

Adaptive Hybrid Ventilation Model for Reducing Building Cooling Energy and Carbon Emissions

Santi Widiastuti¹

Email: santi@stekom.ac.id

¹Fakultas Studi Akademik, Universitas Sains dan Teknologi Komputer, Semarang, Jawa Tengah, Indonesia

Article Information	Abstract
Keywords: Adaptive Hybrid Ventilation; Energy Efficiency; Carbon Emission; Tropical Buildings; Buildings Simulation.	<i>Rapidly increasing cooling energy consumption has caused an increase in carbon emissions. It is thus necessary to develop a ventilation system that is adaptive and efficient to mitigate these impacts. In this work, an Adaptive Hybrid Ventilation system is presented with evaluation of the system in terms of efficiency and carbon emissions reduction. A simulation technique is adopted for analysis of the system using the EnergyPlus software in a medium-rise commercial building simulated for tropical climate condition using weather data from Indonesia. Analysis in the present study considered cooling energy consumption, indoor temperature, mechanical operation time and carbon emission using the value of 0.85 kgCO₂/kWh as emission factor. It was found that adaptive hybrid ventilation system consumes 22.4% less cooling energy and produces 22.5% less carbon emission than conventional systems. In addition, the study demonstrates the importance of an adaptive control method in ensuring better ventilation performance beyond what can be achieved in static mode. Contribution of the study includes the application of adaptive control as a critical component of hybrid ventilation and a simulation approach to evaluate its effect on low carbon buildings in tropical region.</i>
Abstrak	
Kata Kunci: Ventilasi Hibrida Adaptif; Efisiensi Energi; Emisi Karbon; Bangunan Tropis; Simulasi Bangunan.	Peningkatan kebutuhan energi pendinginan pada bangunan komersial di wilayah tropis telah memperbesar kontribusi terhadap emisi karbon, sehingga diperlukan strategi ventilasi yang lebih adaptif dan efisien. Penelitian ini mengembangkan dan mengevaluasi model Adaptive Hybrid Ventilation yang mengintegrasikan ventilasi alami dan mekanis melalui mekanisme kontrol responsif untuk meningkatkan kinerja energi dan menurunkan emisi. Metode yang digunakan berupa simulasi berbasis EnergyPlus dengan model bangunan komersial bertingkat menengah yang disesuaikan dengan kondisi iklim tropis berdasarkan data cuaca Indonesia. Analisis difokuskan pada konsumsi energi pendinginan, suhu dalam ruangan, waktu operasi sistem mekanis, serta emisi karbon yang dihitung menggunakan faktor emisi sebesar 0,85 kgCO ₂ /kWh. Hasil menunjukkan bahwa sistem yang diusulkan mampu menurunkan konsumsi energi sebesar 22,4% dan emisi karbon sebesar 22,5% dibandingkan sistem konvensional, sekaligus meningkatkan kondisi termal dalam ruangan dan mengurangi waktu operasi mekanis hingga 30,6%. Temuan ini menegaskan peran penting kontrol adaptif dalam optimalisasi kinerja ventilasi. Penelitian ini berkontribusi dengan menghadirkan kerangka berbasis data untuk integrasi ventilasi adaptif serta memberikan implikasi praktis dalam pengembangan bangunan rendah karbon di wilayah tropis.



I. PENDAHULUAN

Kenaikan konsumsi energi di sektor bangunan terus berlanjut akibat percepatan urbanisasi serta pergeseran pola pemanfaatan ruang yang kian mengandalkan pendingin mekanis. Hal ini semakin

mendesak di daerah tropis dengan suhu dan kelembaban tinggi sepanjang tahun, di mana kebutuhan pendinginan mendominasi operasi bangunan. Ketergantungan pada sistem *Heating, Ventilation, and Air Conditioning* (HVAC) konvensional tidak hanya membebani konsumsi energi, tetapi juga memperburuk emisi karbon global secara substansial. Karenanya, dibutuhkan strategi ventilasi yang lebih adaptif dan dinamis guna menyeimbangkan kenyamanan termal, efisiensi energi, serta keberlanjutan lingkungan.

Data global mengindikasikan bahwa sektor bangunan bertanggung jawab atas 30–40% konsumsi energi serta emisi karbon berbasis energi [1], [2] dan [3]. Di kawasan tropis, penggunaan pendingin udara diperkirakan melonjak drastis seiring perubahan iklim dan pertumbuhan urban [4] dan [5]. Situasi ini menegaskan bahwa beban pendinginan merupakan elemen utama dalam pengeluaran energi bangunan kontemporer di iklim panas. Konsekuensi selanjutnya adalah eskalasi intensitas emisi karbon yang berkaitan erat dengan konsumsi energi pendinginan.

Beragam studi telah mengeksplorasi strategi ventilasi guna meningkatkan efisiensi energi bangunan melalui metode alami, mekanis, serta hibrida. Studi oleh [6] dan [7] membuktikan bahwa ventilasi alami dapat mengurangi konsumsi energi, meskipun terhambat oleh kurangnya kontrol serta ketergantungan pada faktor iklim luar. Sementara itu, [8], [9] dan [10] menggarisbawahi kemampuan ventilasi hibrida dalam mengoptimalkan kualitas udara dan efisiensi energi via penggabungan sistem alami dengan mekanis. Selain itu, [11] dan [12] menekankan peran krusial integrasi kontrol adaptif berdasarkan kondisi termal *real-time* untuk memperkuat kinerja energi sistem ventilasi bangunan.

Walaupun begitu, kajian mengenai ventilasi hibrida adaptif masih menghadapi kendala utama pada tahap penerapan dan integrasi sistem. Mayoritas penelitian mengandalkan simulasi statis tanpa memasukkan kontrol adaptif berdasarkan data termal *real-time* maupun fluktuasi beban pendinginan dinamis [13] dan [14]. Di samping itu, pengintegrasian optimalisasi energi pendinginan dengan pengurangan emisi karbon dalam model terpadu masih minim dilakukan secara kuantitatif [15]. Studi terkini pun mengungkap bahwa sistem ventilasi konvensional belum optimal dalam mengimplementasikan kontrol responsif lingkungan secara serempak untuk efisiensi energi dan penurunan emisi bersamaan [16].

Penelitian ini bertujuan mengembangkan model ventilasi hibrida adaptif berbasis kontrol *real-time* untuk mengoptimalkan integrasi ventilasi alami dan mekanis sesuai kondisi termal terkini serta preferensi penghuni. Model yang dirancang secara khusus memadukan parameter beban pendinginan dinamis dan perhitungan emisi karbon dalam kerangka optimasi ventilasi terintegrasi. Kontribusi utama penelitian ini tidak terletak pada pengembangan algoritma kontrol baru, melainkan pada integrasi mekanisme *adaptive hybrid ventilation* dengan kerangka evaluasi

energi emisi karbon yang diterapkan pada bangunan komersial di iklim tropis. Berbeda dengan penelitian terdahulu yang umumnya berfokus pada penghematan energi atau kenyamanan termal secara terpisah, studi ini mengevaluasi secara simultan konsumsi energi pendinginan, waktu operasi mekanis, kondisi termal ruang, dan dampak emisi karbon dalam satu model operasional yang terintegrasi. Pendekatan tersebut memungkinkan identifikasi hubungan antara strategi ventilasi adaptif dan potensi pengurangan jejak karbon bangunan secara lebih komprehensif. Rumusan pertanyaan penelitian mencakup: *Bagaimana model ventilasi hibrida adaptif dengan kontrol real-time dapat secara efektif meminimalkan konsumsi energi pendinginan dan emisi karbon pada bangunan di iklim tropis?*

II. TINJAUAN LITERATUR

A. Efisiensi Energi dan Ventilasi Bangunan

Sektor bangunan menjadi penyumbang utama konsumsi energi global, terutama lewat sistem pendinginan di daerah iklim panas. Studi oleh [17] dan [18] menyatakan bahwa sistem Pemanasan, Ventilasi, dan Pendingin Udara (HVAC) mendominasi pengeluaran energi di bangunan komersial, sedangkan [19] dan [20] menyoroti keperluan mendesak strategi efisiensi energi untuk membatasi emisi karbon. Studi oleh [21] dan [22] menunjukkan bahwa kenaikan suhu global secara langsung meningkatkan beban pendinginan bangunan. Tren ini menggarisbawahi pentingnya optimalisasi ventilasi sebagai kunci pengurangan konsumsi energi dan emisi karbon.

Dalam aspek performa termal bangunan, ventilasi berfungsi sebagai pengatur primer pertukaran udara dan distribusi panas. Penelitian oleh [23] membuktikan bahwa ventilasi alami dapat memangkas konsumsi energi secara substansial, meski keberhasilannya bergantung rapat pada faktor lingkungan luar. Berbeda dengan itu, [24] dan [25] menekankan pengaruh adaptasi penghuni terhadap kondisi termal terhadap efektivitas ventilasi alami. Penelitian selanjutnya oleh [26] memperkuat bahwa di suhu ekstrem, ventilasi alami gagal mempertahankan kenyamanan termal secara stabil.

B. Ventilasi Mekanis dan Hibrida

Keterbatasan itu memicu inovasi ventilasi mekanis guna memastikan kestabilan kondisi termal bangunan. Penelitian oleh [27] dan [28] membuktikan bahwa sistem ini menjaga kualitas udara *indoor* secara tetap, walaupun menimbulkan beban energi lebih besar. Selain itu [29] menemukan bahwa HVAC konvensional kurang efisien karena mengabaikan variasi beban termal dinamis. Selaras dengan hal tersebut, [30] menyoroti risiko pemborosan energi dari sistem mekanis non-adaptif, khususnya saat beban rendah.

Sebagai evolusi dari strategi sebelumnya, ventilasi hibrida dirancang untuk memadukan manfaat ventilasi alami dan mekanis. Studi oleh [31] menyampaikan bahwa metode ini meningkatkan efisiensi energi jauh lebih baik daripada sistem tradisional. Meski begitu, bertentangan dengan klaim efisiensi itu, [32] dan [33] menggarisbawahi ketergantungan performa hibrida pada strategi kontrol yang diterapkan. Kajian mutakhir dari [34] semakin menegaskan bahwa tanpa kontrol adaptif, potensi optimal ventilasi hibrida belum terealisasi sepenuhnya.

C. Kontrol Adaptif dan Integrasi Energi–Emisi

Kendala optimalisasi ventilasi hibrida memicu inovasi kontrol adaptif yang lebih peka terhadap dinamika operasional bangunan. Penelitian oleh [35] mengusulkan bahwa kontrol prediktif dapat memperkuat kinerja HVAC melalui ramalan perubahan kondisi. Inovasi lanjutan dari [36] menerapkan model *predictive control* untuk optimalisasi energi secara dinamis. Tambahan lagi, [37] dan [38] membuktikan bahwa penggabungan kecerdasan buatan memungkinkan sistem ventilasi menanggapi kondisi termal *real-time* dengan akurasi superior.

Walaupun pendekatan-pendekatan itu mencerminkan kemajuan mencolok, penggabungan efisiensi energi dengan pengurangan emisi karbon belum terealisasi secara holistik. Penelitian oleh [39] lebih mengutamakan kenyamanan termal tanpa menyentuh dampak emisi karbon. Sebaliknya, [40] menegaskan urgensi desain terintegrasi untuk bangunan berkelanjutan. Secara krusial, [41] mengungkap absennya model ventilasi yang merangkul optimalisasi beban pendinginan dinamis serta emisi karbon via kontrol adaptif *real-time* secara serempak celah ini menjadi fondasi pengembangan studi ini.

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Jenis dan Pendekatan Penelitian

Studi ini menerapkan metode kuantitatif simulasi untuk mengukur kinerja model ventilasi hibrida adaptif dalam mengurangi konsumsi energi pendinginan serta emisi karbon bangunan. Simulasi dijalankan *Via EnergyPlus* yang dipadukan dengan *DesignBuilder* guna mensimulasikan dinamika interaksi lingkungan luar, properti bangunan, dan sistem ventilasi. Model dibangun dengan memadukan ventilasi alami serta mekanis lewat kontrol adaptif berdasarkan data termal terkini. Analisis pun difokuskan pada respons sistem di beragam skenario operasional yang mencerminkan realitas bangunan tropis.

B. Objek, Lokasi, dan Waktu Penelitian

Objek penelitian adalah bangunan komersial bertingkat sedang dengan profil beban pendinginan tinggi dan sistem ventilasi konvensional. Model bangunan dibuat secara representatif

dengan memperhatikan tata letak ruang, orientasi sinar matahari, serta sifat termofisik material *envelope* bangunan. Pendekatan ini memastikan simulasi mencerminkan kondisi operasional riil. Dengan demikian, hasil evaluasi dapat mengilustrasikan kinerja ventilasi dalam skenario penggunaan tropis aktual.

Model bangunan yang digunakan merepresentasikan bangunan perkantoran komersial bertingkat menengah dengan luas lantai total sekitar 5.000 m² yang terdiri atas lima lantai. Setiap lantai diasumsikan memiliki tinggi ruang sebesar 3,5 m sesuai karakteristik umum bangunan perkantoran modern. Bangunan diasumsikan memiliki orientasi utama utara-selatan untuk meminimalkan paparan radiasi matahari langsung pada *fasad* timur dan barat. Selubung bangunan dimodelkan menggunakan dinding bata berplester dengan nilai koefisien perpindahan panas (*U-value*) sebesar 2,1 W/m²K dan kaca tunggal dengan *U-value* sebesar 5,8 W/m²K. Rasio luas jendela terhadap dinding (*Window-to-Wall Ratio*) ditetapkan sebesar 40%. Profil okupansi mengikuti pola operasional bangunan perkantoran dengan jam penggunaan pukul 08.00–17.00 selama hari kerja dan tingkat okupansi rata-rata 0,1 orang/m². Parameter tersebut dipilih untuk merepresentasikan karakteristik umum bangunan komersial di wilayah tropis Indonesia.

Lokasi studi direpresentasikan melalui data iklim Indonesia yang khas tropis, ditandai suhu dan kelembaban tinggi sepanjang tahun. Parameter utama mencakup temperatur luar ruang (*T_{out}*), *Relative Humidity* (RH), serta radiasi surya sebagai masukan simulasi primer. Periode simulasi ditetapkan 8760 jam tahunan guna menangkap fluktuasi termal komprehensif. Pendekatan ini memungkinkan penilaian performa ventilasi terhadap dinamika iklim secara menyeluruh.

C. Data dan Teknik Pengumpulan Data

Data penelitian menggabungkan data sekunder dan *output* simulasi yang terintegrasi dalam analisis. Data sekunder mencakup parameter iklim seperti suhu udara, kelembapan relatif, serta radiasi surya yang bersumber dari *database EnergyPlus Weather* (EPW). Selain itu, karakteristik bangunan berupa geometri, material, dan sifat termal dimanfaatkan untuk membentuk model simulasi akurat. Integrasi data ini menjamin representasi kondisi fisik dan lingkungan bangunan yang realistis.

Data simulasi dihasilkan melalui pemodelan ventilasi dengan *EnergyPlus* yang menghitung beban pendinginan secara dinamis. Model meliputi skenario ventilasi alami, mekanis, dan hibrida dengan variasi kondisi operasional. Parameter seperti *Air Changes per Hour* (ACH), jadwal operasi sistem, serta kondisi batas ditetapkan berdasarkan skenario pengujian sistematis. *Output* utama berupa beban pendinginan (kWh), konsumsi energi, dan profil suhu ruangan menjadi landasan evaluasi performa sistem.

D. Teknik Analisis Data

Analisis dilakukan dengan membandingkan konsumsi energi pendinginan antara sistem ventilasi konvensional dan model *Adaptive Hybrid Ventilation*. Beban pendinginan dihitung berdasarkan persamaan:

$$Q_{cool} = \sum (U \cdot A \cdot \Delta T) + Q_{internal} + Q_{solar}$$

Di mana Q_{cool} adalah beban pendinginan total, U adalah koefisien perpindahan panas, A adalah luas permukaan, dan ΔT adalah perbedaan suhu dalam dan luar ruangan. Konsumsi energi kemudian dikonversi menjadi emisi karbon menggunakan persamaan:

$$CO_2 = E \times EF$$

dengan E sebagai konsumsi energi (kWh) dan EF sebagai faktor emisi (kgCO₂/kWh).

Dalam penelitian ini, faktor emisi (EF) ditetapkan sebesar 0,85 kgCO₂/kWh untuk mengestimasi emisi karbon yang dihasilkan dari konsumsi energi listrik. Nilai tersebut digunakan sebagai pendekatan yang merepresentasikan sistem ketenagalistrikan yang masih memiliki ketergantungan signifikan terhadap pembangkit berbahan bakar fosil, sehingga relevan untuk menggambarkan dampak lingkungan dari penggunaan energi pada bangunan. Penggunaan faktor emisi ini bertujuan untuk memberikan estimasi komparatif mengenai potensi pengurangan emisi karbon yang diperoleh melalui penerapan *Adaptive Hybrid Ventilation*. Oleh karena itu, perubahan konsumsi energi dapat secara langsung diterjemahkan menjadi perubahan emisi karbon dalam analisis penelitian ini.

Model kontrol adaptif dirancang menggunakan logika berbasis ambang batas suhu untuk menentukan mode operasi ventilasi. Ventilasi alami diaktifkan ketika $T_{in} \leq 26^\circ C$ dan $T_{out} < T_{in}$ sedangkan ventilasi mekanis diaktifkan ketika $T_{in} > 26^\circ C$ atau kondisi luar tidak mendukung. Selain itu, batas kelembapan relatif maksimum ditetapkan sebesar 70% untuk menjaga kenyamanan termal. Mekanisme ini memungkinkan sistem beroperasi secara dinamis untuk meminimalkan konsumsi energi sekaligus mempertahankan kenyamanan penghuni.

E. Alur Penelitian

Penelitian ini dimulai dengan pengumpulan data iklim serta parameter bangunan untuk membangun fondasi model simulasi energi. Kemudian, dikembangkan sistem *Adaptive Hybrid Ventilation* yang memadukan ventilasi alami dan mekanis melalui kontrol berdasarkan kondisi termal ruangan. Langkah selanjutnya melibatkan simulasi dengan *software EnergyPlus* pada beragam skenario operasi, guna menilai konsumsi energi pendingin serta potensi pengurangan

emisi karbon. Hasil simulasi dianalisis dengan membandingkan sistem konvensional dan adaptif, sehingga dapat diidentifikasi tingkat efisiensi serta performa sistem yang tercipta.

Untuk menjamin keandalan model simulasi, dilakukan validasi melalui perbandingan hasil simulasi dengan data referensi dari studi terdahulu yang mirip dalam karakteristik bangunan dan kondisi iklim. Parameter utama seperti konsumsi energi pendinginan serta profil beban termal menampilkan pola yang selaras dengan temuan penelitian sebelumnya, menandakan bahwa model berhasil merepresentasikan perilaku sistem secara akurat. Pengaturan parameter simulasi pun mengikuti standar pemodelan energi bangunan guna mengurangi kemungkinan penyimpangan hasil. Oleh karena itu, model simulasi ini memiliki validitas yang cukup untuk menganalisis performa sistem ventilasi pada penelitian ini.

F. Validasi Model Simulasi

Validasi model dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi konsumsi energi pendinginan terhadap temuan penelitian terdahulu pada bangunan dengan karakteristik dan kondisi iklim yang serupa. Hasil simulasi menunjukkan intensitas energi pendinginan sebesar 145,2 kWh/m²/tahun pada sistem konvensional, yang berada pada kisaran yang sebanding dengan nilai yang dilaporkan dalam studi mengenai konsumsi energi bangunan dan strategi ventilasi pada wilayah beriklim panas dan tropis. Selain itu, pola profil beban pendinginan tahunan yang dihasilkan menunjukkan tren yang konsisten dengan karakteristik bangunan tropis yang didominasi kebutuhan pendinginan sepanjang tahun. Kesesuaian antara hasil simulasi dan temuan pada penelitian terdahulu menunjukkan bahwa model mampu merepresentasikan perilaku termal bangunan secara memadai. Dengan demikian, model simulasi dinilai cukup representatif untuk mengevaluasi performa *Adaptive Hybrid Ventilation* pada bangunan komersial di iklim tropis.

IV. HASIL DAN DISKUSI

A. Perbandingan Konsumsi Energi dan Emisi Karbon

Hasil studi mengungkap perbedaan mencolok dalam hal kinerja energi dan emisi karbon antara ventilasi konvensional dengan *Adaptive Hybrid Ventilation* pada gedung komersial di iklim tropis. Analisis menyoroti indikator kunci performa sistem, seperti penggunaan energi pendingin, emisi karbon, suhu ruangan rata-rata, dan waktu pengoperasian mekanis. Simulasi tahunan dimanfaatkan untuk menganalisis pola kinerja kedua sistem secara menyeluruh. Metode ini mendukung penilaian efisiensi operasional yang lebih terstruktur bagi tiap sistem ventilasi. Tabel 1 merangkum perbandingan performa antara ventilasi konvensional dan adaptif.

Tabel 1. Perbandingan Konsumsi Energi dan Emisi Karbon

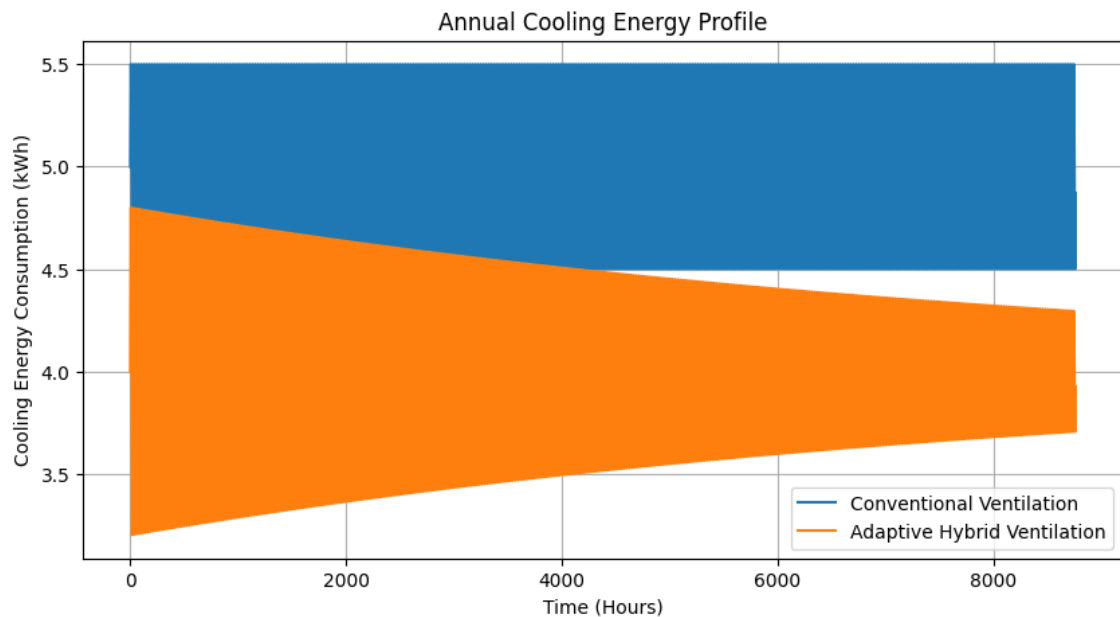
Parameter	Sistem Konvensional	Adaptive Hybrid Ventilation	Perubahan (%)
Energi Pendinginan (kWh/m ² /tahun)	145.2	112.6	22.4%
Emisi Karbon (kgCO ₂ /m ² /tahun)	98.7	76.5	22.5%
Suhu Rata-rata Indoor (°C)	27.8	26.1	6.1%
Waktu Operasi Mekanis (jam/tahun)	6200	4300	30.6%

Tabel 1 menunjukkan bahwa *Adaptive Hybrid Ventilation* secara konsisten menekan konsumsi energi pendinginan dan emisi karbon lebih rendah daripada sistem konvensional. Sistem adaptif juga berhasil menurunkan suhu rata-rata ruangan sambil mempersingkat durasi pengoperasian mekanis secara nyata. Hasil ini menandakan bahwa efisiensi tidak hanya dari penghematan beban energi, melainkan juga optimalisasi waktu operasi. Secara umum, sistem adaptif unggul dalam pengelolaan kebutuhan pendinginan bangunan.

Penerapan *Adaptive Hybrid Ventilation* yang menekan konsumsi energi secara langsung berdampak pada pengurangan emisi karbon gedung. Dengan faktor emisi listrik rata-rata 0,85 kgCO₂/kWh, skenario adaptif mencapai emisi karbon lebih rendah daripada sistem konvensional. Temuan ini membuktikan bahwa optimalisasi ventilasi tidak hanya tingkatan efisiensi energi, tapi juga beri kontribusi kuantitatif pada penurunan jejak karbon bangunan. Oleh karena itu, pendekatan adaptif berpotensi kuat untuk bangunan rendah karbon.

B. Profil Konsumsi Energi Tahunan

Hasil simulasi menunjukkan perbedaan pola distribusi konsumsi energi pendinginan selama setahun penuh antara kedua sistem ventilasi. Analisis ini membantu memahami respons sistem terhadap fluktuasi kondisi lingkungan sepanjang periode simulasi. Grafik menyajikan distribusi energi untuk mengilustrasikan dinamika kinerja secara temporal. Pendekatan ini memudahkan pengenalan perbedaan ciri operasional antara sistem konvensional dan adaptif. Gambar 1 memperlihatkan profil konsumsi energi pendinginan tahunan kedua sistem tersebut.



Gambar 1. Profil Konsumsi Energi Pendinginan Tahunan

Gambar 1 menggambarkan pola konsumsi energi sistem ventilasi konvensional yang relatif stabil sepanjang simulasi, mencerminkan operasi konstan. Sebaliknya, *Adaptive Hybrid Ventilation* menampilkan pola dinamis dengan fluktuasi konsumsi pada periode tertentu. Karakteristik ini menandakan kemampuan sistem adaptif menyesuaikan operasi sesuai kondisi lingkungan, sehingga hindari konsumsi tinggi secara terus-menerus. Perbedaan tersebut mengonfirmasi fleksibilitas pengelolaan energi pendekatan adaptif ketimbang konvensional.

C. Diskusi

Hasil penelitian menunjukkan bahwa *Adaptive Hybrid Ventilation* menandai peralihan dari ventilasi statis ke sistem responsif terhadap kondisi lingkungan. Dalam performa bangunan, efisiensi energi kini bergantung bukan hanya pada jenis ventilasi, melainkan kemampuan dinamis mengelola pergantian operasi. Sistem yang menyesuaikan mode ventilasi sesuai kondisi termal aktual memungkinkan pengendalian energi lebih tepat dan kontekstual. Dengan demikian, ventilasi berperan sebagai elemen aktif dalam strategi optimalisasi energi bangunan, bukan sekadar penunjang kenyamanan.

Hasil ini selaras dengan studi sebelumnya yang membuktikan ventilasi hibrida tingkatkan efisiensi energi dan kualitas lingkungan bangunan lewat penggabungan ventilasi alami serta mekanis [8], [9], dan [33]. Meski begitu, banyak penelitian tersebut lebih menekankan konfigurasi sistem tanpa eksplisit menyertakan kontrol adaptif untuk optimalisasi kinerja [34]. Berbeda dengan pendekatan tersebut, penelitian ini menegaskan peran krusial kontrol adaptif dalam

efisiensi operasional via responsif terhadap kondisi lingkungan. Temuan juga memperkuat tren sistem bangunan modern yang mengadopsi pengelolaan energi berbasis *data-driven* dan *predictive control* [29] dan [35].

Secara kuantitatif, penerapan *Adaptive Hybrid Ventilation* menghasilkan penurunan konsumsi energi pendinginan sebesar 22,4% dibandingkan sistem ventilasi konvensional. Pengurangan konsumsi energi tersebut berkontribusi langsung terhadap penurunan emisi karbon sebesar 22,5%, yang menunjukkan hubungan yang konsisten antara efisiensi energi dan dampak lingkungan bangunan. Besarnya penghematan yang diperoleh mengindikasikan bahwa pengaturan operasi ventilasi berdasarkan kondisi suhu dan kelembapan mampu mengurangi ketergantungan terhadap sistem pendinginan mekanis tanpa menghilangkan fungsi pengendalian termal. Temuan ini memperlihatkan bahwa strategi pengendalian operasional memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kinerja energi bangunan di iklim tropis.

Salah satu dinamika kunci yang terlihat adalah pola operasi ventilasi adaptif yang lebih selektif ketimbang konvensional. Sistem konvensional biasanya berjalan terus-menerus guna pertahankan kondisi termal, sementara adaptif hanya aktif sesuai kebutuhan ruang aktual. Ini membuktikan efisiensi bukan hanya dari kurangi beban, tapi pengelolaan waktu operasi yang presisi. Tak hanya itu, fluktuasi kondisi tropis yang dinamis semakin menekankan urgensi sistem fleksibel dalam tanggap perubahan suhu dan kelembapan.

Selain memberikan penghematan energi, penerapan *Adaptive Hybrid Ventilation* juga menunjukkan perbaikan kondisi termal ruang melalui penurunan suhu rata-rata dibandingkan sistem konvensional. Temuan ini mengindikasikan bahwa strategi ventilasi adaptif tidak hanya berfungsi sebagai mekanisme efisiensi energi, tetapi juga berkontribusi dalam menciptakan lingkungan dalam ruang yang lebih nyaman bagi penghuni. Pada konteks bangunan di iklim tropis, pengendalian suhu ruang yang lebih stabil menjadi faktor penting karena berhubungan langsung dengan kualitas lingkungan termal dan produktivitas pengguna bangunan. Dengan demikian, hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan efisiensi energi dapat dicapai tanpa mengorbankan performa termal bangunan.

Secara teoritis, studi ini mengukuhkan peran utama strategi pengendalian dalam meningkatkan kinerja ventilasi bangunan. Dari perspektif praktis, integrasi *Adaptive Hybrid Ventilation* menunjukkan potensi untuk mengurangi konsumsi energi dan emisi karbon tanpa memerlukan modifikasi besar pada struktur bangunan. Pendekatan ini membuka peluang bagi perancang bangunan untuk mengembangkan strategi ventilasi yang lebih responsif terhadap kondisi iklim lokal dan pola okupansi. Berdasarkan hasil simulasi yang diperoleh, *Adaptive*

Hybrid Ventilation dapat dipertimbangkan sebagai salah satu pendekatan yang menjanjikan dalam mendukung pengembangan bangunan rendah karbon di wilayah beriklim tropis.

Studi ini berkontribusi dengan menjadikan kontrol adaptif sebagai pusat optimalisasi ventilasi hibrida, yang sebelumnya kurang dieksplorasi secara mendalam. Berbeda dari fokus konvensional pada aspek teknis, penelitian ini soroti penggabungan sistem fisik dan strategi pengendalian untuk efisiensi energi. Simulasi yang digunakan beri pratinjau potensi kinerja di kondisi terkendali. Pengembangan lanjutan pakai data riil dan *Artificial Intelligence* (AI) dapat meningkatkan akurasi serta *adaptivitas* secara substansial.

Meskipun temuan ini menunjukkan potensi yang besar, generalisasi perlu dilakukan dengan hati-hati karena penelitian ini berbasis simulasi dan mengandalkan asumsi tertentu mengenai kondisi bangunan dan lingkungan. Evaluasi kenyamanan termal dalam penelitian ini masih didasarkan pada parameter suhu ruang sehingga belum mencakup indikator yang lebih komprehensif seperti *Predicted Mean Vote* (PMV), *Predicted Percentage of Dissatisfied* (PPD), maupun *adaptive thermal comfort*. Perbedaan karakteristik bangunan, pola penggunaan ruang, dan kondisi iklim dapat memengaruhi kinerja sistem ventilasi secara keseluruhan. Selain itu, penelitian ini masih berfokus pada evaluasi performa tahunan sehingga variasi konsumsi energi bulanan, perubahan musiman, dan distribusi jam operasi ventilasi belum dianalisis secara rinci. Dengan demikian, diperlukan studi lanjutan berbasis data lapangan (*field study*) serta analisis temporal yang lebih mendalam untuk menguji kinerja sistem dalam kondisi operasional aktual. Hasil penelitian ini lebih tepat dipandang sebagai landasan konseptual awal dalam pengembangan sistem ventilasi adaptif yang lebih luas.

V. KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan *Adaptive Hybrid Ventilation* mampu menurunkan konsumsi energi pendinginan sebesar 22,4% dan emisi karbon sebesar 22,5% dibandingkan sistem ventilasi konvensional. Temuan ini mengindikasikan bahwa pengoperasian sistem yang lebih responsif terhadap kondisi lingkungan dapat meningkatkan efisiensi energi bangunan sekaligus mengurangi dampak lingkungan yang ditimbulkan. Secara teoretis, studi ini menegaskan bahwa strategi kontrol adaptif menjadi faktor kunci dalam mengoptimalkan kinerja ventilasi hibrida, yang sebelumnya lebih banyak menekankan pada konfigurasi sistem. Dari sisi praktis, pendekatan ini memberikan acuan bagi pengembangan desain ventilasi yang lebih efisien dan sesuai konteks, terutama pada bangunan di iklim tropis dengan kebutuhan pendinginan yang tinggi.

Rekomendasi yang dihasilkan menekankan perlunya integrasi *Adaptive Hybrid Ventilation* dalam praktik perancangan bangunan sebagai strategi untuk meningkatkan efisiensi energi sekaligus menurunkan emisi karbon. Selain itu, penelitian lanjutan disarankan untuk menerapkan pendekatan berbasis data aktual dan memanfaatkan teknologi kecerdasan buatan agar akurasi dan responsivitas sistem ventilasi dapat ditingkatkan. Kajian lebih lanjut juga perlu mempertimbangkan pengaruh perilaku penghuni dan pola penggunaan ruang terhadap kinerja sistem secara lebih menyeluruh. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan menjadi fondasi bagi pengembangan sistem ventilasi yang lebih adaptif, efisien, dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. Aram, R. Taherkhani, and A. Šimelytė, “Multistage Optimization toward a Nearly Net Zero Energy Building Due to Climate Change,” *Energies (Basel)*., vol. 15, no. 3, p. 983, Jan. 2022, doi: 10.3390/en15030983.
- [2] L. Chen *et al.*, “Green construction for low-carbon cities: a review,” *Environ. Chem. Lett.*, vol. 21, pp. 1627–1657, Jan. 2023, doi: 10.1007/s10311-022-01544-4.
- [3] S. Giannelos *et al.*, “A Machine Learning Approach for Generating and Evaluating Forecasts on the Environmental Impact of the Buildings Sector,” *Energies (Basel)*., vol. 16, no. 6, p. 2915, Mar. 2023, doi: 10.3390/en16062915.
- [4] C. Wang *et al.*, “Impacts of Climate Change, Population Growth, and Power Sector Decarbonization on Urban Building Energy use,” *Nat. Commun.*, vol. 14, no. 6434, Oct. 2023, doi: 10.1038/s41467-023-41458-5.
- [5] A. Mastrucci, B. van Ruijven, E. Byers, M. Poblete-Cazenave, and S. Pachauri, “Global Scenarios of Residential Heating and Cooling Energy Demand and CO2 Emissions,” *Clim. Change*, vol. 168, no. 14, Oct. 2021, doi: 10.1007/s10584-021-03229-3.
- [6] K. Miyamoto, S. N. Pratiwi, S. Nishiiri, H. Takaguchi, and T. Kubota, “Relationship between Cooling Methods and Energy Consumption for the Development of Low-Carbon Collective Housing in Indonesia,” *Sustainability*, vol. 16, no. 4, p. 1635, Feb. 2024, doi: 10.3390/su16041635.
- [7] Y. Chen and L. Luo, “Energy Consumption Behaviors and the Potential of Natural Ventilation Emission Reduction in Residential Building,” *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, vol. 23, no. 6, pp. 2029–2040, Nov. 2023, doi: 10.1080/13467581.2023.2278471.
- [8] G. Tognon, M. Marigo, M. De Carli, and A. Zarrella, “Mechanical, Natural and Hybrid Ventilation Systems in Different Building Types: Energy and Indoor air Quality Analysis,” *Journal of Building Engineering*, vol. 76, p. 107060, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.job.2023.107060.

- [9] K. Y. Park, D. O. Woo, S. B. Leigh, and L. Junghans, "Impact of Hybrid Ventilation Strategies in Energy Savings of Buildings: In Regard to Mixed-Humid Climate Regions," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 6, p. 1960, Mar. 2022, doi: 10.3390/en15061960.
- [10] L. R. Jia, J. Han, X. Chen, Q. Y. Li, C. C. Lee, and Y. H. Fung, "Interaction Between Thermal Comfort, Indoor Air Quality and Ventilation Energy Consumption of Educational Buildings: A Comprehensive Review," *Buildings*, vol. 11, no. 12, p. 591, Nov. 2021, doi: 10.3390/buildings11120591.
- [11] F. L. Rashid *et al.*, "Mechanical Ventilation Strategies in Buildings: A Comprehensive Review of Climate Management, Indoor Air Quality, and Energy Efficiency," *Buildings*, vol. 15, no. 14, p. 2579, Jul. 2025, doi: 10.3390/buildings15142579.
- [12] C. Otoo, T. Lu, and X. Lü, "Application of Mixed-Mode Ventilation to Enhance Indoor Air Quality and Energy Efficiency in School Buildings," *Energies (Basel)*, vol. 17, no. 23, p. 6097, Dec. 2024, doi: 10.3390/en17236097.
- [13] M. Cavus, D. Dissanayake, and M. Bell, "Deep-Fuzzy Logic Control for Optimal Energy Management: A Predictive and Adaptive Framework for Grid-Connected Microgrids," *Energies (Basel)*, vol. 18, no. 4, p. 995, Feb. 2025, doi: 10.3390/en18040995.
- [14] C. Wu, Y. Zhou, and J. Wu, "Data-Driven Real-Time Predictive Control for Industrial Heating Loads," *Electric Power Systems Research*, vol. 232, p. 110420, 2024, doi: 10.1016/j.epsr.2024.110420.
- [15] A. H. Alhamami, Y. A. Dodo, A. U. Naibi, A. Alviz-Meza, and A. Mokhtarname, "Energy-Carbon Emission Nexus in a Residential Building Using BIM under Different Climate Conditions: an Application of Multi-Objective Optimization," *Front. Energy Res.*, vol. 11, p. 1326967, Nov. 2023, doi: 10.3389/fenrg.2023.1326967.
- [16] L. Schibuola and C. Tambani, "High Energy Efficiency Ventilation to Limit COVID-19 Contagion in School Environments," *Energy Build.*, vol. 240, p. 110882, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.110882.
- [17] M. González-Torres, L. Pérez-Lombard, J. F. Coronel, I. R. Maestre, and B. Paolo, "Activity and Efficiency Trends for the Residential Sector Across Countries," *Energy Build.*, vol. 273, p. 112428, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.enbuild.2022.112428.
- [18] P. Lamsal, S. B. Bajracharya, and H. B. Rijal, "A Review on Adaptive Thermal Comfort of Office Building for Energy-Saving Building Design," *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 3, p. 1524, Feb. 2023, doi: 10.3390/en16031524.
- [19] Z. Ma *et al.*, "An Overview of Emerging and Sustainable Technologies for Increased Energy Efficiency and Carbon Emission Mitigation in Buildings," *Buildings*, vol. 13, no. 10, p. 2658, Oct. 2023, doi: 10.3390/buildings13102658.
- [20] M. W. Akram, M. F. M. Zublie, M. Hasanuzzaman, and N. A. Rahim, "Global Prospects, Advance Technologies and Policies of Energy-Saving and Sustainable Building Systems: A Review," *Sustainability*, vol. 14, no. 3, p. 1316, Jan. 2022, doi: 10.3390/su14031316.

- [21] H. Bazazzadeh, P. Pilechiha, A. Nadolny, M. Mahdavinejad, and S. S. Hashemi Safaei, "The Impact Assessment of Climate Change on Building Energy Consumption in Poland," *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 14, p. 4084, Jul. 2021, doi: 10.3390/en14144084.
- [22] Y. Li, W. Wang, Y. Wang, Y. Xin, T. He, and G. Zhao, "A Review of Studies Involving the Effects of Climate Change on the Energy Consumption for Building Heating and Cooling," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 18, no. 1, p. 40, 2021, doi: 10.3390/ijerph18010040.
- [23] Q. Al-Yasiri and M. Szabó, "Phase Change Material Coupled Building Envelope for Thermal Comfort and Energy-Saving: Effect of Natural Night Ventilation Under hot Climate," *J. Clean. Prod.*, vol. 365, p. 132839, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.132839.
- [24] G. Lamberti, F. Leccese, G. Salvadori, F. Contrada, and A. Kindinis, "Investigating the Effects of Climate on Thermal Adaptation: A Comparative field Study in Naturally Ventilated University Classrooms," *Energy Build.*, vol. 294, p. 113227, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.enbuild.2023.113227.
- [25] M. T. Baquero Larriva, A. S. Mendes, and N. Forcada, "The Effect of Climatic Conditions on Occupants' Thermal Comfort in Naturally Ventilated Nursing Homes," *Build. Environ.*, vol. 214, p. 108930, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.buildenv.2022.108930.
- [26] K. Ratajczak, Ł. Amanowicz, K. Pałaszyska, F. Pawlak, and J. Sinacka, "Recent Achievements in Research on Thermal Comfort and Ventilation in the Aspect of Providing People with Appropriate Conditions in Different Types of Buildings—Semi-Systematic Review," *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 17, p. 6254, Aug. 2023, doi: 10.3390/en16176254.
- [27] M. Maiques, J. Tarragona, M. Gangolells, and M. Casals, "Energy Implications of Meeting Indoor air Quality and Thermal Comfort Standards in Mediterranean Schools Using Natural and Mechanical Ventilation Strategies," *Energy Build.*, vol. 328, p. 115076, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.enbuild.2024.115076.
- [28] J. Ferdyn-Grygierek and K. Grygierek, "Ventilation Methods for Improving the Indoor Air Quality and Energy Efficiency of Multi-Family Buildings in Central Europe," *Energies (Basel)*, vol. 17, no. 9, p. 2232, May 2024, doi: 10.3390/en17092232.
- [29] Y. Balali, A. Chong, A. Busch, and S. O'Keefe, "Energy Modelling and Control of Building Heating and Cooling Systems with Data-Driven and Hybrid Models—A Review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 183, p. 113496, 2023, doi: 10.1016/j.rser.2023.113496.
- [30] H. Hosamo and S. Mazzetto, "Data-Driven Ventilation and Energy Optimization in Smart Office Buildings: Insights from a High-Resolution Occupancy and Indoor Climate Dataset," *Sustainability*, vol. 17, no. 1, p. 58, Dec. 2024, doi: 10.3390/su17010058.
- [31] D. Aviv *et al.*, "A fresh (Air) look at Ventilation for COVID-19: Estimating the Global Energy Savings Potential of Coupling Natural Ventilation with Novel Radiant Cooling

- Strategies,” *Appl. Energy*, vol. 292, p. 116848, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.116848.
- [32] G. Chiesa and M. Vigliotti, “Comparing Mechanical Ventilation Control Strategies for Indoor Air Quality: Monitoring and Simulation Results of a School Building in Northern Italy,” *Energy Build.*, vol. 322, p. 114665, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.enbuild.2024.114665.
- [33] L. Ledo Gomis, M. Fiorentini, and D. Daly, “Potential and Practical Management of Hybrid Ventilation in Buildings,” *Energy Build.*, vol. 231, p. 110597, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110597.
- [34] S. Al Niyadi and M. H. Elnabawi Mahgoub, “Advancing Hybrid Ventilation in hot Climates: A Review of Current Research and Limitations,” *Front. Built Environ.*, vol. 10, p. 1502941, Jan. 2025, doi: 10.3389/fbuil.2024.1502941.
- [35] J. Hou, H. Li, N. Nord, and G. Huang, “Model Predictive Control Under Weather Forecast Uncertainty for HVAC Systems in University Buildings,” *Energy Build.*, vol. 257, p. 111793, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111793.
- [36] D. Blum *et al.*, “Field Demonstration and Implementation Analysis of Model Predictive Control in an Office HVAC System,” *Appl. Energy*, vol. 318, p. 119104, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.119104.
- [37] V. Motuzienė, J. Bielskus, R. Džiugaitė-Tumėnienė, and V. Raudonis, “Occupancy-Based Predictive AI-Driven Ventilation Control for Energy Savings in Office Buildings,” *Sustainability*, vol. 17, no. 9, p. 4140, May 2025, doi: 10.3390/su17094140.
- [38] S. Wei, P. W. Tien, T. W. Chow, Y. Wu, and J. K. Calautit, “Deep Learning and Computer Vision Based Occupancy CO₂ Level Prediction for Demand-Controlled Ventilation (DCV),” *Journal of Building Engineering*, vol. 56, p. 104715, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.jobee.2022.104715.
- [39] D. Kim, J. Lee, S. Do, P. J. Mago, K. H. Lee, and H. Cho, “Energy Modeling and Model Predictive Control for HVAC in Buildings: A Review of Current Research Trends,” *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 19, p. 7231, Oct. 2022, doi: 10.3390/en15197231.
- [40] Y. Alassaf, “Comprehensive Review of the Advancements, Benefits, Challenges, and Design Integration of Energy-Efficient Materials for Sustainable Buildings,” *Buildings*, vol. 14, no. 9, p. 2994, Sep. 2024, doi: 10.3390/buildings14092994.
- [41] A. A. A. Gassar and R. Jafar, “Artificial Intelligence-Enabled Heating, Ventilation, and Air Conditioning Systems Toward Zero-Emission Buildings: A Systematic Review of Applications, Challenges, and Future Directions,” *Applied Sciences*, vol. 15, no. 19, p. 10497, Sep. 2025, doi: 10.3390/app151910497.