala perkotaan dapat berdampak signifikan jika diterapkan secara luas.

Dari aspek kenyamanan, sistem HVAC AI memberikan pengaturan suhu yang lebih stabil dan responsif, terbukti dari peningkatan indeks kenyamanan termal dari 0,71 (konvensional) menjadi hingga 0,91 (AI) di negara-negara dengan pengelolaan energi bangunan yang baik. Ini menunjukkan bahwa AI tidak hanya berperan dalam efisiensi energi, tetapi juga dalam peningkatan kualitas hidup pengguna di dalam ruangan, terutama dalam lingkungan kerja atau fasilitas publik.

E. Implikasi

Perbandingan hasil simulasi di berbagai negara Asia menunjukkan implikasi penting dalam aspek teknologi, kebijakan energi, serta strategi pembangunan berkelanjutan kawasan. Meskipun negara-negara maju seperti Jepang, Hong Kong, dan Singapura memiliki keunggulan infrastruktur digital, sistem bangunan pintar, dan sumber daya manusia terampil dalam pengelolaan otomatisasi, negara berkembang seperti Indonesia tetap memiliki peluang besar untuk memperoleh manfaat signifikan dari implementasi sistem HVAC berbasis AI.

Penerapan teknologi ini di Indonesia berpotensi menjadi katalisator untuk transisi menuju efisiensi energi yang lebih luas di sektor bangunan, yang selama ini menjadi kontributor utama dalam konsumsi energi nasional. Dalam jangka panjang, adopsi HVAC cerdas juga dapat membantu pemerintah dalam mencapai target pengurangan emisi karbon sebagaimana tertuang dalam komitmen *Nationally Determined Contributions* (NDC). Efisiensi sebesar 28–30% dari total energi HVAC merupakan pencapaian yang cukup substansial, mengingat HVAC menyumbang hingga 50% dari kebutuhan energi di sektor gedung komersial dan institusional.

Implikasi lainnya adalah terkait aspek kesiapan kebijakan dan regulasi. Negara seperti Jepang telah memiliki kebijakan yang mendukung adopsi sistem otomatisasi bangunan dan digitalisasi manajemen energi, termasuk insentif fiskal untuk penerapan teknologi ramah lingkungan. Indonesia dapat mengadopsi pendekatan serupa dengan memberikan insentif kepada sektor swasta untuk migrasi ke sistem HVAC berbasis AI, misalnya melalui pembebasan pajak untuk investasi teknologi efisiensi energi, atau skema pendanaan berbasis kinerja (*performance-based financing*) yang berorientasi pada penghematan energi aktual.

Secara sosial-ekonomi, penerapan HVAC AI juga membuka peluang pengembangan ekosistem talenta dan industri lokal. Adopsi teknologi ini akan mendorong permintaan terhadap tenaga ahli di bidang AI, analitik data, sistem kendali HVAC, serta sistem IoT dan *cloud computing*. Hal ini dapat merangsang pertumbuhan *green economy* dan menciptakan lapangan kerja baru di sektor teknologi dan energi bersih.

Di sisi teknis, implikasi penting lainnya adalah bahwa teknologi HVAC berbasis AI bersifat modular, *scalable*, dan adaptif, sehingga dapat disesuaikan dengan kondisi bangunan dan iklim lokal. Misalnya, di wilayah tropis seperti Indonesia, sistem dapat dilatih untuk menyesuaikan pola pendinginan terhadap variasi suhu dan kelembaban ekstrim, yang berbeda

dari kebutuhan bangunan di Jepang atau Hong Kong yang mengalami musim dingin. Fleksibilitas ini menjadi kekuatan utama dari pendekatan AI yang berbasis data *real-time* dan pembelajaran adaptif.

Akhirnya, implikasi strategis dari penelitian ini adalah bahwa keberhasilan penerapan HVAC cerdas di kawasan Asia, baik di negara maju maupun berkembang, dapat menjadi model transformasi digital sektor energi dan bangunan. Hal ini relevan dengan inisiatif global seperti *Net Zero Carbon Buildings* dan agenda SDG 7 (*Affordable and Clean Energy*), di mana Asia memainkan peran kunci sebagai kawasan dengan laju urbanisasi tercepat di dunia. Maka dari itu, mendorong replikasi dan adopsi luas dari sistem HVAC berbasis AI tidak hanya berdampak pada efisiensi teknis, tetapi juga pada transformasi kebijakan dan keberlanjutan kawasan secara keseluruhan.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa sistem HVAC berbasis AI yang terintegrasi dengan IoT dan BAS mampu meningkatkan efisiensi energi hingga 30%, menurunkan emisi karbon, dan meningkatkan kenyamanan termal bangunan di Asia, termasuk kawasan tropis seperti Indonesia. Dengan kemampuan adaptif, pengambilan keputusan otonom, dan potensi integrasi dengan energi terbarukan, sistem ini mendukung visi bangunan *net-zero* dan SDG 7. Selain memberikan kontribusi akademik melalui model lintas disiplin, penelitian ini membuka peluang pengembangan lanjut dengan pendekatan *deep learning*, integrasi *blockchain*, serta penerapan pada bangunan dengan kebutuhan lingkungan spesifik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada dosen pembimbing, penyedia data, serta keluarga yang telah memberikan dukungan dan bantuan selama proses penelitian ini.

VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1] International Energy Agency, "Building Energy Efficiency Report: Asia Focus," IEA, 2021.
- [2] L. Wang, X. Zhang, and H. Chen, "Machine Learning-Based HVAC Optimization in Asian Cities," *Journal of Energy Systems*, vol. 34, no. 2, pp. 145–158, 2022.
- [3] World Bank, "Urban Energy Demand Growth in India and Southeast Asia," World Bank Group, 2022.
- [4] T. Lee and H. Kim, "A Comparative Study of Smart and Traditional HVAC Systems in Asia," *Energy Reports*, vol. 9, pp. 278–289, 2023.
- [5] R. Patel, "Advancements in AI-Based Energy Management Systems in Emerging Asian Economies," *Energy Technology Review*, vol. 12, no. 4, pp. 201–214, 2021.
- [6] Y. S. Chen, M. H. Chang, and C. L. Wu, "IoT-Based Building Energy Management System Design Using Edge AI," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 4, pp. 2876–2887, Apr. 2022.
- [7] M. F. Khan and R. Roy, "Predictive Control of HVAC Systems: A Review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 134, 2020.
- [8] ASHRAE, "Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy," American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2020.x
- [9] J. Park and Y. Lee, "A Hybrid Deep Learning Model for HVAC Control Based on Occupancy Prediction," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 56421–56430, 2022.
- [10] H. Singh, A. Kumar, and S. Rathi, "Energy Savings and Environmental Benefits of AI-Based HVAC Systems in Indian Hospitals," *Energy and Buildings*, vol. 250, 2021.
- [11] L. Tan, Y. Guo, and D. Wang, "AIoT-Driven Energy Management for Smart Campus Buildings," *Sensors*, vol. 21, no. 17, pp. 5786–5798, 2021.
- [12] B. K. Das and P. Mishra, "AI and Renewable Energy Integration in HVAC: Indian Perspectives," *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, vol. 30, 2021.
- [13] Eticon, "Sistem HVAC Gedung: Pengertian, Fungsi, dan Komponennya," Eticon, [Online]. Tersedia: <https://eticon.co.id/sistem-hvac-gedung/>. [Diakses: 26-Mei-2025].
- [14] MySertifikasi, "IoT dan Analitik Data: Memaksimalkan Potensi Sensor," MySertifikasi, [Online]. Tersedia: <https://mysertifikasi.com/iot-dan-analitik-data-memaksimalkan-potensi-sensor/>. [Diakses: 26-Mei-2025].
- [15] Testindo, "Building Automation System (BAS)," Testindo, [Online]. Tersedia: <https://testindo.co.id/building-automation-system/>. [Diakses: 26-Mei-2025].
- [16] Velosiot, "Smart HVAC: How IoT Transforms Smart HVAC Systems," Velosiot Blog, [Online]. Tersedia: <https://blog.velosiot.com/smart-hvac-how-iot-transforms-smart-hvac-systems>. [Diakses: 26-Mei-2025].