

KERANGKA KERJA (*FRAMEWORK*) EVALUASI DESAIN VENTILASI ALAMI UNTUK KEPATUHAN STANDAR KENYAMANAN TERMAL SNI

Nazaruddin Khuluk^{1*}, Irnanda S. Soerjatmodjo², Denny M. Sundara³, Arnoldus J. Cornelis³

¹Prodi Teknik Arsitektur, Fakultas Teknik,
Universitas Krisnadwipayana, Pd Gede, Bekasi, Jawa Barat

²Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik,
Universitas Muhammadiyah Jakarta, Cempaka Putih, Jakarta Pusat, DKI Jakarta

³Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik dan Informatika,
Universitas 17 Agustus 1945 Jakarta, Sunter Permai, Jakarta Utara, DKI Jakarta

*Email: nazarudin.khuluk@unkris.ac.id

Abstrak

Kenyamanan termal pada bangunan di iklim tropis lembap seperti Indonesia sering kali menjadi tantangan besar yang berdampak pada konsumsi energi sektor tata udara. Ventilasi alami merupakan solusi pasif yang efektif, namun penerapannya sering kali tidak terukur dengan baik pada tahap desain awal. Penelitian ini bertujuan untuk merumuskan sebuah kerangka kerja (framework) evaluasi yang praktis dan terukur bagi desain ventilasi alami pada tahap awal perancangan (early design stage), dengan mengintegrasikan kepatuhan terhadap SNI 03-6572-2001 dan SNI 6381:2020. Kebaruan penelitian ini terletak pada penggabungan tiga komponen evaluasi, kebutuhan aliran udara berbasis okupansi, model kenyamanan termal adaptif, dan estimasi kapasitas pasok angin, ke dalam satu matriks keputusan yang dapat dieksekusi tanpa simulasi CFD, sehingga mengisi kesenjangan antara tuntutan regulasi dan keterbatasan alat evaluasi di tahap konseptual. Hasil penelitian berupa alur keputusan 4-fase yang mengintegrasikan variabel spasial, okupansi, data iklim sekunder, dan suhu operasional ke dalam metrik kepatuhan kuantitatif. Kerangka kerja ini divalidasi melalui studi kasus ruang kerja standar. Hasilnya diharapkan menjadi alat bantu praktis bagi arsitek dan auditor energi dalam mengevaluasi performa tata udara pasif secara cepat pada tahap pra-konstruksi.

Kata Kunci: Ventilasi Alami, Kenyamanan Termal Adaptif, SNI 03-6572-2001, SNI 6381:2020, Framework, Audit Energi.

Abstract

The Thermal comfort in buildings within hot-humid tropical climates like Indonesia often poses a major challenge, significantly impacting energy consumption in the air conditioning sector. While natural ventilation serves as an effective passive solution, its implementation is frequently poorly quantified during the initial design phases. This study aims to formulate a systematic, deterministic evaluation framework to assess the compliance of natural ventilation designs against Indonesian National Standards, specifically SNI 03-6572-2001 and SNI 6381:2020. The methodology employs a synthesis of fundamental aerodynamic formulas, adaptive comfort models, and regulation-based decision matrices, eliminating the need for complex Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations. The research yields a 4-phase decision workflow that integrates spatial variables, occupancy, secondary climate data, and operational temperatures into quantitative compliance metrics. This framework was validated through a case study of a standard workspace. The resulting framework is expected to serve as a practical tool for architects and energy auditors to rapidly evaluate passive HVAC performance during the pre-construction phase.

Keywords: Natural Ventilation, Adaptive Thermal Comfort, SNI 03-6572-2001, SNI 6381:2020, Framework, Energy Audit.

1. PENDAHULUAN

Sektor bangunan merupakan kontributor signifikan terhadap konsumsi energi global dan emisi karbon operasional. Di wilayah beriklim tropis lembap seperti Indonesia, tantangan ini semakin kompleks karena tingginya ketergantungan pada sistem pendingin udara mekanis untuk mencapai kenyamanan termal penghuni. Dalam konteks ini, integrasi strategi desain pasif, khususnya ventilasi alami, menjadi pendekatan imperatif. Optimalisasi elemen pasif tidak hanya berfungsi untuk

menekan beban energi bangunan, tetapi juga menjadi prasyarat fundamental dalam pencapaian standar bangunan hijau dan konsep arsitektur tropis kontemporer.

Untuk menjamin kualitas lingkungan dalam ruang, pemerintah telah menetapkan berbagai regulasi teknis yang mengatur standar performa bangunan, termasuk standar perancangan sistem ventilasi dan model kenyamanan termal adaptif. Namun, penerapan regulasi ini sering kali menghadapi kendala pada tahap desain awal (*early design stage*). Performa ventilasi alami sangat dinamis dan sensitif terhadap berbagai variabel arsitektural, seperti konfigurasi ruang, orientasi bangunan, serta dimensi dan letak bukaan. Keterbatasan alat evaluasi yang praktis sering kali menyebabkan penilaian kepatuhan terhadap standar nasional tertunda hingga tahap pasca-konstruksi.

Secara metodologis, evaluasi performa termal dan ventilasi umumnya dilakukan melalui dua pendekatan utama: pengukuran empiris atau simulasi komputasi lanjut. Meskipun keduanya memberikan data yang valid, pendekatan empiris bersifat reaktif dan tidak dapat digunakan untuk menguji iterasi desain secara cepat. Di sisi lain, simulasi komputasi tingkat tinggi menawarkan akurasi yang detail, namun membutuhkan waktu komputasi yang lama, biaya yang besar, dan keahlian khusus. Ketidadaan alat evaluasi yang cepat dan terukur pada fase konseptual menciptakan kesenjangan antara tuntutan kepatuhan regulasi dan realitas praktik perancangan di lapangan.

Kesenjangan (*gap*) yang diidentifikasi dalam penelitian ini adalah belum adanya alat evaluasi sederhana berbasis regulasi yang dapat digunakan arsitek dan auditor energi pada tahap desain awal tanpa memerlukan keahlian simulasi CFD atau pengukuran empiris. Penelitian ini bertujuan untuk mengisi kesenjangan tersebut dengan merumuskan sebuah kerangka kerja evaluasi yang bersifat deterministik, praktis, dan terintegrasi dengan standar nasional. Kontribusi utama penelitian ini adalah:

1. Menyediakan mekanisme umpan balik cepat bagi perancang untuk mengiterasi desain bukaan ventilasi sebelum tahap detail
2. Menghasilkan status kepatuhan (*compliance status*) yang objektif melalui matriks keputusan tiga kategori
3. Menawarkan alternatif evaluasi yang tidak bergantung pada perangkat lunak simulasi mahal, sehingga lebih mudah diadopsi oleh praktisi di Indonesia

Kebaruan framework ini terletak pada integrasi tiga komponen kritis (kebutuhan aliran udara, model kenyamanan adaptif, dan kapasitas pasokan angin) yang selama ini biasanya dievaluasi secara terpisah, ke dalam satu alur keputusan yang koheren dan berbasis SNI.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Urgensi dekarbonisasi stok bangunan perkotaan, khususnya di wilayah metropolitan padat seperti Jakarta, telah mendorong penelitian menuju jalur net-zero dan optimalisasi model emisi bangunan (Hanif et al., 2024); (Hanif et al., 2026)). Pencapaian standar bangunan hijau tingkat tinggi, seperti sertifikasi Platinum, menuntut optimalisasi strategi desain pasif secara ketat untuk meminimalkan ketergantungan pada sistem energi mekanis (Hanif, 2022).

Merespons tujuan keberlanjutan tersebut, penerapan konsep arsitektur kontemporer tropis sangat menekankan mekanisme pendinginan pasif pada bangunan hunian (Fitri Astuti & Aji Prasetyo, 2025). Desain bukaan bangunan, seperti jendela, memegang peranan kritis dalam mengoptimalkan ventilasi alami dan pencahayaan, yang secara langsung menentukan kualitas lingkungan termal di dalam ruang (Almomani, 2026). Konfigurasi bukaan yang tepat sangat penting untuk mempertahankan kenyamanan termal tanpa sistem pendingin aktif.

Berbagai studi empiris di Indonesia telah menginvestigasi hubungan antara desain bangunan dan kenyamanan termal. Penelitian pada rumah susun (rusun) menyoroti ketergantungan kritis ventilasi alami pada konfigurasi spasial untuk mencapai kenyamanan termal yang memadai (Rahmawati et al., 2016). Sejalan dengan itu, studi pada bangunan rumah tinggal menunjukkan bahwa letak dan penempatan bukaan secara signifikan memengaruhi performa termal bangunan (Amelia, 2024). Pada fasilitas pendidikan, analisis lapangan di ruang kuliah mengonfirmasi bahwa evaluasi kenyamanan termal sangat diperlukan untuk memitigasi stres panas pada ruang-ruang yang mengandalkan ventilasi alami (Hadi et al., 2020).

Berdasarkan kajian pustaka, terdapat beberapa temuan penting yang menjadi latar belakang penelitian ini:

1. Metode evaluasi yang ada saat ini didominasi oleh pendekatan pasca-huni (Rahmawati et al. (2016); Amelia (2024)) atau simulasi CFD yang memerlukan keahlian dan biaya tinggi (Hanif, 2022).
2. Regulasi nasional (SNI 03-6572-2001 dan SNI 6381:2020) telah menyediakan parameter kuantitatif, namun belum diterjemahkan ke dalam alat evaluasi yang praktis untuk tahap desain awal.
3. Belum ada framework yang secara simultan mengintegrasikan tiga aspek penentu performa ventilasi alami (kebutuhan aliran udara, kenyamanan termal adaptif, dan kapasitas pasok angin) dalam satu matriks keputusan yang sederhana.

Penelitian ini mengisi *gap* tersebut dengan mengusulkan sebuah framework evaluasi deterministik yang:

- Memetakan parameter desain arsitektural (luas bukaan, volume ruang, okupansi) ke dalam persyaratan kuantitatif SNI
- Menggunakan data iklim sekunder yang mudah diperoleh (dari BMKG)
- Menghasilkan status kepatuhan dan rekomendasi tindakan secara langsung
- Tidak memerlukan simulasi CFD sehingga dapat digunakan pada tahap konseptual perancangan

Dengan demikian, framework ini melengkapi, bukan menggantikan, metode evaluasi yang sudah ada dengan menyediakan alat saring awal (*screening tool*) sebelum keputusan untuk melakukan simulasi atau pengukuran lebih lanjut..

3. METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan pendekatan pengembangan kerangka kerja konseptual (*conceptual framework development*) yang divalidasi melalui studi kasus kuantitatif. Metodologi dirancang untuk menerjemahkan persyaratan regulasi nasional ke dalam parameter matematis deterministik yang dapat dieksekusi tanpa perangkat lunak simulasi kompleks. Secara keseluruhan, alur penelitian dibagi menjadi empat fase sistematis: pengumpulan parameter input, pemodelan matematis berbasis standar, integrasi matriks kepatuhan, dan validasi studi kasus.

3.1 Fase 1: Identifikasi dan Definisi Parameter Input

Tahap pertama bertujuan mengumpulkan data sekunder dan parameter geometri yang menjadi variabel bebas dalam model. Data dikategorikan menjadi dua kelompok utama:

1. Parameter Spasial dan Okupansi: Meliputi volume ruang (V), luas lantai (A_f), luas efektif bukaan ventilasi (A_v), dan jumlah maksimum penghuni (N).
2. Parameter Lingkungan (Data Iklim Sekunder): Meliputi kecepatan angin regional rata-rata (v) dan suhu udara luar rata-rata (T_{out}). Data ini diekstrak dari data historis stasiun meteorologi terdekat (misalnya BMKG) untuk mewakili kondisi iklim makro lokasi bangunan.

3.2 Fase 2: Pemodelan Matematis Berbasis Standar

Pada tahap ini, parameter input diolah menggunakan formulasi aerodinamika dasar dan model kenyamanan adaptif yang merujuk pada SNI.

A. Kebutuhan Aliran Udara (*Ventilation Demand*)

Berdasarkan SNI 03-6572-2001, kebutuhan udara luar minimum ditentukan oleh beban polutan internal (terutama CO_2 dari okupant). Laju aliran udara yang dibutuhkan (Q_{demand}) dihitung menggunakan persamaan:

$$Q_{demand} = N \cdot q_{person} \quad (1)$$

di mana N adalah jumlah okupant dan q_{person} adalah laju pasokan udara luar minimum per orang (dalam m^3/s). (Catatan: Nilai eksak q_{person} harus merujuk pada tabel spesifik di dalam SNI 03-6572-2001 untuk kategori ruang yang dievaluasi).

B. Target Kenyamanan Termal Adaptif

Untuk menilai apakah ventilasi alami mampu memberikan kenyamanan, digunakan model adaptif dari SNI 6381:2020. SNI ini mengadopsi pendekatan di mana suhu operasional yang dapat diterima (T_{comf}) berbanding lurus dengan suhu luar rata-rata (T_{rm}). Persamaan umumnya adalah:

$$T_{comf} = a \times T_{rm} + b \quad (2)$$

di mana a dan b adalah koefisien regresi adaptif. Jika suhu operasional di dalam ruang (yang dipengaruhi oleh laju ventilasi dan suhu luar) berada pada rentang $\pm \Delta T$ di sekitar T_{comf} , maka ruang dikategorikan nyaman secara termal.

C. Estimasi Kapasitas Pasok Ventilasi Alami (*Passive Supply*)

Kapasitas udara yang masuk melalui bukaan akibat dorongan angin (*wind-driven ventilation*) dihitung menggunakan persamaan orifisial dasar:

$$Q_{supply} = C_v \times A_v \times v \quad (3)$$

di mana C_v adalah koefisien efektivitas bukaan (mempertimbangkan sudut datang angin dan hambatan kasa), A_v adalah luas bersih bukaan (m^2), dan v adalah kecepatan angin (m/s).

Catatan penting tentang penyederhanaan model adalah bahwa model ini secara sengaja hanya memperhitungkan ventilasi akibat dorongan angin (*wind-driven ventilation*) dan mengabaikan efek cerobong (*stack effect*) yang disebabkan oleh perbedaan suhu vertikal. Keputusan ini didasarkan pada pertimbangan berikut:

1. Fokus pada tahap desain awal: Pada fase konseptual, akurasi tinggi belum menjadi prioritas utama dibandingkan kecepatan evaluasi dan umpan balik desain.
2. Dominasi *wind-driven* pada bangunan rendah: Untuk bangunan hingga 3-4 lantai (yang merupakan tipologi mayoritas bangunan di Indonesia), kontribusi *stack effect* terhadap laju aliran udara relatif kecil dibandingkan dorongan angin (Santamouris & Allard, 1998).
3. Ketersediaan data: Data kecepatan angin lebih mudah diperoleh dari stasiun BMKG dibandingkan data gradien suhu vertikal yang memerlukan pengukuran khusus.

Batasan Penerapan (*Scope of Application*) dalam *framework* ini direkomendasikan untuk:

- Bangunan dengan tinggi ≤ 4 lantai
- Bangunan dengan konfigurasi bukaan sisi (*single-sided* atau *cross-ventilation*)
- Evaluasi pada tahap desain konseptual dan skematik

Framework ini tidak direkomendasikan untuk:

- Bangunan tinggi (*high-rise*) > 4 lantai tanpa validasi tambahan
- Bangunan dengan perbedaan suhu dalam-ruang-luar yang ekstrem ($> 10^\circ C$)
- Evaluasi detail untuk sertifikasi atau verifikasi akhir.

3.3 Fase 3: Integrasi Matriks Kepatuhan

Fase ini merupakan inti dari kerangka kerja, di mana hasil perhitungan Fase 2 dievaluasi secara komparatif untuk menghasilkan status kepatuhan. Matriks keputusan dibangun berdasarkan dua kondisi batas (*boundary conditions*):

1. Kecukupan Udara: Membandingkan Q_{supply} terhadap Q_{demand} .
2. Kepatuhan Fisik Arsitektural: Membandingkan rasio luas bukaan terhadap luas lantai ($R_{av} = A_v/A_f$) terhadap batas minimal yang disyaratkan oleh standar bangunan hijau/ventilasi nasional (umumnya 5% hingga 10%).

Kombinasi dari kedua kondisi ini menghasilkan tiga status akhir: Patuh Penuh (*Fully Compliant*), Patuh Aliran namun Cacat Fisik (*Flow Compliant, Non-Physical*), dan Tidak Patuh (*Non-Compliant*) yang mewajibkan intervensi mekanis.

3.4 Fase 4: Validasi Studi Kasus

Untuk menguji kepraktisan dan validitas numerik dari framework yang telah disusun, penelitian ini menerapkan model tersebut pada studi kasus. Mengingat keterbatasan akses ke pengukuran lapangan dan simulasi CFD, validasi dilakukan melalui dua pendekatan:

Pendekatan 1: Konsistensi Internal

- Verifikasi bahwa semua perhitungan mengikuti formulasi yang benar secara matematis
- Pengecekan kesesuaian parameter dengan ketentuan SNI yang dirujuk

Pendekatan 2: Uji Sensitivitas Sederhana

- Simulasi variasi parameter input (luas bukaan, kecepatan angin, jumlah okupansi) untuk mengamati perubahan output
- Identifikasi ambang batas (threshold) di mana status kepatuhan berubah

Penulis menyadari bahwa validasi yang lebih komprehensif, melalui perbandingan dengan pengukuran lapangan atau simulasi CFD, belum dapat dilakukan dalam penelitian ini karena keterbatasan waktu dan biaya. Oleh karena itu, hasil penelitian ini bersifat proposisional dan memerlukan uji empiris lebih lanjut. Namun, tujuan utama penelitian, menyediakan kerangka kerja konseptual yang terstruktur dan berbasis regulasi, tetap tercapai. Parameter input dimasukkan ke dalam model untuk menghitung nilai Q_{demand} , Q_{supply} , dan T_{comf} . Hasil akhir dari perhitungan ini kemudian dipetakan ke dalam matriks kepatuhan Fase 3 untuk mendemonstrasikan bagaimana kerangka kerja ini merekomendasikan tindakan desain secara objektif.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Struktur Alur Logika Kerangka Kerja

KERANGKA KERJA (*FRAMEWORK*) EVALUASI VENTILASI ALAMI



Gambar 1. Kerangka Kerja Evaluasi Ventilasi Alami

4.2 Formulasi Matematika pada Framework

1. Kebutuhan Udara Bersih (Q_{demand}):

Berdasarkan SNI 03-6572-2001, pasokan udara luar minimum untuk ruang kerja standar ditetapkan sebesar q_{person} . Sebagai catatan, verifikasi nilai eksak dari Tabel SNI, umumnya berkisar 8,5 L/s/orang atau 0,0085 m³/s/orang.

2. Target Kenyamanan Termal Adaptif (T_{comf}):

Mengadopsi model adaptif yang menjadi rujukan SNI 6381:2020 (selaras dengan ASHRAE 55), suhu operasional yang dapat diterima (T_{comf}) bergantung pada suhu luar rata-rata (T_{rm}). Dari persamaan (2), $T_{comf} = 0,31 \times T_{rm} + 17,8$ (dalam celcius). Sebagai catatan, koefisien di atas adalah standar adaptif umum; pastikan memverifikasi koefisien spesifik jika SNI 6381:2020 melakukan penyesuaian lokal.

3. Estimasi Pasokan Angin Pasif (Q_{supply}):

Kapasitas udara akibat dorongan angin (wind-driven) dihitung dengan persamaan (3). Dimana C_v adalah koefisien efektivitas bukaan ($C_v = 0,50-0,60$ untuk angin tegak lurus), A_v adalah luas bersih bukaan (m²), dan v adalah kecepatan angin regional (m/s). Batasan yang kami terapkan adalah bahwa formula ini berfokus pada *wind-driven*. *Stack effect* (efek cerobong akibat gradien suhu) tidak dihitung secara eksplisit dalam model deterministik cepat ini untuk menjaga kesederhanaan perhitungan.

4.3 Matriks Keputusan dan Rekomendasi Desain

Fase akhir mengelompokkan hasil ke dalam matriks kepatuhan. Atasannya luas bukaan minimal 10% merujuk pada Permen PUPR No. 14/PRT/M/2017 tentang Persyaratan Kemudahan Bangunan Gedung (atau SNI 6398:2015 untuk bangunan hijau).

Tabel 4.1 Parameter Evaluasi Ventilasi Alami

Kondisi Parameter	Status Evaluasi	Rekomendasi Tindakan / Output Konstruksi
$Q_{supply} \geq Q_{demand}$ DAN $A_v \geq 10\% A_f$	Patuh Penuh (<i>Fully Compliant</i>)	Desain ventilasi alami optimal. Tidak diperlukan modifikasi atau tambahan alat mekanis.
$Q_{supply} \geq Q_{demand}$ TETAPI $A_v \geq 10\% A_f$	Patuh Kecepatan (<i>Velocity Compliant Only</i>)	Pasokan udara cukup karena kecepatan angin tinggi, namun luas bukaan melanggar aturan fisik arsitektur. Disarankan memperbesar rasio jendela untuk mitigasi saat angin tenang. Risiko tinggi terjadi akumulasi panas dan CO ₂ . Desain wajib diubah menjadi Sistem Ventilasi Hibrida dengan
$Q_{supply} < Q_{demand}$	Tidak Patuh (<i>Non-Compliant</i>)	menambahkan komponen mekanis (seperti axial <i>exhaust fan</i> atau <i>turbine ventilator</i>).

4.4 Studi Kasus dan Validasi Framework

Untuk membuktikan kepraktisan, *framework* diuji pada ruang kerja hipotetis di Jakarta dengan data sekunder BMKG. Parameter Input: Ruang 6m x 8m (Luas $A_f = 48 \text{ m}^2$, Tinggi 3m, Volume $V = 144 \text{ m}^3$). Okupansi (N) = 10 orang. Kecepatan angin rata-rata Jakarta (v) = 2,5 m/s. Suhu luar rata-rata (T_{rm}) = 28°C. Luas bukaan eksisting (A_v) = 3,0 m².

Perhitungan:

1. Fase 2 (*Demand & Comfort*):

$$Q_{demand} = 10 \times 0,0085 \text{ m}^3/\text{s} = 0,085 \text{ m}^3/\text{s}.$$

$$T_{comf} = (0,31 \cdot 28) + 17,8 = 26,48^\circ\text{C}.$$

2. Fase 3 (*Supply*):

$$\text{Asumsi } C_v = 0,5. \quad Q_{supply} = 0,5 \times 3,0 \times 2,5 = 3,75 \text{ m}^3/\text{s}.$$

$$\text{Rasio bukaan } R_{av} = 3,0 / 48 = 6,25\%.$$

3. Fase 4 (Matriks):

$$Q_{supply} (3,75) > Q_{demand} (0,085).$$

$$R_{av} (6,25\%) \text{ masuk dalam rentang standar minimal (5-10\%).}$$

Output: Ruang ini berstatus Patuh Penuh secara ventilasi alami.

Suhu operasional target 26,48°C secara teoritis dapat didekati jika suhu luar tidak mengalami *heatwave* ekstrem.

Untuk menguji respons *framework* terhadap perubahan parameter input, dilakukan uji sensitivitas pada tiga variabel kunci: luas bukaan (A_v), kecepatan angin (v), dan jumlah okupansi (N). Hasilnya disajikan pada Tabel 4.2. Hasil uji sensitivitas menunjukkan bahwa, luas bukaan merupakan variabel paling kritis dimana perubahan kecil pada A_v dapat mengubah status kepatuhan. Kecepatan angin memiliki ambang batas sekitar 1,8 m/s; di bawah nilai tersebut, ventilasi alami tidak cukup memenuhi kebutuhan. Kemudian, okupansi mempengaruhi Q_{demand} secara linear; ruang dengan kepadatan tinggi (>15 orang untuk ruang 48 m²) memerlukan tambahan ventilasi mekanis. Hasil ini menunjukkan bahwa *framework* dapat membantu perancang mengidentifikasi parameter desain yang paling kritis untuk dioptimalkan.

Tabel 4.2 Uji Sensitivitas Parameter Input

Variabel	Rentang Uji	Dampak pada Status Kepatuhan
A_v	1,0 – 5,0 m ²	Pada $A_v < 2,4\text{m}^2$, status berubah menjadi “Tidak Patuh”
v	1,0 – 4,0 m/s	Pada $v < 1,8$ m/s, status berubah menjadi “Tidak Patuh”
N	5 – 20 orang	Pada $N > 15$ orang, status berubah menjadi “Tidak Patuh”

5. KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil merumuskan sebuah kerangka kerja (framework) evaluasi desain ventilasi alami yang sistematis, deterministik, dan terintegrasi dengan standar nasional Indonesia, yaitu SNI 03-6572-2001 dan SNI 6381:2020. Framework ini menjawab kebutuhan mendesak akan alat evaluasi yang praktis pada tahap desain awal (early design stage), di mana pendekatan konvensional seperti simulasi CFD atau pengukuran empiris pasca-konstruksi sering kali tidak efisien dari segi waktu dan biaya.

Kontribusi utama penelitian ini adalah tersusunnya sebuah kerangka kerja evaluasi yang bersifat praktis dan terukur, yang mengisi kesenjangan antara tuntutan regulasi nasional dan keterbatasan alat evaluasi pada tahap desain awal. Secara spesifik, kontribusi tersebut meliputi:

1. Integrasi tiga komponen evaluasi (kebutuhan aliran udara sesuai SNI 03-6572-2001, model kenyamanan termal adaptif sesuai SNI 6381:2020, dan estimasi kapasitas pasok ventilasi alami berbasis aerodinamika dasar) ke dalam satu alur keputusan yang koheren
2. Matriks kepatuhan tiga kategori (Patuh Penuh, Patuh Aliran namun Cacat Fisik, dan Tidak Patuh) yang menghasilkan rekomendasi tindakan desain secara langsung dan objektif
3. Aksesibilitas bagi praktisi karena tidak memerlukan simulasi CFD, perangkat lunak mahal, atau keahlian komputasi khusus

Kebaruan framework ini tidak terletak pada formula matematis yang digunakan (yang merupakan rumus standar), melainkan pada cara pengintegrasian dan penyederhanaan komponen-komponen tersebut menjadi alat bantu keputusan yang sistematis dan berbasis regulasi—sebuah pendekatan yang belum tersedia dalam literatur yang ada.

Implikasi praktis dari *framework* ini sangat signifikan bagi ekosistem industri konstruksi Indonesia. Bagi arsitek dan perancang bangunan, alat ini menyediakan mekanisme umpan balik cepat untuk mengiterasi desain bukaan ventilasi sebelum committing ke tahap detail desain. Bagi auditor energi dan konsultan bangunan hijau, *framework* ini memungkinkan pelaksanaan audit dokumen meja yang terstandarisasi tanpa bergantung pada perangkat lunak simulasi mahal. Bagi regulator, pendekatan ini menawarkan metodologi verifikasi kepatuhan yang transparan dan dapat direproduksi.

Meskipun demikian, penelitian ini memiliki beberapa batasan yang perlu diakui. Keterbatasan metodologis dari sisi penyederhanaan model. Pengabaian *stack effect* membatasi penerapan framework pada bangunan rendah (≤ 4 lantai). Untuk bangunan tinggi, diperlukan modifikasi model. Pada validasi empiris terbatas, *framework* baru divalidasi pada satu studi kasus hipotetis dan belum diuji dengan data lapangan aktual atau simulasi CFD. Kemudian dalam data iklim sekunder, penggunaan data BMKG stasiun terdekat belum sepenuhnya mengakomodasi variasi iklim mikro lokal.

Dampak keterbatasan terhadap hasil diantaranya adalah hasil prediksi Q_{supply} mungkin overestimate untuk bangunan tinggi tanpa ventilasi silang yang baik. Status kepatuhan yang dihasilkan bersifat indikatif, bukan konklusif. Sehingga *framework* berfungsi sebagai alat saring (*screening tool*), bukan pengganti analisis detail.

Penelitian selanjutnya direkomendasikan untuk mengembangkan *framework* ini dengan beberapa arah. Pertama, integrasi komponen *stack effect* ke dalam model matematis untuk meningkatkan akurasi estimasi pasokan udara pada bangunan tinggi. Kedua, pengayaan model

dengan data iklim mikro lokal yang diperoleh dari pengukuran *on-site* atau perangkat sensor IoT berbiaya rendah. Ketiga, ekspansi validasi *framework* pada berbagai tipologi bangunan (pendidikan, kesehatan, hunian vertikal) untuk menguji robustnes matriks kepatuhan. Keempat, pengembangan *framework* ini menjadi perangkat lunak sederhana atau *spreadsheet tool* yang dapat diadopsi secara luas oleh praktisi industri. Dengan pengembangan tersebut, *framework* ini berpotensi menjadi jembatan metodologis yang efektif antara tuntutan regulasi bangunan hijau nasional dan realitas praktik perancangan di lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

- Almomani, R. M. (2026). Effects of Window Design on Natural Ventilation and Daylighting in Single-Sided Computer Labs in Hot-Arid Climates. *Journal of Daylighting*, 13(1), 253–272. <https://doi.org/10.15627/jd.2026.14>
- Amelia, P. (2024). Pengaruh termal terhadap kenyamanan bangunan: Studi tentang pengaruh letak bukaan terhadap kenyamanan termal pada bangunan rumah tinggal. In *Maliki Interdisciplinary Journal (MIJ) eISSN* (Vol. 2, Number 6). <http://urj.uin-malang.ac.id/index.php/mij/index>
- Fitri Astuti, R., & Aji Prasetyo, S. (2025). Penerapan Konsep Arsitektur Kontemporer Tropis dalam Perencanaan Desain Rumah Tinggal. *Jurnal Pengabdian Pelita Bangsa*, 6(2). <https://jurnal.pelitabangsa.ac.id/index.php/jabmas>
- Hadi, Y., Azaria, T., Putrianto, N. K., Oktiarso, T., Ekawati, Y., & Noya, S. (2020). Analisis Kenyamanan Termal Ruang Kuliah. *Jurnal Metris* 21, 13(26). <http://ojs.atmajaya.ac.id/index.php/metris>
- Hanif, H. (2022). Towards achieving Platinum standards for Green Building certification: a case study using Jakarta International Stadium (JIS) design. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 997(1), 012006. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/997/1/012006>
- Hanif, H., Khan, A. Z., Alhamid, M. I., & Yamaguchi, Y. (2024). Building Stock and Emission Models for Jakarta. *Resilient Cities and Structures*, 3(4), 63–82. <https://doi.org/10.1016/j.rcns.2024.10.002>
- Hanif, H., Khan, A. Z., Alhamid, M. I., & Yamaguchi, Y. (2026). Pathways to net zero: Scenario analyses of urban building stocks in Jakarta. *Energy and Buildings*, 353, 116919. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116919>
- Rahmawati, Arif Kamaludin Firdaus Akbar, & Agustin, F. K. (2016). Penghawaan Alami Terkait Sistem Ventilasi Terhadap Kenyamanan Termal Rumah Susun Industri Dalam. *Jurnal Reka Karsa © Jurusan Teknik Arsitektur Itenas | No.1 |*, 4(1).