

Pengaruh Bukaannya Terhadap Penghawaan Pasif pada Hunian Kompak dengan Lahan Terbatas di Surabaya

Efata Devina Putri Sutanto^{1*}, Agus Dwi Hariyanto²

^{1,2} Program Studi Magister Arsitektur, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Kristen Petra, Surabaya, Indonesia

Article Info:

Submitted: January 8th, 2026

Reviewed: January 28th, 2026

Accepted: September 23rd, 2026

Keywords:

Penghawaan pasif;

Hunian kompak;

Kecepatan angin;

Temperatur udara;

Desain bukaan

Corresponding Author:

Efata Devina P.S

Program Studi Magister Arsitektur,
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan,
Universitas Kristen Petra
Jl. Siwalankerto 121-131 Surabaya,
Indonesia

Email: efata.devina@gmail.com

Abstrak

Keterbatasan lahan di kawasan perkotaan mendorong berkembangnya hunian kompak, namun seringkali membatasi penerapan penghawaan alami akibat desain bukaan yang kurang optimal. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh parameter bukaan terhadap kinerja penghawaan pasif pada hunian kompak di Surabaya menggunakan simulasi CFD. Analisis dilakukan pada dua studi kasus berdasarkan orientasi, lokasi, dimensi, rasio, dan tipe bukaan. Setelah itu, dikembangkan dua skenario dengan penambahan *outlet* di dekat atap dengan prinsip *stack ventilation*. Hasil menunjukkan bahwa orientasi, lokasi, dan dimensi bukaan berpengaruh terhadap distribusi aliran udara dan temperatur ruang. Penambahan *outlet* atas meningkatkan kecepatan aliran udara serta menurunkan temperatur ruang, sehingga berpotensi menjadi strategi desain pada hunian kompak di lahan terbatas untuk meningkatkan kenyamanan termal

Abstract

Limited urban land has encouraged the development of compact housing, but it often restricts the application of natural ventilation due to suboptimal opening design. This study aims to analyze the influence of opening design parameters on passive ventilation performance in compact housing in Surabaya using Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation. Two case studies were evaluated based on opening orientation, location, dimension, ratio, and type, followed by two design scenarios incorporating roof-level outlets based on the stack ventilation principle. The results indicate that opening orientation, location, and dimension significantly affect airflow distribution and indoor temperature. Adding roof-level outlets improved airflow performance and reduced indoor temperature, demonstrating its potential as a passive design strategy for enhancing thermal comfort in compact housing on limited urban land.

This is an open access article under the CC BY license.



PENDAHULUAN

Hingga saat ini, permasalahan perkotaan modern semakin kompleks dan saling terkait. Salah satunya merupakan urbanisasi yang tidak bisa lepas dari perkotaan, seperti Surabaya. Berdasarkan jumlah penduduk, Surabaya merupakan kota dengan kepadatan penduduk tertinggi kedua di Indonesia, mencapai 3.021.043 jiwa pada tahun 2024 (Badan Pusat Statika, 2024). Seiring bertambahnya populasi, kebutuhan dan permintaan akan lahan untuk hunian akan ikut meningkat, yang menyebabkan semakin terbatasnya lahan di perkotaan. Selain berpengaruh pada kebutuhan akan hunian, bertambahnya jumlah penduduk berdampak pada konsumsi energi pun ikut meningkat. Berdasarkan data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), Indonesia mengalami peningkatan konsumsi energi sebanyak kurang lebih 13,98% di tahun 2023 dibanding tahun sebelumnya dan diprediksi akan bertambah di tahun berikutnya.

Berdasarkan klasifikasi iklim Köppen, Surabaya berada di iklim tropis lembap, ditandai dengan musim hujan dan musim kemarau. Kondisi ini membuat Surabaya harus menghadapi tantangan iklim, terlebih lagi suhu yang

semakin meningkat karena dampak pemanasan global. Sulistyono (2012) menyebutkan, suhu global telah meningkat secara signifikan, hampir dua kali lebih cepat dalam 50 tahun terakhir dibandingkan periode sebelumnya dan diperkirakan akan berlanjut dan semakin intensif dalam beberapa dekade mendatang. Situasi ini telah mengakibatkan perubahan iklim, pergeseran pola cuaca, dan berbagai kerusakan lingkungan. Kondisi ini kemudian membuat masyarakat mencari cara instan untuk mencapai kenyamanan dengan menggunakan pendinginan aktif pada hunian. Salah satu yang paling sering digunakan adalah AC. AC dapat berdampak negatif terhadap lingkungan, terutama karena adanya kandungan refrigeran, seperti freon. Freon adalah senyawa kimia klorofluorokarbon (CFC) yang berpotensi mempercepat pemanasan global. Ketika dilepaskan ke atmosfer, freon dapat merusak dan menipiskan lapisan ozon, yang melindungi Bumi dari radiasi ultraviolet (Kerdiati & Sarmastuti, 2018).

Isu-isu yang saling terkait dan berhubungan ini akan terus-menerus berputar dan akan semakin memperburuk kondisi lingkungan jika tidak diselesaikan. Jika masalah ini tidak dikelola dengan bijak, maka dampak negatif yang ditimbulkan akan semakin besar, baik bagi lingkungan maupun bagi kualitas hidup manusia di kota-kota besar seperti Surabaya. Oleh karena itu, diperlukan upaya terkoordinasi untuk mengatasi masalah ini. Perkembangan perkotaan besar seperti Surabaya seringkali menghadirkan tekanan terhadap kualitas lingkungan, sehingga penerapan kebijakan yang berorientasi pada keberlanjutan dapat membantu mengendalikan dampak negatif pertumbuhan perkotaan terhadap lingkungan (UN-Habitat, 2013)

Berbagai usaha dilakukan untuk mengurangi ketergantungan masyarakat pada pendinginan aktif dengan menciptakan desain-desain hunian yang berfokus pada penghawaan alami. Namun, efektivitasnya dipengaruhi oleh beberapa faktor. Di sisi lain, muncul berbagai inovasi dan konsep hunian yang memudahkan masyarakat beradaptasi di lingkungan dengan lahan yang terbatas. Muncul berbagai tren hunian minimalis, seperti hunian kompak yang merupakan konsep rumah mungil dengan lahan dan luasan terbatas, menjadi pilihan yang menarik di kalangan masyarakat dengan penggunaan energi yang relatif lebih sedikit. Dengan merumuskan strategi desain yang dapat mengoptimalkan penghawaan pasif hunian kompak minimalis pada lahan terbatas, dapat tercipta kebutuhan hunian yang nyaman sekaligus menciptakan lingkungan hidup yang lebih berkelanjutan dan nyaman.

Dalam penerapan ventilasi alami, desain bukaan merupakan elemen penting dalam menentukan keberhasilan ventilasi alami di dalam sebuah bangunan. Desain bukaan yang tidak tepat dapat mengakibatkan sirkulasi udara yang suboptimal, sehingga sulit untuk mencapai kenyamanan termal bahkan di bangunan yang telah menerapkan ventilasi alami (Rahmawati et al., 2016). Dengan merumuskan strategi desain bukaan yang dapat mengoptimalkan penghawaan pasif hunian kompak minimalis pada lahan terbatas, dapat tercipta kebutuhan hunian yang nyaman sekaligus menciptakan lingkungan hidup yang lebih berkelanjutan dan nyaman.

KAJIAN LITERATUR

Penghawaan Pasif

Penghawaan pasif merupakan strategi desain yang menekankan pengolahan panas, pembuangan panas/mengurangi panas (*natural cooling*) dalam bangunan, dan mencegah panas dari luar masuk ke bangunan (*heat gain prevention*) dengan tujuan terciptanya kenyamanan termal. Lechner (2014) mendefinisikan penghawaan pasif sebagai pendekatan desain yang memanfaatkan energi alami untuk meningkatkan kenyamanan pengguna bangunan dengan cara melibatkan pemanfaatan ventilasi alami, pencahayaan alami, dan pengendalian panas matahari. Cara ini dilakukan dengan pengaturan orientasi bangunan dan bukaan, ventilasi alami, pengaruh material, dan pemberian elemen peneduh sehingga tercipta kondisi yang nyaman dengan konsumsi energi yang lebih rendah. Ahmed (2021) menjelaskan bahwa ventilasi alami merupakan strategi kunci untuk pendinginan pasif di iklim panas dan lembap. Ventilasi alami dapat mengurangi ketergantungan pada pendinginan mekanis dan meningkatkan efisiensi energi bangunan. Strategi penghawaan pasif tidak hanya berfokus pada penurunan suhu ruang, tetapi juga meningkatkan kualitas udara dalam ruang dan kesehatan pengguna bangunan.

Ventilasi alami adalah proses pertukaran udara yang terjadi secara alami karena pengaruh angin dan perbedaan tekanan udara, tanpa bantuan perangkat mekanis seperti pendingin udara atau kipas angin. Penerapan ventilasi alami bertujuan untuk meningkatkan pertukaran udara dalam ruang dengan memasukan udara segar, sehingga membantu mengurangi kadar polusi udara, mendukung penghawaan pasif, dan menekan konsumsi energi bangunan (Sativa & Adilline, 2021). Sistem ini juga berfungsi untuk membawa udara segar ke dalam bangunan sekaligus mengeluarkan udara panas dan pengap dari ruangan, sehingga menciptakan kualitas udara dan kenyamanan termal yang lebih baik. Khan et al., (2008) menjelaskan bahwa ada 2 prinsip utama dalam ventilasi alami, yaitu *wind-driven ventilation* dan *stack effect ventilation*. Ventilasi alami dipahami sebagai sistem yang memanfaatkan kondisi iklim alami untuk menghasilkan pergerakan udara di dalam bangunan. Sistem ini merupakan strategi kunci dalam penghawaan pasif karena dapat mengurangi penggunaan energi pendinginan mekanis sekaligus meningkatkan kualitas udara dalam ruangan.

Ventilasi alami memiliki peranan penting dalam meningkatkan efisiensi energi dan menciptakan lingkungan yang sehat pada bangunan dengan iklim tropis lembap (Ahmed, 2021). Ventilasi alami memainkan peran penting dalam kualitas udara dalam ruangan, kenyamanan termal, dan konsumsi energi bangunan (Jiang et al., 2023). Dapat dijelaskan bahwa keberhasilan ventilasi alami sangat dipengaruhi oleh desain bukaan, orientasi bangunan, arah angin dominan, serta pola aliran udara di dalam ruang. Song dan Lau (2019), mengatakan arah angin dominan, ukuran bukaan, rasio masuk-keluar, dan konfigurasi ruangan harus dipertimbangkan untuk memastikan aliran udara yang optimal. Lebih lanjut, Song dan Lau (2019) menekankan bahwa ventilasi alami yang baik dapat meningkatkan pertukaran udara, meningkatkan kualitas udara dalam ruangan, dan mendukung kualitas lingkungan dalam bangunan. Dalam penerapannya, ventilasi alami memiliki beberapa tipe utama, yaitu *single-sided ventilation*, ventilasi alami (*cross ventilation*), dan *stack ventilation* (Ohba & Lun, 2010).

Single-sided Ventilation

Ventilasi satu sisi adalah sistem ventilasi alami yang hanya menggunakan bukaan di satu sisi ruangan. Sistem ini mengandalkan turbulensi udara dan perbedaan tekanan kecil untuk menghasilkan aliran udara di dalam ruangan. Menurut Zhou et al. (2021), performa ventilasi ini dipengaruhi oleh ukuran bukaan, posisi bukaan, dan kecepatan angin luar bangunan. Ventilasi pada satu sisi memiliki keterbatasan dalam hal distribusi udara pada ruang khususnya jika ruang terlalu dalam sehingga efektivitas pertukaran udara menjadi lebih rendah.

Ventilasi Silang

Ventilasi silang (*cross ventilation*) merupakan sistem ventilasi alami dengan memberikan dua bukaan pada sisi berbeda bangunan, sehingga udara dapat mengalir melintasi ruang. Sistem ini bekerja berdasarkan perbedaan tekanan udara antara sisi *windward* dan *leeward*. Menurut Jiang et al. (2023) ventilasi ini merupakan metode ventilasi paling efektif dalam menciptakan pertukaran udara dan meningkatkan kenyamanan termal. Efektivitas ventilasi silang sangat dipengaruhi oleh ukuran dan posisi bukaan, arah angin, dan konfigurasi interior bangunan. Dinding maupun interior yang menghalangi bukaan dapat mengganggu pola airflow dan menurunkan performa ventilasi silang.

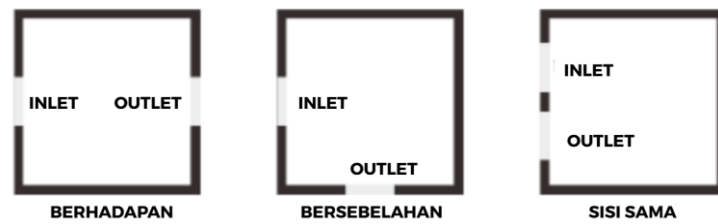
Stack Ventilation

Ventilasi cerobong, atau efek cerobong, adalah ventilasi alami yang terjadi karena perbedaan suhu udara di dalam bangunan. Udara panas, yang memiliki kepadatan lebih ringan, naik dan keluar melalui lubang atas, sementara udara yang lebih dingin masuk melalui lubang bawah (Nugrahanti et al., 2018). Mijorski dan Cammelli (2016) menjelaskan bahwa efek cerobong terjadi karena gaya *buoyancy* yang dipengaruhi oleh perbedaan suhu dan tinggi bangunan. Secara teori, semakin besar perbedaan tinggi antara *inlet* dan *outlet*, maka semakin besar pula potensi aliran udara yang terbentuk. Oleh sebab itu, strategi *stack ventilation* sering diterapkan melalui penggunaan atrium, *clerestory*, *solar chimney*, dan void pada bangunan tropis bertingkat.

Strategi Desain Bukaan

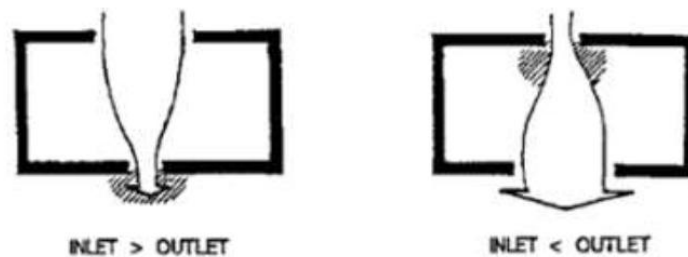
Desain pencahayaan merupakan faktor utama yang mempengaruhi kinerja ventilasi alami dan kenyamanan termal di dalam bangunan. Bukaan berfungsi sebagai saluran masuk dan keluar udara, sehingga konfigurasinya menentukan pola pergerakan udara (aliran udara) di dalam suatu ruangan. Faktor-faktor desain bukaan meliputi orientasi bukaan, lokasi bukaan, dimensi bukaan, rasio bukaan, jenis bukaan, arah bukaan, jalur sirkulasi udara, dan hambatan aliran udara (Rahmawati et al., 2016). Keberhasilan ventilasi alami tidak hanya dipengaruhi oleh keberadaan bukaan, tetapi juga oleh bagaimana bukaan tersebut dirancang dan ditempatkan dalam bangunan.

- Orientasi bukaan merupakan arah hadap bukaan terhadap arah angin dominan. Orientasi bukaan menentukan kemampuan bukaan dalam menangkap aliran udara dari luar bangunan. Orientasi bangunan dan arah bukaan harus mempertimbangkan arah angin dominan agar aliran udara dapat bergerak secara optimal di dalam ruang. Aynsley (2014) menjelaskan bahwa bukaan sebaiknya ditempatkan menghadap arah angin dominan agar mampu menangkap aliran udara secara optimal. Selain itu, jendela idealnya ditempatkan pada dua sisi ruang untuk menciptakan ventilasi silang (*cross ventilation*). Perubahan orientasi bukaan menghasilkan pola angin yang berbeda secara signifikan (Hwang dan Gorlé, 2022).



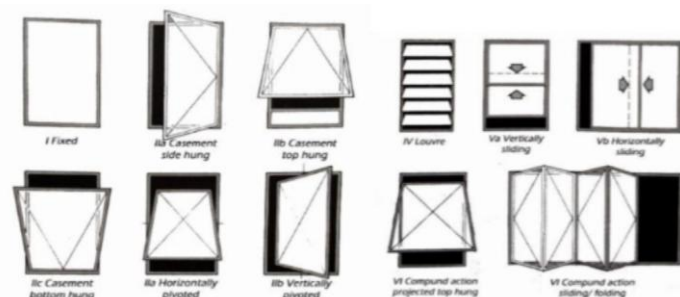
Gambar 1. Lokasi Bukaannya dengan posisi Inlet Terhadap Outlet
(Sumber: Iqbal et al., 2021)

- Lokasi bukaan berkaitan dengan posisi *inlet* dan *outlet* pada bangunan. Penempatan bukaan sangat menentukan pola ventilasi silang dan distribusi udara di dalam suatu ruangan. Rahmawati et al. (2016) menjelaskan bahwa lokasi bukaan yang tidak tepat mengakibatkan distribusi udara yang kurang optimal di dalam unit hunian, sehingga sulit untuk mencapai kenyamanan termal. Ventilasi silang bekerja dengan memanfaatkan perbedaan tekanan udara antara sisi yang menghadap angin dan sisi yang terlindung dari angin. Oleh karena itu, inlet dan outlet harus terletak di sisi yang berlawanan agar udara dapat mengalir secara efektif di seluruh ruangan (Jiang et al., 2023). Selanjutnya, Stavrakakis et al. (2008) menjelaskan bahwa posisi bukaan yang asimetris dapat menyebabkan distribusi aliran udara yang tidak merata di dalam suatu ruangan. Hal ini menunjukkan bahwa lokasi bukaan merupakan faktor penting dalam keberhasilan ventilasi alami.
- Dimensi bukaan merupakan seberapa luas ukuran bukaan yang digunakan sebagai jalur pertukaran udara. Hal ini sangat mempengaruhi volume udara yang dapat masuk dan keluar dari bangunan. Thomas et al. (2014) menjelaskan bahwa ukuran bukaan yang efektif untuk ventilasi alami adalah 5% luas lantai ruang. Berdasarkan SNI 03-6572-2001, ventilasi dalam ruangan harus memenuhi beberapa persyaratan, termasuk luas bukaan ventilasi tetap minimum 5% dari luas lantai, dan luas ventilasi insidental minimum (membuka dan menutup) 5% dari luas lantai. Totalnya menjadi 10% dari luas lantai. Selain itu, Boutet (1987) menjelaskan bahwa bukaan yang terlalu kecil menyebabkan aliran udara terbatas, sedangkan bukaan yang terlalu besar dapat meningkatkan panas matahari dan turbulensi udara yang berlebihan.



Gambar 2. Perbedaan rasio bukaan terhadap pola angin
(Sumber: Unifi ed Facilities Criteria 3-440-06N, 2004)

- Rasio bukaan adalah rasio luas bukaan terhadap luas lantai atau fasad bangunan. Rasio ini digunakan untuk menentukan efektivitas ventilasi alami dan pencahayaan alami. Aynsley (2014) menjelaskan bahwa area *outlet* harus lebih besar daripada area *inlet* karena udara yang masuk ke dalam bangunan akan mengalami perlambatan, sehingga membutuhkan area pelepasan udara yang lebih besar agar ventilasi alami tetap optimal.



Gambar 3. Macam tipe bukaan
(Sumber: Iqbal et al., 2021)

- Tipe bukaan merupakan bentuk atau jenis bukaan yang digunakan pada bangunan. Tipe ini terdiri dari berbagai macam, seperti *casement window*, *jalousie window*, *sliding window*, *louver*, dan *fixed ventilation*. Tipe bukaan memiliki pengaruh terhadap penentuan arah dan kecepatan udara (Rahmawati et al., 2016). Menurut Kasutova et al. (2019), penggunaan louver atau jalousie mampu membantu mengarahkan airflow dan mengurangi turbulensi udara. Selain itu, Wang & Wong (2007) menjelaskan bahwa tipe bukaan yang dapat dioperasikan lebih efektif daripada bukaan permanen karena memungkinkan pengguna untuk mengontrol jumlah aliran udara sesuai dengan kondisi iklim.
- Pengarah bukaan adalah elemen yang membantu mengarahkan aliran udara ke dalam suatu ruangan, sedangkan penghalang aliran udara adalah elemen yang menghalangi pergerakan udara, seperti dinding, perabot, dan partisi. Rahmawati et al. (2016) menjelaskan bahwa jalur sirkulasi dan penghalang di dalam bangunan mempengaruhi kenyamanan termal suatu ruangan. Lebih lanjut, Boutet (1987) menjelaskan bahwa jalur aliran udara harus dijaga sesederhana mungkin tanpa terlalu banyak hambatan untuk memastikan ventilasi alami yang optimal.

Kenyamanan Termal Terkait Kecepatan Angin dan Temperatur

Tabel 1. Standar kecepatan udara didalam ruangan (Lippsmeier, 1997)

Standar Kecepatan Angin	Keterangan
0,1 – 0,25 m/s	nyaman tanpa adanya rasa gesekan udara
0,25 – 0,5 m/s	nyaman gesekan udara mulai terasa
0,5 – 1,0 m/s	gerakan udara terasa ringan
1,0 – 1,5 m/s	aliran udara ringan sampai tidak menyenangkan
Diatas 2,5 m/s	Aliran udara tidak menyenangkan dan diperlukan pengkondisian udara
Kenyamanan angin dalam ruang berkisar antara 0,25 m/s – 1,15 m/s. ((MENKES: NO.262/MENKES/SK/II, 1998)	

Tabel 2. Standar kenyamanan termal (temperatur) berdasarkan SNI 03-6572-2001

Standar Kenyamanan Temperatur	Keterangan
TE 20°C – 22,8 °C	Sejuk nyaman
TE 22,8°C – 25,8°C	Nyaman optimal
TE 25,8°C – 27,1°C	Hangat nyaman
Diatas 27,1°C	Tidak nyaman

Parameter Desain Bukaan

Tabel 3. Parameter desain bukaan untuk ventilasi alami

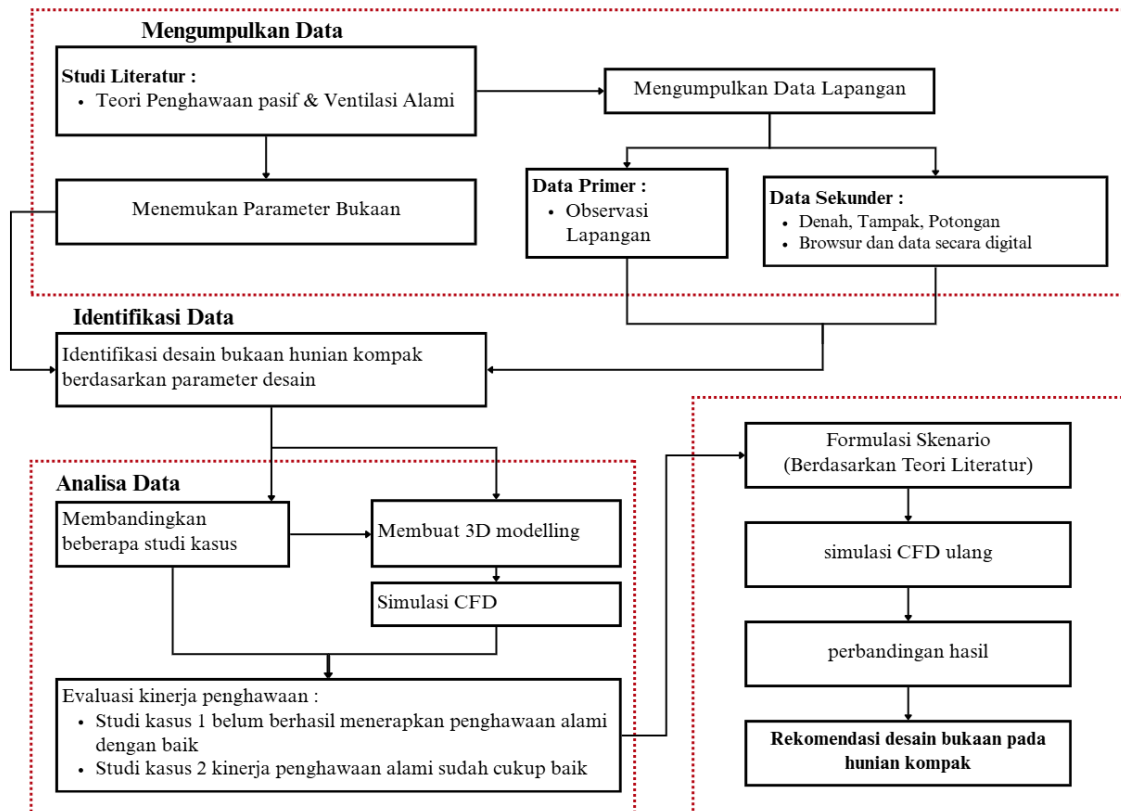
Parameter	Penjelasan	Acuan/Standar	Sumber
Orientasi Bukaan	Arah bukaan terhadap arah angin	Bukaan menghadap arah angin dominan	Song (2019); Hwang & Gorlé (2022)
Lokasi Bukaan	Posisi <i>inlet</i> dan <i>outlet</i>	<i>Inlet</i> dan <i>Outlet</i> berada pada sisi berlawanan, menciptakan ventilasi silang. <i>Outlet</i> lebih tinggi membantu <i>stack effect</i>	Jiang et al. (2023); Rahmawati et al. (2016) Boutet (1987)
Dimensi Bukaan	Persentase bukaan terhadap luas lantai	10-15% luas lantai ruang	Thomas et al. (2014); Maulidina et al. (2020)
Rasio Bukaan	Perbandingan <i>inlet</i> dan <i>outlet</i>	<i>Outlet</i> lebih besar dari <i>inlet</i> agar <i>air flow</i> lancar	Boutet (1987); Aynsley (2014)
Tipe Bukaan	Jenis bukaan yang digunakan	<i>Casement</i> /jalusi lebih efektif menangkap angin dibandingkan tipe <i>sliding</i>	Kasutova et al. (2019); Wang & Wong (2007)
Pengarah Bukaan	Penggunaan elemen pengarah angin	Pemberian <i>louver</i> , jalusi, dsb	Kasutova et al. (2019)
Hambatan Airflow	Keberadaan penghalang airflow	Minim sekat, furnitur besar, dan dinding masif	Boutet (1987); Rahmawati et al. (2016)

METODE

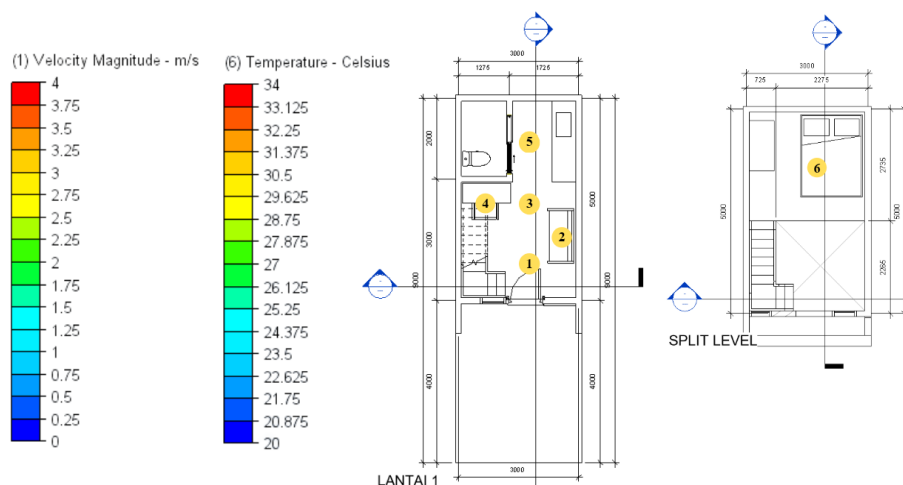
Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan simulasi menggunakan pemodelan hunian kompak untuk melihat kinerja penghawaan alami pada hunian kompak. Diawali dengan pengumpulan data lapangan (data primer dan

sekunder) dan sumber studi literatur, penelitian ini berfokus pada analisis kinerja penghawaan alami pada hunian kompak di Surabaya melalui simulasi menggunakan *software* CFD Autodesk. Simulasi adalah pendekatan yang memungkinkan peneliti untuk memodelkan, mengeksplorasi, dan memahami fenomena kompleks tanpa harus melakukan eksperimen langsung di dunia nyata. Simulasi memberikan fleksibilitas untuk menguji berbagai skenario dan parameter dalam lingkungan yang terkendali. Analisis ini terbatas pada parameter-parameter berikut:

- **Kecepatan aliran udara (*air flow rate*):** Dilakukan pengukuran kecepatan aliran udara di berbagai titik dalam ruangan untuk mengetahui pola sirkulasi udara, dengan range 0,00-4,00+m/s.
- **Arah aliran udara (*wind vector*):** Dilakukan visualisasi arah aliran udara untuk mengidentifikasi jalur aliran udara dominan dalam ruangan.
- **Temperatur ruangan:** Dilakukan pengukuran suhu ruangan untuk mengetahui kondisi termal dalam ruangan, dengan range 20,0-34,0+°C.



Gambar 4. Diagram tahapan penelitian



Gambar 5. Parameter *air flow*, temperatur, dan titik pengambilan sampel

Pengambilan sampel dilakukan dengan menentukan titik yang ingin diukur, yaitu berdasarkan kegiatan penghuni bangunan pada ketinggian 1 meter. Titik yang dipilih yaitu pada area *entrance* masuk, dapur, ruang makan, ruang tamu, dan titik tengah bangunan. Titik-titik ini ditetapkan pada semua studi kasus untuk mendapatkan data pengukuran yang seimbang (gambar 4). Studi kasus yang diuji merupakan hunian kompak yang berlokasi di Gunung Anyar, Surabaya Timur. Studi kasus yang dipilih memiliki konsep *cluster* dengan luas lahan 23-30 m² dan luas bangunan 20-40 m². Studi kasus dipilih berdasarkan kesamaan tipologi hunian kompak, dengan variasi strategi penghawaan alami. Perbandingan ini bertujuan untuk menilai penerapan parameter desain bukaan terhadap kinerja penghawaan, meskipun berada dalam karakteristik hunian yang serupa. Langkah berikutnya adalah melakukan simulasi *air flow rate* dan temperatur untuk melihat sejauh mana desain bukaan mampu menghadirkan ventilasi alami. Berdasarkan hasil identifikasi bukaan dan simulasi, dilakukan pengembangan desain bukaan terhadap studi kasus yang akan disimulasikan kembali dengan menetapkan alternatif skenario untuk menguji efektivitas sejauh mana pengembangan desain bukaan mampu mengoptimalkan penghawaan alami. Hasil ini kemudian akan menjadi rekomendasi desain hunian kompak untuk kedepannya.



Gambar 6. Data lokasi studi kasus

Studi Kasus 1

Studi kasus pertama merupakan rumah dengan konsep *mezzanine* di perumahan *cluster* kawasan Gunung Anyar, Surabaya, dengan angin dominan dari arah barat dengan kecepatan 2,1 m/s. Hunian memiliki luas tanah 27 m² dan luas bangunan 24 m². Hunian ini dirancang dengan *carport* pada area depan, desain minimalis dan open plan pada lantai 1, yang difungsikan sebagai ruang tengah, dapur, area makan, dan kamar mandi, sedangkan lantai atas dimanfaatkan sebagai ruang tidur saja. Terdapat 2 tipe unit, yaitu tipe corner dengan bukaan jendela pada sisi samping pada kedua lantai dan 2 bukaan jendela pada fasad depan. Lainnya merupakan tipe reguler dengan 2 bukaan jendela pada fasad depan saja. Pada kedua tipe, lantai atas berupa fasad kaca (jendela mati) tanpa bukaan.



Gambar 7. Studi kasus 1

Studi Kasus 2

Studi kasus kedua adalah hunian *mezzanine* di perumahan *cluster* daerah Rungkut, Surabaya, yang memiliki angin dominan dari arah barat dengan kecepatan 2,3 m/s. Hunian ini memiliki luas tanah 25 m² dan luas bangunan 20 m². Hunian memiliki *carport* pada sisi samping hunian, sehingga antarbangunan memiliki jarak. Bangunan dirancang dengan gaya minimalis menggunakan atap pelana. Pada lantai 1 terdapat 2 jendela hidup yang ditempatkan

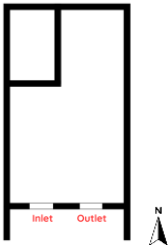
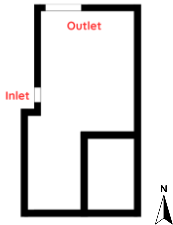
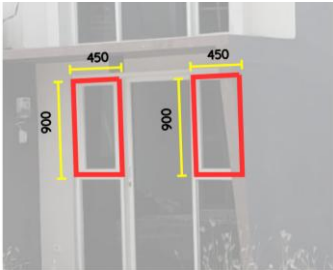
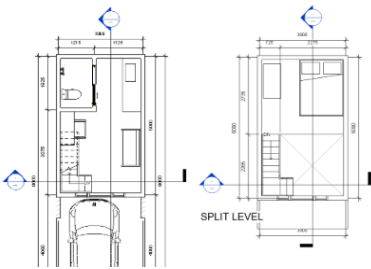
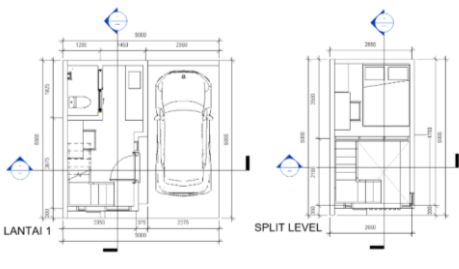
di fasad depan dan sisi samping bangunan. Lantai atas dilengkapi dengan jendela mati pada fasad depan dan sudut bangunan.



Gambar 8. Studi kasus 2

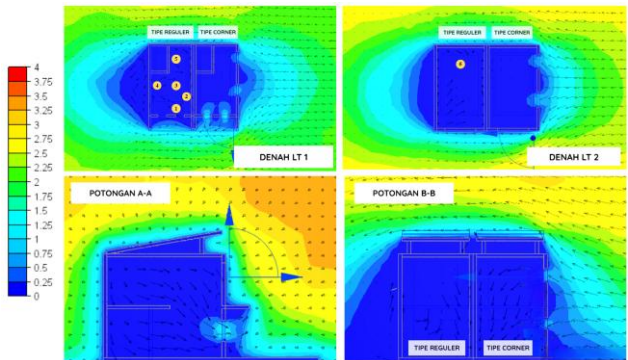
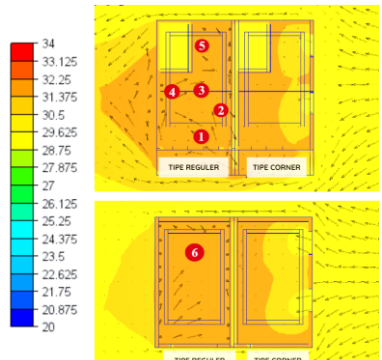
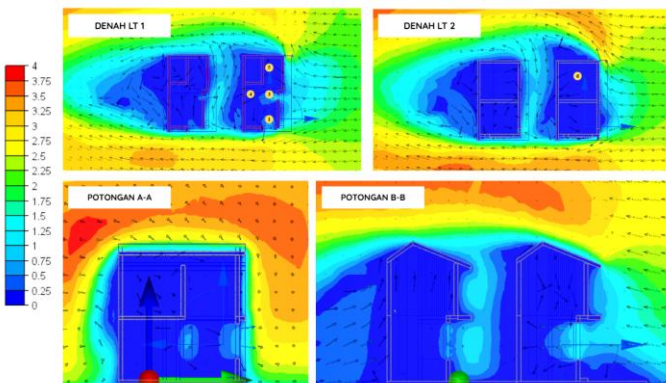
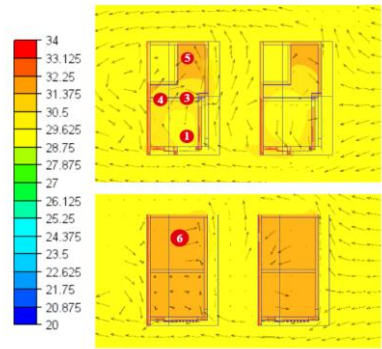
HASIL & PEMBAHASAN

Tabel 4. Desain bukaan pada studi kasus

Parameter Desain Bukaan	Desain Hunian Kompak	
	Studi Kasus 1	Studi Kasus 2
Orientasi Bukaan	Bukaan memiliki orientasi ke arah Utara-selatan, tidak menghadap arah angin dominan.	Bukaan memiliki orientasi ke arah Utara dan Barat, menghadap arah angin dominan.
Lokasi Bukaan	 <i>Inlet dan outlet berada pada pada sisi yang sama (single-sided ventilation)</i>	 <i>Inlet dan outlet bersebelahan</i>
Dimensi Bukaan	 6,75% terhadap luas lantai ruang 10,8% terhadap luas dinding	 10,8% terhadap luas lantai ruang 7,1% terhadap luas dinding
Rasio Bukaan	<i>Outlet: inlet</i> = 1, seimbang	<i>Outlet: inlet</i> = 0,45. outlet lebih kecil daripada inlet, udara masuk lebih banyak dibanding udara keluar
Tipe Bukaan	Menggunakan tipe bukaan <i>casement</i>	Menggunakan tipe bukaan <i>casement</i>
Pengaruh Bukaan	 Tidak ada pengarah bukaan	 Tidak ada pengarah bukaan
Hambatan Airflow	Desain hunian <i>open plan</i> dan minim sekat antar ruang.	Desain hunian <i>open plan</i> dan minim sekat antar ruang

Berdasarkan hasil identifikasi desain bukaan pada kedua studi kasus (Tabel 4), terdapat beberapa perbedaan yang berpotensi mempengaruhi kinerja penghawaan alami bangunan. Pada studi kasus 1, bukaan tidak mengarah ke arah angin dominan dengan penerapan *single-side ventilation*, yaitu *inlet* dan *outlet* berada di sisi yang sama. Sebaliknya, Studi Kasus 2 memiliki orientasi bukaan ke arah Utara dan Barat yang lebih sesuai dengan arah angin dominan, dengan posisi *inlet* dan *outlet* yang berada pada sisi berbeda sehingga memungkinkan terjadinya ventilasi silang (*cross ventilation*). Ditinjau dari aspek dimensi bukaan, studi kasus 2 memiliki persentase bukaan yang lebih besar dengan rasio outlet lebih kecil dibandingkan dengan outlet, sedangkan pada studi kasus 1 memiliki persentase luas bukaan dibawah standar walaupun rasio *inlet outlet* yang seimbang. Perbedaan orientasi, lokasi, dimensi, dan rasio bukaan ini diduga memengaruhi pola aliran udara dan distribusi suhu di dalam bangunan. Oleh karena itu, simulasi CFD diperlukan untuk mengevaluasi sejauh mana setiap parameter desain bukaan memengaruhi kinerja ventilasi alami dalam kedua studi kasus.

Tabel 5. Hasil simulasi pada studi kasus

Desain Hunian Kompak	Hasil Simulasi CFD Autodesk	
	Airflow & Wind Vector	Temperatur
Studi Kasus 1		
	Simulasi CFD menunjukkan bahwa unit <i>corner</i> memiliki kualitas ventilasi yang lebih baik daripada unit biasa. Bukaan di kedua sisi memungkinkan udara bergerak melalui ruangan, menghasilkan distribusi aliran yang lebih merata dan lebih sedikit zona mati. Sebaliknya, unit reguler memiliki aliran udara yang berkurang karena hanya memiliki bukaan di satu sisi, sehingga udara lebih cenderung stagnan dan membatasi pertukaran udara.	Pola distribusi suhu menunjukkan kecenderungan yang sejalan dengan arah aliran udara. Unit <i>corner</i> memiliki suhu ruang yang relatif rendah karena panas dapat terbuang melalui bukaan ventilasi pada 2 sisi. Sebaliknya, unit reguler terlihat memiliki suhu yang lebih tinggi karena akumulasi panas.
Studi Kasus 2		
	Hasil simulasi menunjukkan kualitas penghawaan yang meningkat. Dengan bukaan pada dua sisi yang searah angin dominan, pertukaran udara bekerja lebih efektif, membuat aliran udara di dalam ruangan lebih merata dan mengurangi zona stagnan.	Dengan jarak antarbangunan, aliran udara mengalir lebih lancar sehingga panas tidak mengalir lebih tertahan di fasad. Bukaan pada dua sisi mengarah angin dominan membantu pembuangan panas lebih cepat. Dampaknya, temperatur ruang menjadi lebih rendah dan stabil, dengan zona panas yang jauh berkurang dibanding dua studi kasus sebelumnya.

Tabel 6. Data nilai *air flow* pada studi kasus

Studi Kasus	Titik (m/s)					
	1	2	3	4	5	6
1	0,25	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00
2	0,50	-	0,00	0,25	0,70	0,00

Tabel 7. Data nilai temperatur ruang pada studi kasus

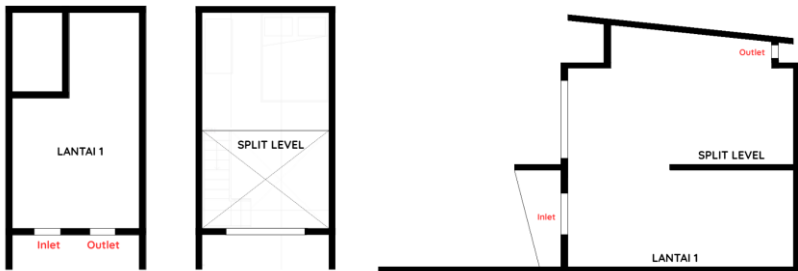
Studi Kasus	Titik (°C)					
	1	2	3	4	5	6
1	31,50	32,00	32,00	32,00	32,00	32,00
2	29,00	-	29,00	30,50	32,00	32,00

Berdasarkan Tabel 6, pengukuran kecepatan angin di enam titik menunjukkan perbedaan kinerja ventilasi alami antara kedua studi kasus. Pada Studi Kasus 1, kecepatan angin hanya terkonsentrasi di dekat bukaan, sementara titik-titik lain memiliki kecepatan yang sangat rendah. Hal ini dipengaruhi oleh orientasi bukaan yang tidak menghadap arah angin dominan, penerapan ventilasi satu sisi, dan dimensi bukaan yang hanya mencakup 6,75% dari luas lantai ruangan. Akibatnya, distribusi aliran udara di dalam ruangan kurang optimal. Di lain sisi, Studi Kasus 2 menunjukkan distribusi aliran udara yang lebih baik, dengan kecepatan angin mencapai 0,70 m/s. Hal ini didukung oleh orientasi bukaan yang lebih selaras dengan arah angin dominan, posisi saluran masuk dan keluar yang memungkinkan ventilasi silang, dan dimensi bukaan yang lebih besar, yaitu 10,8% dari luas lantai ruangan. Meskipun rasio saluran keluar terhadap saluran masuk masih relatif kecil (0,45), kinerja ventilasi alami pada Studi Kasus 2 masih lebih unggul daripada pada Studi Kasus 1.

Berdasarkan hasil simulasi CFD, Studi Kasus 2 menunjukkan kinerja ventilasi alami yang lebih unggul dibandingkan Studi Kasus 1. Hal ini didukung oleh jarak antar bangunan, yang memungkinkan penempatan bukaan di kedua sisi bangunan, menciptakan ventilasi silang. Hasilnya adalah distribusi aliran udara yang lebih merata dan kecepatan udara yang lebih tinggi di dalam ruangan. Oleh karena itu, Studi Kasus 2 dianggap memiliki kinerja ventilasi alami yang cukup baik, sehingga tidak memerlukan pengembangan skenario lebih lanjut. Sebaliknya, Studi Kasus 1 terletak di daerah dengan kepadatan penduduk tinggi, di mana hunian berdekatan dan lahan terbatas. Situasi ini berarti bahwa hunian memiliki batasan desain dimana bukaan hanya dapat ditempatkan di satu sisi bangunan, sehingga menghasilkan kinerja ventilasi alami yang kurang optimal. Oleh karena itu, pengembangan skenario desain dilakukan untuk Studi Kasus 1 untuk mengeksplorasi konfigurasi bukaan alternatif yang dapat meningkatkan kinerja ventilasi alami meskipun lahan terbatas dan lingkungan padat penduduk.

Pengembangan Desain Hunian Kompak Berdasarkan Studi Kasus 1

Skenario 1 dikembangkan berdasarkan kondisi yang ada pada Studi Kasus 1, yang menghadapi keterbatasan lahan dan kedekatan bangunan dengan bangunan sekitarnya. Hal ini berarti bukaan hanya dapat ditempatkan di satu sisi bangunan, sehingga ventilasi silang menjadi sulit. Oleh karena itu, desain dikembangkan tanpa mengubah bentuk dasar bangunan, tetapi dengan menambahkan bukaan di bagian atas ruang dekat atap, yaitu di area *split-level*. Bukaan tambahan ini berfungsi sebagai saluran keluar, memanfaatkan prinsip *stack ventilation*, yaitu pergerakan udara yang disebabkan oleh perbedaan suhu dan tekanan. Udara segar masuk melalui saluran masuk di lantai bawah, kemudian udara panas, dengan kepadatan yang lebih ringan, bergerak ke atas dan keluar melalui bukaan di dekat atap. Dengan saluran keluar di posisi yang lebih tinggi, diharapkan proses pertukaran udara akan lebih efektif, mengurangi akumulasi panas di bagian atas ruang, dan meningkatkan distribusi aliran udara di dalam bangunan tanpa memerlukan bukaan tambahan di sisi lain bangunan.

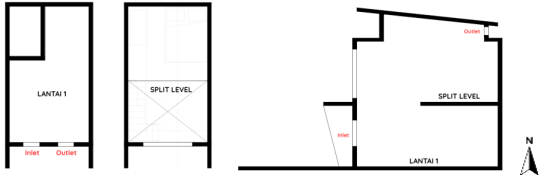
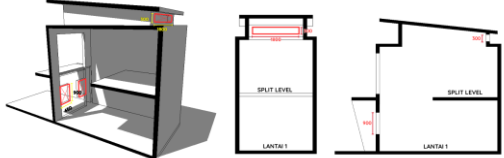


Gambar 9. Denah & potongan pengembangan desain hunian kompak

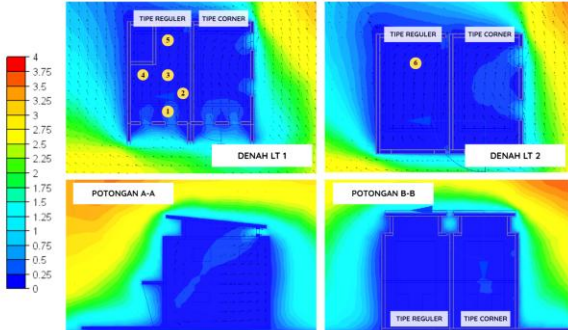
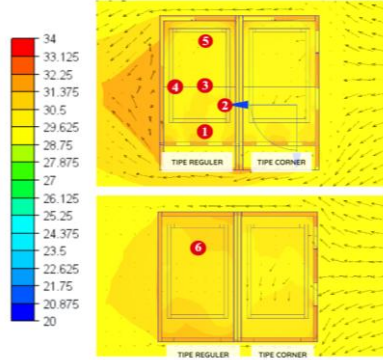
Dalam studi ini, dua skenario dikembangkan dengan dimensi lubang ventilasi yang berbeda, tetapi dengan kondisi yang sama, yaitu bukaan sebesar 50%. Pendekatan ini digunakan untuk menentukan pengaruh ukuran bukaan terhadap kinerja ventilasi alami pada hunian kompak. Dengan mempertahankan parameter lain tetap konstan, perbedaan hasil simulasi dapat menunjukkan sejauh mana dimensi lubang ventilasi memengaruhi distribusi aliran udara dan suhu ruangan. Skenario tersebut adalah sebagai berikut:

- **Skenario 1** menggunakan lubang ventilasi di dekat area atap dengan dimensi 2 x 120 cm sebagai alternatif untuk membantu pembuangan udara panas.
- **Skenario 2** menggunakan lubang ventilasi di area bertingkat dengan dimensi lebih besar daripada Skenario 1. Peningkatan dimensi bukaan dilakukan untuk menentukan apakah area lubang ventilasi yang lebih besar dapat meningkatkan efektivitas pertukaran udara dan meningkatkan kinerja ventilasi alami bangunan.

Tabel 8. Desain bukaan untuk skenario hunian kompak

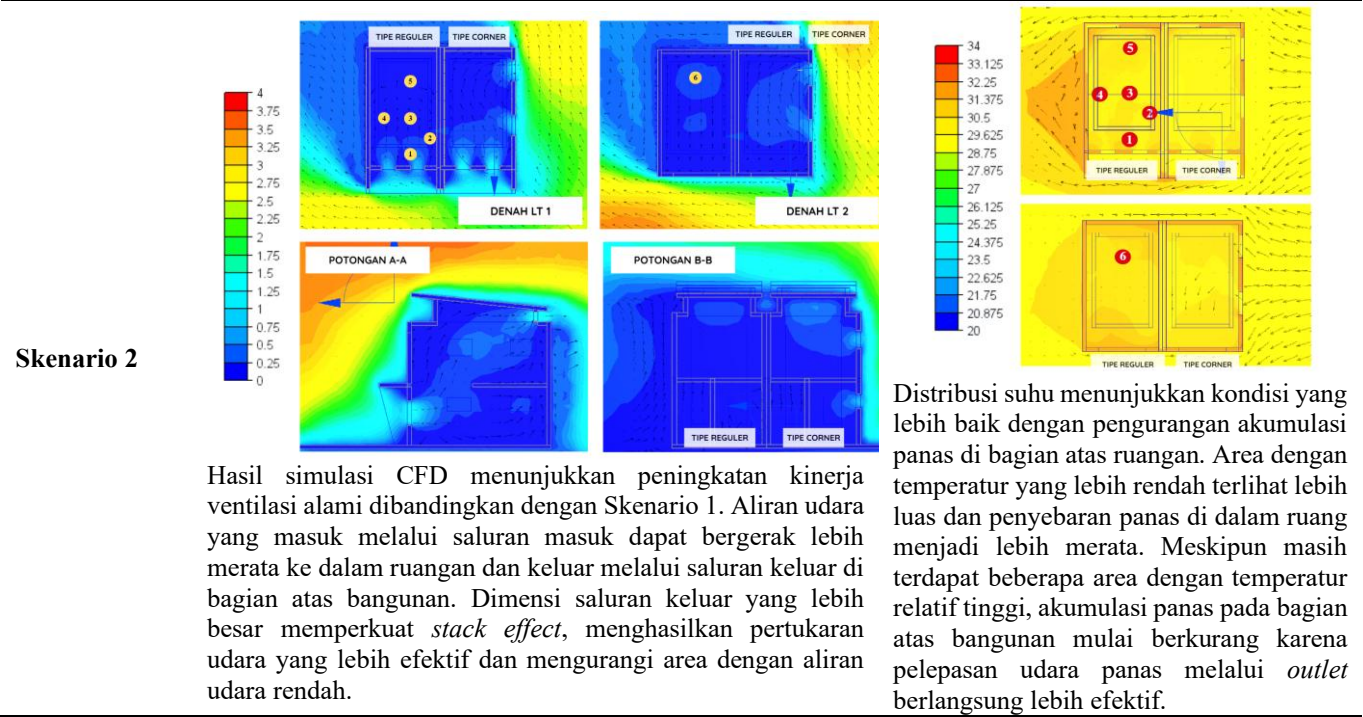
Parameter Desain Bukaan	Desain Hunian Kompak	
	Skenario 1	Skenario 2
Orientasi Bukaan	Bukaan memiliki orientasi ke arah Utara-selatan, tidak menghadap arah angin dominan	Bukaan memiliki orientasi ke arah Utara-selatan, tidak menghadap arah angin dominan
Lokasi Bukaan	 1 Inlet pada lantai bawah dan 2 outlet yaitu lantai bawah dan lantai atas (<i>stack ventilation</i>)	 1 Inlet pada lantai bawah dan 2 outlet yaitu lantai bawah dan lantai atas (<i>stack ventilation</i>)
Dimensi Bukaan	 8,6% terhadap luas lantai ruang 13,8% terhadap luas dinding	 11,25% terhadap luas lantai ruang 18% terhadap luas dinding
Rasio Bukaan	Outlet:inlet = 0,64:0,4 outlet lebih besar daripada inlet	Outlet inlet = 0,95:0,4 outlet lebih besar daripada inlet

Tabel 9. Hasil simulasi pada studi kasus

Desain Hunian Kompak	Hasil Simulasi CFD Autodesk	
	Airflow & Wind Vector	Temperatur
Skenario 1		

Hasil simulasi CFD menunjukkan pertukaran udara dengan prinsip *stack effect*, udara masuk melalui *inlet* pada lantai dasar dan bergerak menuju outlet pada lantai atas. Pergerakan udara terlihat lebih dominan di sekitar bukaan dan area void. Namun, distribusi udara belum sepenuhnya merata, beberapa area menunjukkan kecepatan angin yang relatif rendah.

Distribusi suhu menunjukkan temperatur yang masih cenderung hangat. Walaupun outlet membantu mengurangi akumulasi panas, pelepasan panas belum maksimal karena orientasi bukaan tidak mengarah angin dominan. Kondisi ini menyebabkan penghawaan pasif sudah mulai bekerja, namun efektivitasnya masih terbatas.

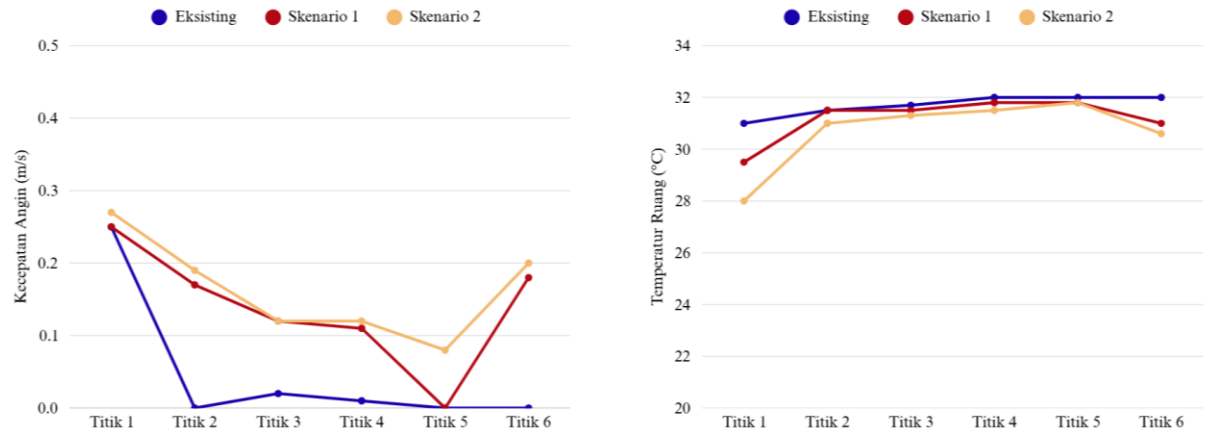


Tabel 10. Data nilai *air flow* pada skenario

Skenario	Titik (m/s)					
	1	2	3	4	5	6
1	0,25	0,17	0,12	0,11	0,00	0,18
2	0,27	0,19	0,12	0,12	0,08	0,20

Tabel 11. Data nilai temperatur ruang pada skenario

Skenario	Titik (°C)					
	1	2	3	4	5	6
1	29,50	31,50	31,50	31,80	31,80	31,00
2	28,00	31,00	31,50	31,50	31,80	30,60



Gambar 10. Grafik perbandingan eksisting dan skenario

Berdasarkan grafik perbandingan eksisting dan skenario (gambar 10) pengembangan desain dengan penambahan outlet pada bagian atas bangunan memberikan peningkatan kinerja penghawaan alami dibandingkan dengan kondisi eksisting. Pada kondisi eksisting, aliran udara dominan pada titik 1 dengan kecepatan 0,25 m/s, sedangkan pada titik lainnya mendekati 0 m/s. Kondisi ini menunjukkan bahwa distribusi udara tidak optimal dan tidak sesuai standar kenyamanan penghuni. Berbeda dengan kondisi eksisting, skenario 1 dan 2 menunjukkan adanya peningkatan kecepatan angin dan distribusi yang lebih merata pada titik-titik lainnya dan mencapai standar kenyamanan terkait kecepatan angin. Skenario 2 menunjukkan hasil yang lebih maksimal dibandingkan dengan

skenario 1, dimana hal ini berarti semakin besar dimensi *outlet* (rasio *outlet* lebih besar dibandingkan dengan *inlet*) maka akan meningkatkan kecepatan angin dan distribusi udara yang lebih baik.

Pada aspek temperatur, kondisi eksisting maupun skenario masih menunjukkan temperatur ruang yang belum memenuhi standar kenyamanan terkait suhu. Walaupun demikian, hasil simulasi menunjukkan adanya penurunan temperatur setelah dilakukan pengembangan desain bukaan. Hal ini terlihat dari skenario 2, dimana temperatur ruang yang lebih rendah dibandingkan kondisi eksisting, terutama pada titik-titik dekat bukaan. Temuan ini menunjukkan bahwa peningkatan dimensi outlet mampu meningkatkan proses pembuangan udara panas dengan mekanisme *stack ventilation*. Hal ini juga membuktikan bahwa semakin baik sirkulasi udara yang terbentuk, maka semakin besar juga kemampuan bangunan dalam mengurangi panas yang terakumulasi dalam ruang.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil identifikasi desain bukaan dan simulasi CFD, parameter desain bukaan terbukti berpengaruh terhadap kinerja penghawaan alami pada hunian kompak. Hasil temuan menunjukkan bahwa studi kasus 2 memiliki performa ventilasi yang lebih baik dibandingkan dengan studi kasus 1. Hal ini didukung oleh orientasi bukaan ke arah angin dominan dengan posisi inlet dan outlet yang membentuk ventilasi silang, serta dimensi bukaan yang cukup besar. Di lain sisi, studi kasus 1 memiliki hasil yang kurang optimal, yang disebabkan oleh keterbatasan desain akibat lahan yang minim. Kondisi ini menyebabkan desain bukaan hanya pada satu sisi dan tidak mengarah ke angin dominan. Berdasarkan hasil simulasi, aliran udara cenderung stagnan dan temperatur ruang yang cenderung tinggi. Dari pengembangan desain studi kasus 1, yaitu pemberian bukaan tambahan pada area dekat atap yang dibuktikan melalui 2 skenario yang diuji, menghasilkan kinerja pertukaran udara yang lebih baik melalui mekanisme *stack effect*.

Temuan studi ini menunjukkan bahwa isu keterbatasan lahan dan kepadatan bangunan dapat terjawab dengan hadirnya hunian kompak. Walaupun hunian ini dikenal memiliki luas lahan dan bangunan yang sangat minim, tidak menutup kemungkinan bahwa hunian masih mampu menerapkan penghawaan alami secara efektif. Meskipun ventilasi silang sulit untuk diterapkan pada hunian kompak yang didesain saling berdempetan dengan hunian lainnya tanpa adanya jarak, optimalisasi desain dengan penambahan bukaan dekat atap dapat menjadi solusi untuk meningkatkan kenyamanan tanpa bergantung sepenuhnya pada sistem pendingin aktif. Oleh karena itu, strategi desain ini dapat menjadi rekomendasi bagi perancang dan pengembang hunian kompak khususnya pada kawasan perkotaan padat, sebagai upaya menciptakan hunian yang nyaman, lebih hemat energi, dan berkelanjutan di masa mendatang.

REFERENSI

- Ahmed, T., Kumar, P., & Mottet, L. (2021). Natural ventilation in warm climates: The challenges of thermal comfort, heatwave resilience and indoor air quality. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 138, 110669. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110669>
- Aynsley, R. (2014). Natural ventilation in passive design. *Environment Design Guide*, 1–16. <http://www.jstor.org/stable/26151921>
- Badan Pusat Statistik. (2024, June 28). *Jumlah penduduk pertengahan tahun – tabel statistik*. <https://www.bps.go.id/id/statistics-table/2/MTk3NSMy/jumlah-penduduk-pertengahan-tahun--ribu-jiwa-.html>
- Badan Standardisasi Nasional. (2001). *SNI 03-6572-2001: Tata cara perancangan sistem ventilasi dan pengkondisian udara pada bangunan gedung*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Boutet, T. S. (1987). *Controlling air movement: A manual for architects and builders*. McGraw-Hill.
- Hwang, Y., & Górlé, C. (2022). Large-eddy simulations of wind-driven cross ventilation, Part 1: Validation and sensitivity study. *Frontiers in Built Environment*, 8, 911005. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.911005>
- Iqbal, M., Munir, A., & Sari, L. H. (2021). Study on natural ventilation performance in flats design at Banda Aceh. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1087, 012009. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1087/1/012009>
- Jiang, Z., Kobayashi, T., Yamanaka, T., & Sandberg, M. (2023). A literature review of cross ventilation in buildings. *Energy and Buildings*, 291, 113143. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113143>
- Kerdiati, N. L. K. R., & Sarmastuti, P. A. (2018, November). Mengurangi penggunaan AC pada rumah tropis melalui pengolahan elemen ruang. In *SENADA (Seminar Nasional Manajemen, Desain dan Aplikasi Bisnis Teknologi)* (Vol. 1, pp. 449–455). <https://eprosiding.idbbali.ac.id/index.php/senada/article/view/89>
- Khan, N., Su, Y., & Riffat, S. B. (2008). A review on wind driven ventilation techniques. *Energy and Buildings*, 40(8), 1586–1604. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.02.015>
- Kosutova, K., Van Hooff, T., Vanderwel, C., Blocken, B., & Hensen, J. (2019). Cross-ventilation in a generic isolated building equipped with louvers: Wind-tunnel experiments and CFD simulations. *Building and Environment*, 154, 263–280. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.03.019>
- Lechner, N. (2014). *Heating, cooling, lighting: Sustainable design methods for architects*. John Wiley & Sons.
- Lippsmeier, G. (1997). *Bangunan tropis* (Ed. 2). Jakarta: Erlangga.

- Maulidina, T. I., Purnomo, A. B., & Rahmah, N. (2020). Optimalisasi bukaan jendela kantor ASEAN Sekretariat dalam upaya meminimalisir penyebaran COVID-19. *Metrik Serial Teknologi dan Sains*, 1(1), 1–7. <https://publikasi.kocenin.com/index.php/teksi/issue/view/3>
- Mijorski, S., & Cammelli, S. (2016). Stack Effect in High-Rise Buildings: A Review. *International Journal of High-Rise Buildings*, 5(4), 327–338. <https://doi.org/10.21022/IJHRB.2016.5.4.327>
- Nugrahanti, F. I., Lubis, I. H., & Kusyala, D. (2018). The impact of building mass configuration towards wind-driven natural ventilation in apartment in Jakarta. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 213, 012042. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/213/1/012042>.
- Ohba, M., & Lun, I. (2010). Overview of natural cross-ventilation studies and the latest simulation design tools used in building ventilation-related research. *Advances in Building Energy Research*, 4(1), 127–166. <https://doi.org/10.3763/aber.2009.0405>
- Rahmawati, R., Akbar, A. K. F., & Agustin, F. K. (2016). Penghawaan alami terkait sistem ventilasi terhadap kenyamanan termal rumah susun industri dalam. *Reka Karsa: Jurnal Arsitektur*, 4(1). <https://doi.org/10.26760/rekakarsa.v4i1.1377>
- Sativa, S., & Adilline, P. S. (2021). Evaluasi kenyamanan termal ruang kuliah IKIP PGRI Wates Kulon Progo DIY. *INERSIA Informasi dan Ekspose Hasil Riset Teknik Sipil dan Arsitektur*, 17(2), 165–174. <https://doi.org/10.21831/inersia.v17i2.46751>
- Song, Y., & Lau, S. S. Y. (2019). Connecting theory and practice: An overview of the natural ventilation standards and design strategies for non-residential buildings in Singapore. *International Review for Spatial Planning and Sustainable Development*, 7(3), 81-96. https://doi.org/10.14246/irspsd.7.3_81
- Stavarakakis, G. M., Koukou, M. K., Vrachopoulos, M. G., & Markatos, N. C. (2008). Natural cross-ventilation in buildings: Building-scale experiments, numerical simulation and thermal comfort evaluation. *Energy and Buildings*, 40(9), 1666–1681. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.02.022>
- Sulistiyono, S. (2012). Pemanasan global (global warming) dan hubungannya dengan penggunaan bahan bakar fosil. *Swara Patra: Majalah Ilmiah PPSDM Migas*. <http://ejurnal.ppsdmmigas.esdm.go.id/sp/index.php/swarapatra/article/view/60>
- Thomas, P. C., Venkatesan, A., & Thomas, L. E. (2014). Effective natural ventilation in modern apartment buildings. In *Passive and Low Energy Architecture (PLEA) Annual International Conference*. CEPT University Press. <https://opus.lib.uts.edu.au/handle/10453/35155>
- UN-Habitat. (2013). *State of the world's cities 2012/2013: Prosperity of cities*. Routledge.
- Wang, L., & Wong, N. H. (2007). The impacts of ventilation strategies and facade on indoor thermal environment for naturally ventilated residential buildings in Singapore. *Building and Environment*, 42(12), 4006–4015. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.027>
- Zhou, J., Hua, Y., Xiao, Y., Ye, C., & Yang, W. (2021). Analysis of ventilation efficiency and effective ventilation flow rate for wind-driven single-sided ventilation buildings. *Aerosol and Air Quality Research*, 21, 200383. <https://doi.org/10.4209/aaqr.200383>