

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Ventilasi Alami pada Bangunan

Ventilasi alami adalah proses pertukaran udara antara ruang dalam dan lingkungan luar yang terjadi melalui bukaan yang disengaja ataupun tidak, tanpa menggunakan energi mekanis, melainkan didorong oleh mekanisme tekanan alami (CIBSE, 2005; Etheridge, 2011). Dalam situasi krisis energi global dan perubahan iklim, ventilasi alami dipandang kembali sebagai strategi desain pasif yang efektif untuk menurunkan konsumsi energi operasional bangunan, khususnya dalam mengurangi beban pendinginan dan ventilasi mekanis (Allocca, Taylor and Mead, 2003; Zoure and Genovese, 2023). Studi menunjukkan bahwa aplikasi ventilasi alami yang optimal berpotensi menghasilkan penghematan energi signifikan, dengan penurunan beban pendinginan mencapai sekitar 25% (Zhu et al., 2021). Selain efisiensi energi, ventilasi alami juga berperan penting dalam menjaga kualitas udara dalam ruangan dengan mengencerkan polutan internal seperti CO₂ dan VOCs, serta menggantinya dengan udara segar dari luar guna meningkatkan kenyamanan dan kesehatan penghuni (Allard and Santamouris, 1998; Awbi, 2003; Liddament, 1996).

2.1.1 Mengapa Ventilasi Alami

Meskipun proses perancangan dan penelitiannya cukup kompleks, ventilasi alami kini semakin diminati sebagai bagian dari strategi pembangunan kota

berkelanjutan, terutama untuk menciptakan bangunan dengan emisi karbon rendah bahkan nol (Cai et al., 2011). Ventilasi alami dapat diterima dan dimanfaatkan secara luas karena memiliki beberapa keunggulan berikut:

Biaya operasional dan pemeliharaan yang rendah: Ventilasi alami tidak membutuhkan energi listrik untuk beroperasi dan tidak memerlukan pemeliharaan perangkat mekanis. Karena itu, biayanya jauh lebih hemat dibandingkan sistem ventilasi mekanis.

Efisiensi tinggi: ketika gaya alami seperti angin dan perbedaan suhu bekerja optimal, serta bukaan bangunan dirancang dengan baik, sistem ventilasi alami mampu memberikan sirkulasi udara yang sangat kuat secara periodik. Hal ini membantu mendinginkan ruangan saat musim panas dan membersihkan udara dalam ruangan dari polutan, sesuatu yang sulit dicapai oleh sistem mekanis biasa.

Kenyamanan pengguna: pengguna memiliki kendali langsung terhadap lingkungan sekitarnya, misalnya dengan membuka atau menutup jendela sesuai kebutuhan. Kebebasan ini membuat penghuni merasa lebih nyaman dan puas dengan kondisi udara di dalam ruangan.

Dalam konteks gedung perkantoran 10 lantai tanpa void seperti pada penelitian ini, tantangan terbesar dalam menerapkan ventilasi alami adalah memastikan suplai udara segar dapat mencapai lantai tengah dan bawah secara efektif meskipun tidak tersedia ruang vertikal terbuka yang biasanya membantu pergerakan udara naik-turun. Absennya void membuat aliran vertikal menjadi lebih terbatas dan meningkatkan potensi terbentuknya zona stagnasi. Oleh karena itu, strategi seperti pengaturan rasio inlet-outlet, penempatan bukaan, serta perancangan

jalur aliran horizontal antar-ruang menjadi krusial untuk menciptakan perbedaan tekanan yang cukup sehingga udara dapat bergerak secara pasif. Temuan ini menunjukkan bahwa meskipun bentuk geometris bangunan memiliki keterbatasan signifikan, ventilasi alami tetap dapat dioptimalkan melalui rekayasa desain yang tepat. Dengan demikian, pendekatan ini mendukung operasional gedung hemat energi pada tipologi bangunan bertingkat yang tidak memiliki void internal.

2.1.2 Prinsip Dasar Ventilasi Alami

Ventilasi alami pada bangunan merupakan proses pertukaran udara antara ruang dalam dan lingkungan luar tanpa bantuan energi mekanis, dengan memanfaatkan kekuatan fisika alami yang mendorong pergerakan udara. Dua mekanisme utama yang menggerakkan ventilasi alami adalah tekanan angin (*wind-driven ventilation*) dan efek cerobong atau tekanan apung (*stack effect*) (Allard and Santamouris, 1998; Awbi, 2003; Etheridge, 2011).

1. Tekanan Angin

Mekanisme ini terbentuk akibat perbedaan tekanan statis yang dihasilkan oleh aliran udara di sekitar bangunan. Bagian bangunan yang menghadap langsung ke arah angin (*windward*) mengalami tekanan positif, sementara bagian yang berlawanan arah (*leeward*) dan sisi-sisi samping mengalami tekanan negatif (hisapan). Perbedaan tekanan ini menyebabkan udara masuk melalui bukaan di sisi *windward* dan keluar melalui bukaan di sisi *leeward*, menghasilkan sirkulasi udara alami yang efektif (CIBSE, 2005). Efisiensi ventilasi yang dihasilkan dipengaruhi oleh faktor-faktor berikut:

- a. Kecepatan dan arah angin lokal yang dipengaruhi oleh kondisi meteorologi makro dan mikro
- b. Karakteristik lingkungan sekitar seperti topografi, keberadaan bangunan lain, dan vegetasi yang dapat menghasilkan efek sheltering atau channeling
- c. Geometri dan bentuk bangunan, yang mempengaruhi distribusi tekanan pada fasad
- d. Dimensi dan karakteristik aerodinamis bukaan, seperti ukuran, lokasi, dan koefisien tekanan (C_p) yang menentukan aliran udara efektif

Selaras dengan hal itu, pada gedung 10 lantai tanpa void, tekanan angin menjadi penggerak utama ventilasi karena tidak tersedia jalur vertikal internal yang dapat membantu mengalirkan udara secara alami. Akibatnya, rancangan bukaan pada fasad serta proporsi antara inlet dan outlet memegang peranan penting dalam membentuk gradien tekanan horizontal yang cukup untuk mendorong udara melintas hingga ke lantai-lantai tengah, zona yang umumnya paling rentan mengalami stagnasi pada bangunan bertingkat.

2. Efek Cerobong

Fenomena lain yang berperan penting dalam ventilasi alami adalah efek cerobong, yang terjadi karena perbedaan densitas udara akibat selisih temperatur antara udara dalam dan luar bangunan. Udara hangat yang memiliki densitas lebih rendah akan naik dan keluar melalui bukaan atas, sedangkan udara dingin yang lebih berat masuk melalui bukaan bawah, menciptakan sirkulasi vertikal yang

menopang ventilasi (Liddament, 1996; Linden, 1999). Faktor penentu efektivitas efek cerobong meliputi:

- a. Selisih suhu (ΔT) antara udara dalam dan luar ruangan yang menjadi pendorong utama tekanan apung.
- b. Ketinggian vertikal (H) antara bukaan masuk dan keluar yang menentukan kekuatan tekanan dan “lengan tuas” sirkulasi (Linden, 1999).
- c. Luas bukaan efektif yang mempengaruhi volume udara yang dapat bersirkulasi.

Pada bangunan bertingkat yang tidak memiliki *void*, efek cerobong alami tidak dapat bekerja secara maksimal karena ketiadaan ruang vertikal kontinu yang biasanya menjadi jalur naiknya aliran udara panas. Meski demikian, prinsip *stack effect* tetap bisa dihadirkan melalui penggunaan *solar chimney* (SC) sebagai elemen vertikal buatan yang mengambil alih fungsi *void* tersebut. Dengan menempatkan SC pada sisi bangunan dan merancanginya menjulang dari lantai 1 hingga lantai 10, bangunan memperoleh “koridor vertikal” baru yang mampu menghasilkan gaya apung (*buoyancy-driven flow*).

Kinerja SC dalam memperkuat efek cerobong bergantung pada peningkatan temperatur kolom udara di dalamnya. Bagian atas SC dapat dibuat dari material yang mudah menyerap panas, seperti pelat logam, sehingga paparan radiasi matahari menaikkan temperatur udara di bagian tersebut. Perbedaan suhu antara dasar dan puncak cerobong meningkatkan ΔT , yang kemudian menciptakan tekanan apung untuk mendorong udara bergerak ke atas secara terus-menerus.

Proses ini menghasilkan efek hisap pada lantai-lantai bawah, menarik udara segar dari luar dan menyalurkannya naik hingga ke outlet di lantai teratas.

Dengan cara ini, meskipun gedung tidak memiliki void internal, *solar chimney* mampu menciptakan aliran udara vertikal lintas lantai yang stabil. Stack effect tidak hanya tetap dapat dimanfaatkan, tetapi juga dapat diperkuat melalui rekayasa pasif berbasis radiasi matahari, sehingga bangunan mampu menggabungkan ventilasi horizontal akibat tekanan angin dengan ventilasi vertikal berbasis efek cerobong secara efektif.

3. Integrasi Mekanisme Ventilasi

Dalam praktiknya, mekanisme tekanan angin dan efek cerobong sering bekerja secara bersamaan dan saling memperkuat. Dominasi salah satunya tergantung pada kondisi iklim, orientasi bangunan, dan desain arsitektural (Etheridge, 2011). Misalnya, pada bangunan bertingkat tinggi di daerah tropis, efek cerobong dapat menjadi sumber utama sirkulasi udara terutama saat perbedaan suhu signifikan, sementara pada bangunan rendah atau iklim berangin menjadikan tekanan angin faktor lebih dominan.

Pada bangunan bertingkat yang tidak memiliki void seperti pada kasus penelitian ini, efek cerobong alami memang tidak bisa berkembang sepenuhnya karena tidak tersedia jalur vertikal yang kontinu. Namun, keberadaan *solar chimney* (SC) mengubah kondisi tersebut. SC bekerja sebagai “void rekayasa” yang menyediakan kolom vertikal buatan, sehingga perbedaan suhu dapat dimanfaatkan untuk menggerakkan udara secara vertikal. Dengan cara ini, aliran horizontal yang

digerakkan angin pada setiap lantai dapat terhubung dengan aliran vertikal di dalam SC, sehingga kedua mekanisme tidak lagi berjalan terpisah, tetapi bekerja sebagai satu kesatuan sistem ventilasi pasif.

Tekanan angin pada fasad mendorong udara masuk melalui inlet, sementara bagian atas *solar chimney* yang lebih panas menghasilkan gaya hisap (*buoyancy-driven suction*) yang menarik udara menuju outlet di lantai atas. Kombinasi kedua mekanisme tersebut memungkinkan terjadinya aliran udara lintas lantai yang stabil, meskipun bangunan tidak memiliki void internal. Dengan demikian, desain bukaan dan pengaturan rasio *inlet-outlet* tetap menjadi elemen kunci, tetapi kini berfungsi sebagai bagian dari sistem ventilasi hibrida yang memanfaatkan tekanan angin sekaligus efek cerobong.

4. Faktor Pendukung Kinerja Ventilasi Alami

Kinerja sistem ventilasi alami secara keseluruhan sangat bergantung pada aspek desain bangunan dan lingkungan, di antaranya:

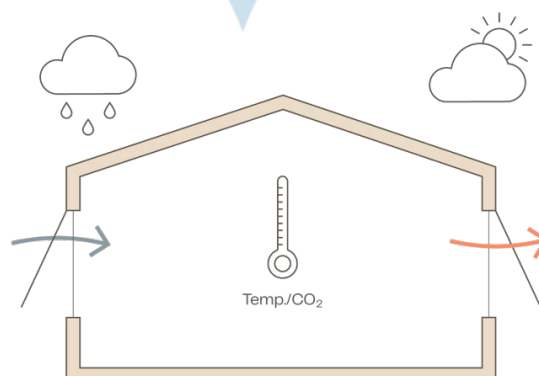
- a. Desain Bukaan: Ukuran, jenis (*casement*, *awning*, *sliding*), lokasi bukaan pada fasad, baik horizontal maupun vertikal mempengaruhi volume dan pola airflow (Heiselberg et al., 2001; Pranata, 2018; Latifah, 2015). Penelitian ini memperkuat kebutuhan validasi dengan metode standar internasional guna meningkatkan generalisasi temuan di konteks Indonesia (Zhang et al., 2025).
- b. Orientasi Bangunan: Menyelaraskan bangunan terhadap angin dominan dan paparan matahari untuk memaksimalkan ventilasi alami dan mengurangi beban panas (Givoni, 1998).

- c. Lingkungan Sekitar: Aktivitas dan letak bangunan tetangga serta vegetasi berdampak pada sirkulasi udara melalui efek bayangan angin (wind shadow) atau akselerasi aliran (channeling) (Blocken et al., 2011; Gupta & Verma, 2025).
- d. Perbedaan Suhu dan Ketinggian Buka: Parameter penting dalam memperkuat efek cerobong, dengan ΔT dan H sebagai kontrol utama dalam aliran vertikal (Martinez et al., 2023).

2.1.3 Strategi Efektif untuk Ventilasi Alami

Ventilasi alami adalah elemen kunci dalam desain bangunan pasif yang berfokus pada pengurangan konsumsi energi sekaligus peningkatan kenyamanan dalam ruangan. Berdasarkan prinsip fisika ventilasi alami seperti tekanan angin dan efek cerobong, beberapa strategi umum telah diterapkan secara luas dalam arsitektur modern untuk memaksimalkan aliran udara alami dan ventilasi yang efektif (Allard, 1998; Awbi, 2003; Santamouris & Allard, 2006).

1. Ventilasi Silang (*Cross Ventilation*)

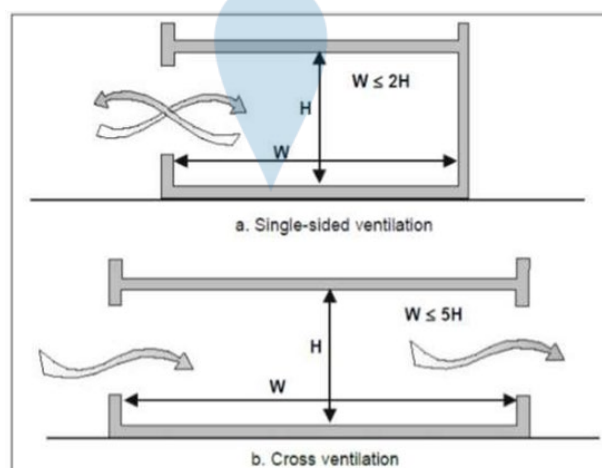


Gambar 2. 1 Ilustrasi Ventilasi Silang

Ventilasi silang dianggap lebih efektif jika dibandingkan dengan ventilasi dari satu sisi, karena aliran udara dapat bergerak langsung melintasi ruangan dari satu sisi ke sisi lainnya, sehingga sirkulasi udara menjadi lebih baik dan merata. Penggunaan ventilasi silang dapat dimaksimalkan ketika lebar ruangan tidak melebihi lima kali tinggi ruangan.

Pada Gambar 2.1, terlihat perbandingan antara lebar dan tinggi bukaan yang optimal untuk berbagai jenis ventilasi. Meskipun ventilasi silang dianggap lebih efisien, penting untuk merencanakan dengan baik posisi bukaan dalam ruangan. Tinggi *Inlet* di dalam ruangan harus disesuaikan dengan fungsi ruangan tersebut, biasanya penempatan *Inlet* yang lebih rendah efektif untuk pendinginan, sementara *Outlet* yang lebih tinggi lebih disarankan untuk ventilasi tumpukan.

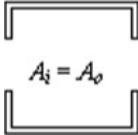
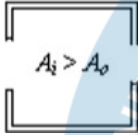
WWR (Rasio Jendela terhadap Dinding) atau area bukaan jendela minimal sebesar 5% dari luas total lantai untuk ventilasi satu sisi, dan 2% dari luas total lantai untuk ventilasi silang diperlukan untuk menjaga aliran udara minimal di dalam bangunan (Asfour, 2015).



Gambar 2. 2 Efektivitas Penghawaan Alami Satu Sisi dan Silang

Sumber: (Asfour, 2015)

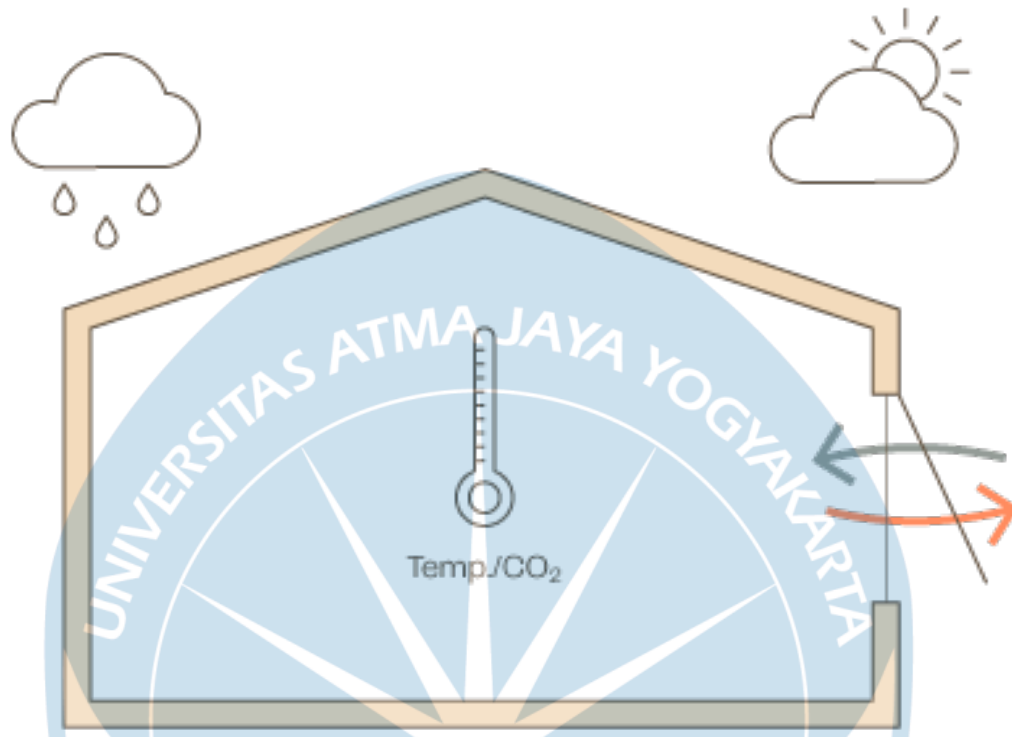
Tabel 2. 1 Beberapa Kemungkinan *Inlet* dan *Outlet* area Bukaannya

Ilustrasi (A_i = <i>Inlet</i> , A_o = <i>Outlet</i>)	Observasi	Target Desain
 $A_i = A_o$	Pergantian udara secara maksimum	Building cooling
 $A_i < A_o$	Kecepatan udara dalam ruangan secara maksimum	Users cooling
 $A_i > A_o$	Kecepatan udara dalam ruangan berkurang dan dipercepat saat keluar ruang	Outdoor

Sumber: Moore (2011)

Berdasarkan pendapat Moore (2011) yang tercantum dalam Tabel 2.1, ukuran bukaan masuk dan keluar dapat mempengaruhi kecepatan serta sirkulasi udara dalam sebuah bangunan. Jika ukuran bukaan masuk sama dengan ukuran bukaan keluar, pertukaran udara akan berlangsung secara optimal dan dapat digunakan untuk mendinginkan bangunan. Ketika ukuran bukaan masuk lebih kecil daripada ukuran bukaan keluar, udara di dalam bangunan akan bergerak lebih cepat, sehingga kondisi ini dapat dimanfaatkan untuk mendinginkan penghuni. Di sisi lain, jika bukaan masuk lebih besar dibandingkan dengan bukaan keluar, kecepatan aliran udara di dalam ruangan mungkin menurun. Namun, saat udara keluar melalui bukaan yang lebih kecil, kecepatannya akan meningkat.

2. Ventilasi Satu Sisi (*Single-Sided Ventilation*)



Gambar 2. 3 Ilustrasi Ventilasi Satu Sisi

Ventilasi satu sisi merupakan salah satu bentuk ventilasi alami yang paling umum digunakan di bangunan perkotaan dan bangunan dengan batasan fasad, di mana bukaan untuk udara hanya tersedia di satu sisi dinding luar. Kondisi ini menjadikannya solusi penting dalam perancangan bangunan bertingkat tinggi, apartemen, atau ruang kantor yang tidak memungkinkan ventilasi silang (*cross ventilation*). Mekanisme ventilasi satu sisi bergantung pada kombinasi tekanan angin (*wind pressure*), turbulensi lokal di sekitar fasad, dan efek buoyancy (*stack effect*) akibat perbedaan suhu antara udara dalam dan luar ruangan (Zhong et al., 2022; Liu et al., 2024).

Eksperimen terbaru oleh Liu et al., (2024) menganalisis kinerja ventilasi satu sisi pada ruang kantor berpendingin ruangan menggunakan gabungan pengujian

lapangan dan simulasi CFD. Hasil riset menunjukkan bahwa ventilasi satu sisi menghasilkan pertukaran panas dan massa yang konstan antara udara dalam dan luar ruangan, namun juga menimbulkan potensi kehilangan energi pendinginan yang cukup besar. Penelitian ini juga menyoroti efektivitas konfigurasi jendela, lokasi lubang suplai udara, serta durasi pembukaan jendela dalam menjaga kualitas udara dan efisiensi energi.

Selain itu, Najafi Ziarani, Cook and O'Sullivan, (2023) menyajikan pendekatan inovatif dengan menambahkan airflow guiding components di dekat fasad untuk meningkatkan laju ventilasi satu sisi. Hasilnya menunjukkan peningkatan efisiensi ventilasi hingga 46% melalui optimasi bentuk dan pemasangan pelat pengarah aliran udara.

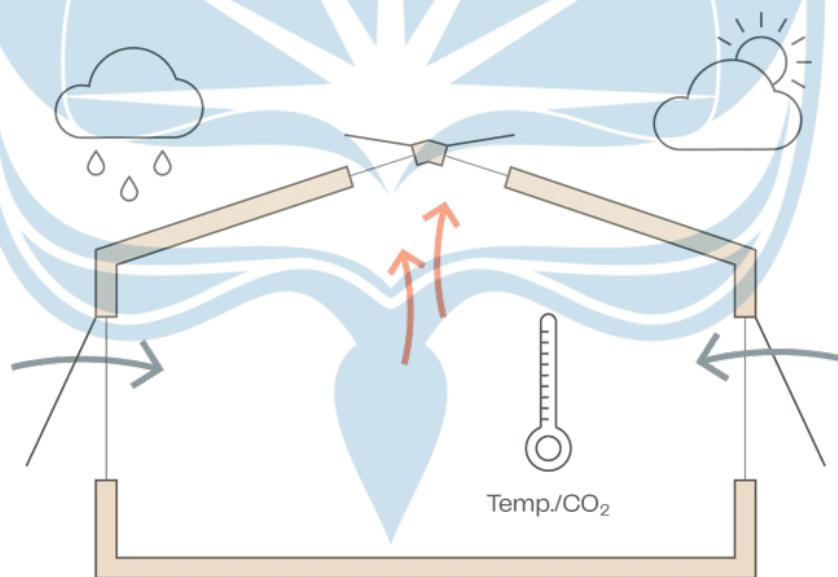
Implementasi strategi ventilasi satu sisi dalam praktik arsitektur tropis menghadapi sejumlah tantangan. Antara lain, sulitnya mendapatkan tekanan angin yang stabil pada satu sisi bangunan dan risiko stratifikasi udara pada ruang dalam yang dalam. Dalam kondisi panas dan lembap seperti di Indonesia, penerapan sistem ini perlu dikombinasikan dengan elemen penunjang seperti panel pengarah, wing walls, atau ventilator tambahan agar sirkulasi udara lebih optimal (Prihatanti et al., 2021).

Secara umum, literatur mutakhir menunjukkan bahwa ventilasi satu sisi masih relevan dan efektif bila direncanakan secara tepat, terutama dengan dukungan analisis simulasi komputasional (CFD) berbasis perangkat lunak seperti Autodesk CFD atau ANSYS Fluent. Dengan pemodelan tersebut, variasi konfigurasi bukaan, arah angin, dan kondisi termal dapat dianalisis untuk menentukan rasio bukaan,

waktu buka-tutup, dan desain optimal yang menghasilkan kenyamanan termal tanpa ketergantungan pada sistem mekanis.

Ventilasi satu sisi adalah strategi yang efisien untuk bangunan dengan batasan desain fasad. Meskipun secara umum memiliki laju pertukaran udara lebih rendah dibanding ventilasi silang, pendekatan modern berbasis CFD dan desain berbantuan data eksperimental memungkinkan peningkatan performanya signifikan melalui optimalisasi bentuk bukaan, penambahan komponen pengarah udara, serta penerapan desain yang sensitif terhadap angin dan iklim lokal.

3. Ventilasi Vertikal (*Stack Ventilation*)



Gambar 2. 4 Ilustrasi *Stack Ventilation*

Ventilasi vertikal atau yang lebih dikenal dengan *Stack Ventilation* merupakan strategi utama dalam sistem ventilasi alami yang mengandalkan perbedaan densitas udara akibat perbedaan temperatur antara udara di dalam dan di

luar bangunan. Prinsip kerjanya adalah, udara hangat yang memiliki densitas lebih rendah cenderung bergerak naik menuju bukaan di bagian atas, sementara udara yang lebih dingin masuk lewat bukaan bawah untuk menggantikan udara yang keluar. Proses ini menciptakan sirkulasi vertikal kontinu yang dikenal sebagai efek cerobong (*chimney effect*), yang dapat meningkatkan kualitas udara dalam ruang dan menurunkan beban pendinginan mekanis (Linden, 1999; Holford and Hunt, 2003).

Pada prinsipnya, *Stack Ventilation* bekerja berdasarkan hukum *buoyancy* atau gaya apung termal, di mana tekanan diferensial yang dihasilkan antara *Inlet* (bukaan bawah) dan *Outlet* (bukaan atas) sebanding dengan perbedaan ketinggian (H) dan perbedaan suhu (ΔT). Semakin besar ΔT dan H , semakin kuat gaya dorong udara yang tercipta untuk memperlancar sirkulasi (Shi et al., 2023; Holford and Hunt, 2003). Dalam bangunan bertingkat tinggi, faktor-faktor ini menjadi penting karena efek cerobong cenderung meningkat secara eksponensial terhadap tinggi ruang vertikal yang tersedia.

Efektivitas sistem *Stack Ventilation* dipengaruhi oleh berbagai faktor desain meliputi:

- a. Ketinggian ruang vertikal (H): Semakin tinggi ruang, semakin besar daya apung yang dihasilkan.
- b. Perbandingan bukaan *Inlet-Outlet*: Bukaan atas yang terlalu besar dapat mengganggu keseimbangan tekanan dan menyebabkan sirkulasi tidak stabil (Holford & Hunt, 2003).

- c. Orientasi bangunan terhadap arah angin: Arah angin dominan dapat memperkuat atau melemahkan efek stack.
- d. Distribusi beban panas internal: Ketidakseimbangan sumber panas antar lantai menyebabkan aliran udara tidak merata (Shi et al., 2023)

Tantangan utama dalam penerapan sistem *Stack Ventilation* adalah menghindari akumulasi udara panas (overheating) pada lantai atas dan kekurangan ventilasi pada lantai bawah. Lu et al., (2021) menemukan bahwa kombinasi pendekatan model zonal dan model analitik dalam sistem ventilasi cerobong menghasilkan keseimbangan aliran udara yang lebih baik untuk bangunan besar multi-ruang.

Dalam konteks iklim tropis lembap seperti Indonesia, desain *Stack Ventilation* menuntut penyesuaian yang lebih hati-hati untuk menghindari akumulasi panas berlebih. Menurut Iskandar et al., (2024) penerapan ventilasi alami yang memadukan ventilasi cerobong dan ventilasi silang dapat menurunkan suhu dalam ruangan hingga 2-3°C dan menurunkan kelembapan relatif hingga 15%, sehingga meningkatkan kenyamanan termal penghuni secara signifikan. Implementasi di bangunan tropis tinggi biasanya memerlukan penggunaan elemen tambahan seperti *Solar Chimney*, clerestory windows, atau vented roof monitor untuk memperkuat efek apung.

Ventilasi vertikal atau atrium (*Stack Ventilation*) terbukti menjadi metode alami yang efisien dalam meningkatkan sirkulasi udara vertikal pada bangunan bertingkat, sekaligus menurunkan ketergantungan pada sistem mekanis pendinginan ruangan. Integrasi hasil simulasi CFD dengan data lapangan

memungkinkan perancangan sistem *Stack Ventilation* yang adaptif terhadap kondisi iklim tropis lembap. Desain atrium yang proporsional, bukaan yang terdistribusi seimbang, serta kontrol termal antar lantai menjadi kunci keberhasilan penerapan konsep ini.

Pada bangunan perkantoran 10 lantai tanpa void seperti pada penelitian ini, dua strategi ventilasi alami yang paling relevan adalah ventilasi silang (*cross ventilation*) dan ventilasi vertikal (*Stack Ventilation*). Keduanya menjadi dasar penerapan windcatcher dan solar chimney sebagai sistem ventilasi utama.

Windcatcher bekerja dengan memanfaatkan prinsip *cross ventilation*, yaitu menangkap angin dari ketinggian yang memiliki aliran lebih stabil, kemudian meningkatkan tekanan udara pada bukaan masuk (inlet). Melalui mekanisme *wind-driven* ini, udara dapat terdorong bergerak secara horizontal melintasi ruangan, bahkan pada bangunan yang fasadnya terbatas atau tidak menghadap langsung arah angin utama.

Sementara itu, solar chimney menerapkan prinsip *Stack Ventilation* dengan menghadirkan kolom vertikal buatan yang berperan menggantikan void. Pemanasan di bagian atas cerobong membuat suhu udara dalam saluran meningkat, menciptakan perbedaan temperatur (ΔT) yang cukup untuk menghasilkan gaya apung (buoyancy) yang menarik udara ke atas menuju outlet di lantai tertinggi.

Ketika kedua sistem ini digabungkan, terbentuklah jalur ventilasi pasif yang saling melengkapi: udara segar masuk melalui windcatcher, mengalir melintasi ruang seperti pola *cross ventilation*, lalu tersedot ke dalam *solar chimney* dan bergerak naik secara vertikal oleh efek cerobong. Integrasi ini memungkinkan

aliran udara yang kontinu dari lantai atas ke bawah hingga kembali lagi ke atas, meskipun bangunan tidak memiliki void internal.

2.1.4 Ventilasi Alami pada Bangunan Tinggi

Ventilasi alami pada bangunan tinggi memainkan peran yang semakin penting dalam konteks arsitektur berkelanjutan dan konservasi energi di lingkungan perkotaan padat. Bangunan tinggi menghadapi tantangan unik berupa tekanan angin ekstrem, stratifikasi termal, serta keterbatasan bukaan akibat desain fasad dan ketinggian struktur. Berbeda dengan bangunan rendah, di mana ventilasi silang (*cross ventilation*) dan ventilasi satu sisi (*single-sided ventilation*) dapat dengan mudah diterapkan, bangunan tinggi memerlukan pendekatan yang lebih kompleks untuk memastikan kenyamanan termal dan sirkulasi udara yang optimal di berbagai level lantai (Etheridge, 2011; Teng et al., 2025).

Ventilasi alami di bangunan tinggi bekerja melalui dua mekanisme utama: tekanan angin (*wind pressure*) dan efek cerobong (*stack effect*). Pada ketinggian tertentu, tekanan dinamis yang dihasilkan angin dapat membantu memasukkan udara melalui sisi *windward* dan mengeluarkannya melalui sisi *leeward*. Namun, distribusi tekanan sering kali tidak seragam akibat efek turbulensi dan gangguan aerodinamika dari gedung-gedung lain di sekitarnya (Jesson et al., 2015). Selain itu, efek cerobong menjadi dominan terutama pada kondisi perbedaan suhu antara bawah dan atas bangunan, di mana perbedaan tekanan vertikal (H) menyebabkan udara hangat naik ke atas dan memicu sirkulasi udara alami (Holford and Hunt, 2003; Shi et al., 2023).

Strategi desain ventilasi alami pada bangunan tinggi sering kali melibatkan integrasi beberapa elemen arsitektural, seperti:

1. *Void* atau atrium vertikal, yang berfungsi sebagai saluran utama untuk pergerakan udara antar lantai.
2. *Wind Tower* atau *Windcatcher*, yang ditempatkan di puncak bangunan untuk menangkap dan mengarahkan aliran udara ke dalam.
3. *Ventilated double-skin façade* (DSF), yang mengoptimalkan sirkulasi udara melalui celah antara dua lapisan fasad, berfungsi sebagai buffer termal dan ventilasi alami pasif.

Penelitian Teng et al., (2025) menunjukkan bahwa persebaran tekanan angin di dinding luar bangunan tinggi tidak bersifat linier terhadap ketinggian. Oleh karena itu, konfigurasi bukaan fleksibel dengan sistem katup udara adaptif di tiap lantai mampu menstabilkan distribusi ventilasi dan mengurangi risiko over-pressurization di level atas.

Sementara itu, Lin et al., (2025) menegaskan bahwa konfigurasi unit vertikal dan horizontal berpengaruh besar terhadap ventilasi alami pada bangunan bertingkat tinggi. Dalam studi yang dilakukan di Hong Kong, variasi tipe unit hunian menunjukkan bahwa rancangan dengan poros ventilasi sentral (*centralized ventilation shaft*) menghasilkan performa ventilasi alami lebih baik dibanding sistem yang hanya mengandalkan bukaan lateral.

Ventilasi alami pada bangunan tinggi merupakan strategi penting dalam desain pasif modern yang mendukung efisiensi energi, kenyamanan termal, dan kualitas udara dalam ruang. Dengan dukungan simulasi CFD yang andal, strategi

seperti *double-skin façade*, ventilasi vertikal, dan sistem hybrid dapat dioptimalkan untuk kondisi tropis lembap. Integrasi dengan data iklim lokal juga menjadi kunci adaptabilitas sistem ventilasi alami di kawasan perkotaan Indonesia.

2.1.5 Ventilasi Alami pada Bangunan Tinggi Tanpa Void

Ventilasi alami pada bangunan tinggi tanpa keberadaan void atau ruang atrium vertikal menghadapi tantangan signifikan dalam memenuhi kebutuhan sirkulasi udara yang efektif dan kenyamanan termal. Void sebagai ruang terbuka vertikal di dalam bangunan kerap berfungsi sebagai "cerobong" alami yang membantu pergerakan udara hangat naik dan udara segar masuk, sehingga meningkatkan efisiensi ventilasi alami vertikal (Kubota et al., 2023). Namun, tak semua bangunan tinggi menyediakan atau memungkinkan adanya void ini karena keterbatasan desain, ruang, atau fungsi bangunan.

Dalam kondisi tanpa void, sirkulasi vertikal alami sangat terbatas, sehingga ventilasi alami terutama bergantung pada strategi alternatif seperti ventilasi silang yang intensif, penggunaan bukaan strategis, dan teknologi pendukung seperti *Windcatcher* atau ventilasi mekanis hybrid untuk mengatasi stagnasi udara di lantai-lantai bawah (López Plazas and Sáenz de Tejada, 2024). Kumar et al., (2021) menawarkan solusi inovatif berupa desain "*closed-vertical void*" yang tertutup untuk meningkatkan performa ventilasi bahkan di sisi bangunan yang terlindung angin (*leeward side*), menunjukkan potensi desain void terintegrasi yang variatif untuk bangunan bertingkat tanpa void terbuka.

Pada bangunan tanpa void, ketiadaan ruang terbuka vertikal membuat tekanan apung (*stack effect*) menjadi sangat terbatas karena tidak adanya jalur bebas vertikal yang signifikan untuk pergerakan udara naik (Kubota et al., 2024). Hal ini meningkatkan risiko stagnasi udara terutama di lantai bawah dan area leeward, yang dapat mengakibatkan akumulasi panas dan penurunan kualitas udara dalam ruangan.

Selain itu, hambatan aerodinamika dari bangunan bertingkat tinggi di sekitarnya dan bentuk fasad yang kompak kerap menurunkan kecepatan angin yang mencapai bukaan udara sehingga mengurangi kemampuan ventilasi yang digerakkan oleh tekanan angin (Plazas et al., 2024). Kondisi ini mengharuskan desain bukaan yang optimal dan integrasi sistem pendukung yang cermat agar ventilasi alami tetap terjaga.

Beberapa strategi dan pendekatan solusi desain bukaan yang optimal:

1. Pengaturan ukuran, posisi, dan tipe bukaan udara menjadi sangat vital untuk memaksimalkan pergantian udara melalui ventilasi silang maupun satu sisi. Bukaan harus didesain sedemikian rupa untuk meningkatkan tekanan angin lokal dan memaksimalkan penyebaran udara ke seluruh zona dalam ruangan (Plazas et al., 2024).
2. Penggunaan Teknologi *Hybrid Ventilation*: Untuk memastikan kenyamanan termal di seluruh lantai, penggunaan sistem hybrid yang mengkombinasikan ventilasi alami dengan mekanis dapat diaplikasikan, khususnya saat kondisi iklim atau tekanan angin tidak memungkinkan ventilasi alami berjalan optimal (López Plazas and Sáenz de Tejada, 2024).

Studi lapangan dan simulasi CFD oleh López Plazas and Sáenz de Tejada, (2024) mengonfirmasi pentingnya pendekatan holistik dengan pengukuran mikroklimat lokal untuk meningkatkan validitas analisis ventilasi alami pada gedung bertingkat tanpa void. Sementara itu, penelitian Kumar *et al.*, (2021) menunjukkan melalui metode eksperimental dan simulasi bahwa desain *closed-vertical void* dapat meningkatkan ventilasi sisi leeward hingga sebanding atau lebih baik dari void terbuka konvensional, yang memberikan alternatif desain bagi bangunan bertingkat yang tidak memungkinkan void terbuka efektif.

Ventilasi alami pada bangunan tinggi tanpa void memerlukan pendekatan desain dan teknologi alternatif yang cermat guna mengatasi keterbatasan jalur udara vertikal alami. Desain bukaan yang optimal, integrasi sistem *Windcatcher* dengan ducting vertikal, serta dukungan ventilasi mekanis hybrid berpotensi sebagai solusi yang efektif untuk menjaga kualitas udara dan kenyamanan termal di gedung bertingkat modern di iklim tropis lembap.

Studi kasus penelitian ini, yakni bangunan perkantoran 10 lantai tanpa void, tidak adanya ruang vertikal kontinu membuat ventilasi silang dan tekanan angin saja tidak cukup untuk memastikan udara dapat bersirkulasi secara merata antar lantai. Karena itu, sistem ventilasi alami perlu direkayasa melalui kombinasi *windcatcher* dan *solar chimney* untuk menggantikan fungsi void sebagai jalur pergerakan tekanan horizontal maupun vertikal. *Windcatcher* membantu meningkatkan capaian ventilasi silang dengan meningkatkan tekanan masuk di titik inlet, sehingga aliran udara dapat didorong melintasi setiap lantai meskipun

bangunan berada di area turbulen atau pada sisi *leeward* yang menerima tekanan angin lebih rendah.

Solar chimney, di sisi lain, memungkinkan prinsip *stack effect* tetap berjalan meskipun bangunan tidak memiliki void. Dengan menghadirkan kolom vertikal buatan yang bagian atasnya dilapisi material penyerap panas, cerobong ini meningkatkan perbedaan temperatur (ΔT), yang kemudian memicu gaya apung (*buoyancy*) untuk menarik udara ke atas menuju *outlet*. Mekanisme ini membuat aliran horizontal dari *windcatcher* terhubung dengan aliran vertikal di dalam *chimney* secara efektif.

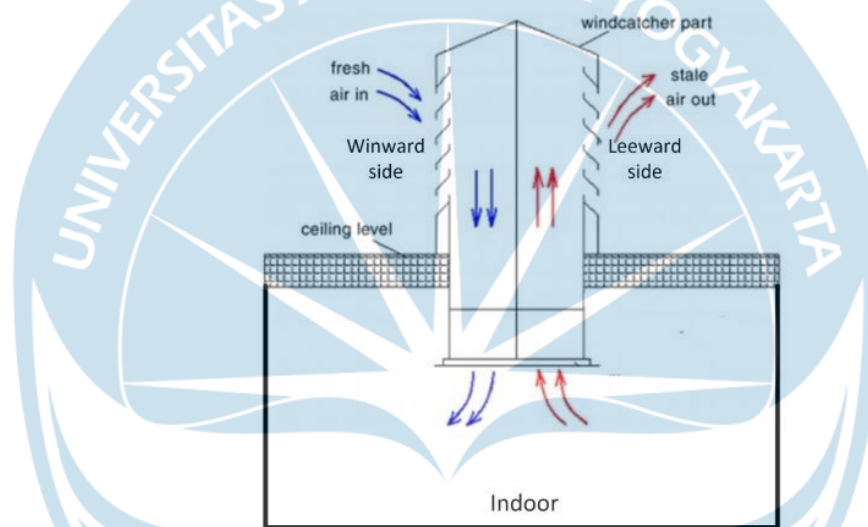
Ketika kedua sistem ini bekerja bersamaan, terbentuklah satu siklus ventilasi pasif yang utuh: udara masuk melalui *windcatcher* (*wind-driven cross ventilation*), mengalir melintasi ruang dalam, lalu terdorong naik melalui *solar chimney* (*Stack Ventilation*). Dengan cara ini, meskipun bangunan tidak memiliki void, aliran udara tetap dapat bergerak secara stabil dari bawah ke atas, mengurangi risiko stagnasi khususnya di lantai bawah dan area *leeward* serta membantu menjaga kenyamanan termal tanpa ketergantungan besar pada sistem pendingin mekanis. Pendekatan ini secara teoritis potensial untuk diterapkan.

2.2 Teknologi *Windcatcher*

Teknologi *Windcatcher* adalah salah satu metode ventilasi alami yang memanfaatkan perbedaan tekanan angin untuk mengalirkan udara segar ke dalam ruang bangunan. Konsep ini banyak digunakan di daerah panas-kering dan iklim tropis untuk mengurangi kebutuhan pendinginan mekanis dan meningkatkan

kualitas udara dalam ruangan melalui sistem pemanfaatan angin sebagai sumber energi alami. Teknologi *Windcatcher* terdiri dari beberapa komponen utama, antara lain bukaan *Inlet* untuk menangkap angin, shaft vertikal sebagai jalur aliran udara, dan *Outlet* yang membuang udara panas dari dalam bangunan (Li et al., 2025).

1. Prinsip Kerja *Windcatcher*



Gambar 2. 5 Ilustrasi *Windcatcher*

Sumber: (Benkari et al., 2017)

Windcatcher beroperasi dengan memanfaatkan dua mekanisme utama yang bekerja secara alami:

a. Tekanan Angin (*Wind Pressure*)

Ketika angin bertiup dan mengenai bukaan di bagian atas *Windcatcher*, terbentuk tekanan positif yang mendorong udara segar masuk ke dalam shaft dan mengalirkannya menuju ruang di bawahnya. Pada saat yang sama, udara panas dari dalam ruangan terdorong keluar melalui bukaan lain yang menghadap arah

berlawanan atau melalui *Outlet* di bagian atas. Proses ini menciptakan sirkulasi udara yang terus-menerus tanpa bantuan kipas atau alat mekanis.

b. Gaya Apung Termal (*Thermal Buoyancy*)

Saat suhu di dalam bangunan lebih tinggi daripada suhu di luar, udara panas yang lebih ringan akan naik melalui shaft dan keluar lewat bukaan atas. Udara segar dari luar kemudian masuk untuk menggantikannya. Mekanisme alami ini memungkinkan pertukaran udara tetap berlangsung meskipun kecepatan angin luar sedang rendah (M. Liu et al., 2024a).

2. Perkembangan Desain dan Tipe *Windcatcher*

Windcatcher telah mengalami perkembangan desain yang signifikan, mulai dari bentuk tradisional hingga versi modern yang kini mengintegrasikan teknologi digital dan prinsip arsitektur berkelanjutan. Pada awalnya, sistem ini dikembangkan sebagai solusi pasif untuk ventilasi dan pendinginan di wilayah beriklim panas dan kering, seperti Timur Tengah dan Afrika Utara. Namun, dalam dua dekade terakhir, penelitian dan penerapan *Windcatcher* telah meluas ke berbagai kondisi iklim, termasuk tropis dan subtropis, serta diadaptasi untuk bangunan bertingkat dan lingkungan urban modern, menjadikannya relevan dalam konteks arsitektur masa kini.

a. Desain Tradisional

Desain *Windcatcher* tradisional umumnya berbentuk menara vertikal dengan satu atau beberapa bukaan di bagian atas yang berfungsi untuk menangkap angin dari luar dan menyalurkannya ke dalam bangunan. Sistem ini telah digunakan

selama berabad-abad di berbagai kawasan beriklim panas dan kering karena kesederhanaan dan efektivitasnya.

- 1) **Unidirectional *Windcatcher*:** memiliki satu bukaan utama yang diarahkan ke arah angin dominan, sehingga fokus pada penangkapan aliran udara dari satu sisi tertentu.
- 2) **Multidirectional *Windcatcher*:** memiliki dua, empat, atau lebih bukaan yang memungkinkan sistem ini menangkap angin dari berbagai arah, menjadikannya lebih adaptif terhadap perubahan pola angin harian maupun musiman (Alsailani et al., 2021a).

3. Inovasi Desain Modern

Perkembangan teknologi dan meningkatnya tuntutan terhadap efisiensi energi telah mendorong munculnya berbagai inovasi dalam desain *Windcatcher* modern. Beberapa pengembangan penting meliputi:

- a. **Integrasi dengan Sistem Pendinginan Evaporatif:** Menambahkan media basah di dalam shaft untuk menurunkan suhu udara yang masuk, sehingga membantu menjaga kenyamanan termal secara alami.
- b. ***Windcatcher* dengan Heat Pipe:** Menggunakan pipa kalor (heat pipe) untuk meningkatkan efisiensi pendinginan pasif melalui mekanisme perpindahan panas laten, tanpa membutuhkan energi listrik tambahan
- c. **Desain Aerodinamis:** Pengembangan bentuk shaft seperti persegi, segi enam, atau lingkaran, serta penambahan baffle di dalamnya, bertujuan untuk mengoptimalkan aliran udara dan meminimalkan turbulensi.

- d. *Windcatcher* Digital dan Smart: Mengintegrasikan sensor kualitas udara, damper otomatis, dan sistem kontrol berbasis IoT untuk menyesuaikan bukaan ventilasi secara real-time sesuai kebutuhan udara segar dan kondisi lingkungan

4. Aplikasi pada Bangunan Modern

Windcatcher kini tidak hanya diterapkan pada rumah tradisional, tetapi juga pada sekolah, kantor, dan bangunan bertingkat. Studi bibliometrik terbaru menunjukkan tren riset global *Windcatcher* didominasi oleh tema ventilasi alami, efisiensi energi, dan optimasi desain berbasis CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Penggunaan simulasi digital memungkinkan analisis performa *Windcatcher* secara presisi sebelum implementasi di lapangan (Tjuatja and Wibowo, 2025).

5. Tipe *Windcatcher* Berdasarkan Jumlah Bukaan

Berdasarkan jumlah dan arah bukaannya, *Windcatcher* dapat diklasifikasikan ke dalam beberapa tipe utama berikut:

- a. Satu Sisi (*Unidirectional*): Memiliki satu bukaan utama yang diarahkan ke arah angin dominan, sehingga paling efektif digunakan di lokasi dengan arah angin yang relatif tetap sepanjang tahun.
- b. Dua Sisi (*Bidirectional*): Didesain dengan dua bukaan yang saling berlawanan untuk menangkap angin dari dua arah berbeda, menjaga sirkulasi udara meskipun arah angin berganti.

- c. Empat Sisi (*Multidirectional*): Tipe ini memiliki empat atau lebih bukaan sehingga mampu menangkap angin dari berbagai arah. Desain ini paling adaptif terhadap pola angin yang berubah-ubah, dan banyak diterapkan pada lingkungan urban padat.
- d. *Windcatcher* Hybrid: Merupakan inovasi yang menggabungkan *Windcatcher* dengan *Solar Chimney* atau sistem mekanis tambahan, sehingga kinerjanya tetap optimal di iklim tropis lembap yang memiliki kecepatan angin rendah dan kelembapan tinggi.

6. Keunggulan *Windcatcher*

Windcatcher memiliki potensi yang menarik karena ada beberapa keunggulan yang bisa diterapkan khususnya pada bangunan tinggi yang notabene *wincatcher* tersebut akan diletakkan di bagian atas atau atap bangunan. Berikut keunggulan tersebut dirangkum dalam beberapa poin yakni:

a. Peningkatan Ventilasi dan Kualitas Udara

Windcatcher dirancang untuk mengalirkan udara segar dari luar ke dalam bangunan dengan memanfaatkan kombinasi tekanan angin dan efek buoyancy, bahkan saat kecepatan angin di luar relatif rendah (M. Liu et al., 2024b). Mekanisme ini menghasilkan aliran udara yang stabil dan berkesinambungan, membantu mencegah udara dalam ruangan menjadi stagnan serta menurunkan kadar polutan seperti CO₂ dan VOC. Dengan demikian, kualitas udara di dalam ruang tetap terjaga. Penelitian yang dilakukan oleh Li et al., (2025) juga membuktikan bahwa sistem *Windcatcher* mampu mempertahankan sirkulasi udara

yang efektif di berbagai kondisi lingkungan tanpa memerlukan bantuan sistem mekanis atau pendingin buatan.

b. Kenyamanan Termal dan Potensi Pendinginan Pasif

Penelitian terbaru menunjukkan bahwa *Windcatcher* mampu menurunkan suhu ruangan secara pasif antara 3-9°C, tergantung pada desain sistem, kecepatan angin luar, serta bentuk dan orientasi bangunan (Mamari et al., 2025). Ketika *Windcatcher* diintegrasikan dengan sistem pendinginan evaporatif, kinerjanya menjadi semakin optimal, mampu menjaga suhu ruang tetap berada dalam zona kenyamanan termal bahkan saat musim panas ekstrem, sekaligus mencegah terjadinya overheating (M. Liu et al., 2024b).

c. Efisiensi Energi dan Pengurangan Jejak Karbon

Windcatcher juga memberikan kontribusi nyata terhadap penghematan energi, terutama dengan menekan penggunaan sistem pendingin mekanis dan AC konvensional. Menurut studi yang dilakukan oleh Nejat et al., (2025b), penerapan *Windcatcher* pada bangunan sekolah dan hunian mampu mengurangi beban energi hingga 60% serta menurunkan emisi karbon secara signifikan. Pada skala arsitektur, sistem ini menjadi salah satu elemen penting dalam penerapan arsitektur hijau dan strategi efisiensi energi yang berkelanjutan.

d. Adaptasi Desain Berkelanjutan dan Nilai Ekonomi

Keunggulan lain dari *Windcatcher* terletak pada fleksibilitas desainnya, yang dapat diterapkan baik pada bangunan lama maupun bangunan baru. Sistem ini juga dapat diintegrasikan dengan teknologi modern seperti automated vent control, sensor kualitas udara, atau bantuan tenaga surya (solar-powered assist) untuk

menjaga kinerja optimal, terutama saat angin lemah atau pada musim panas yang lembap. Selain itu, biaya perawatan *Windcatcher* relatif rendah dibandingkan sistem ventilasi mekanis, dan biaya operasional pun berkurang karena penggunaan listrik untuk pendinginan jauh lebih sedikit. Bangunan yang memanfaatkan *Windcatcher* umumnya memiliki nilai jual dan citra lingkungan yang lebih tinggi, karena dianggap lebih efisien, berkelanjutan, dan ramah lingkungan (UGREEN, 2024).

Dengan berbagai keunggulan yang dimilikinya, *Windcatcher* kini diakui sebagai salah satu solusi ventilasi pasif yang paling efektif, ramah lingkungan, dan hemat energi. Sistem ini terbukti layak diterapkan tidak hanya pada bangunan di wilayah beriklim panas dan kering, tetapi juga pada kawasan tropis dengan kebutuhan ventilasi alami yang tinggi. Seiring berkembangnya tren arsitektur berkelanjutan dan green building, teknologi *Windcatcher* menjadi semakin relevan sebagai strategi desain yang mendukung efisiensi energi sekaligus menjaga kenyamanan dan kualitas lingkungan dalam bangunan.

2.2.1 Tower *Windcatcher*

Tower Windcatcher (TWC) atau menara penangkap angin merupakan elemen arsitektur pasif yang berfungsi meningkatkan ventilasi alami dan kenyamanan termal di dalam bangunan tanpa memerlukan energi mekanis. Prinsip utamanya adalah menangkap aliran udara dari ketinggian di atas atap dan menyalurkannya ke ruang dalam melalui sistem saluran vertikal (Mayhoub et al., 2025).

Secara historis, TWC banyak diterapkan dalam arsitektur tradisional Timur Tengah, terutama di kota Yazd (Iran) dan Kairo (Mesir). Bentuk geometrinya bervariasi: persegi, heksagonal, atau melingkar dan disesuaikan dengan kondisi iklim setempat untuk memaksimalkan efisiensi aliran udara (Mayhoub et al., 2025).

TWC bekerja dalam dua mode utama:

1. Downdraft mode, ketika angin luar memasuki menara dan diarahkan ke bawah menuju ruang dalam.
2. Updraft mode, ketika suhu udara di dalam bangunan lebih tinggi daripada di luar, sehingga perbedaan densitas menciptakan efek cerobong (*stack effect*) yang mendorong udara panas keluar melalui menara.

Kombinasi kedua mekanisme ini memungkinkan TWC berfungsi sepanjang tahun, baik untuk pendinginan pasif maupun pembuangan udara panas, menjadikannya salah satu sistem ventilasi alami paling efektif dalam desain bangunan berkelanjutan (Mayhoub et al., 2025).

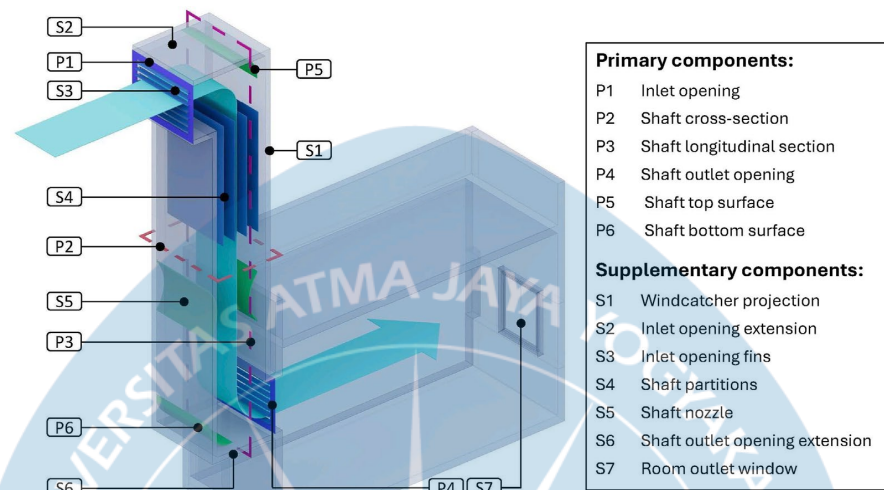
Berdasarkan berbagai studi eksperimental dan simulasi terkini, beberapa parameter geometris yang direkomendasikan untuk *Tower Windcatcher* (TWC) dijelaskan pada tabel 2.2

Tabel 2. 2 Rekomendasi Desain Geometrik TWC

Komponen	Parameter Optimal	Efek Kinerja
Tinggi menara	6-9 m di atas atap	Maksimalkan tekanan dinamis pada <i>Inlet</i>
Sudut kepala menara	30°-45° miring atau melengkung	Kurangi kehilangan energi & turbulensi
Bentuk penampang	Persegi panjang atau heksagonal	Distribusi udara merata & efisiensi tinggi
Rasio bukaan <i>Inlet</i> terhadap luas lantai	±3%	Ventilasi alami optimal
Desain kepala <i>Windcatcher</i>	Aerodinamis melengkung	Peningkatan performa hingga 70%

Sumber: (Mayhoub et al., 2025).

2.2.2 Faktor-Faktor Penting dalam Desain *Windcatcher*



Gambar 2. 6 Ilustrasi Komponen *Windcatcher*

(Mayhoub et al., 2025)

Efektivitas kinerja *Windcatcher* sangat dipengaruhi oleh faktor desain, seperti bentuk dan orientasi bukaan, dimensi saluran, serta konfigurasi internalnya. Kombinasi faktor-faktor tersebut menentukan jumlah udara yang dapat mengalir, arah sirkulasi udara, serta distribusi kecepatan aliran di dalam ruang. Secara keseluruhan, desain yang tepat mampu meningkatkan kenyamanan termal penghuni sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap sistem pendingin buatan. Mayhoub, Selim and Abuzaid, (2025) dalam penelitiannya telah menggambarkan poin-poin krusial terkait faktor-faktor yang mempengaruhi desain *Windcatcher* yakni:

1. Bukaan *Inlet* (*Inlet Openings*)

Efisiensi penangkapan angin pada sistem *Windcatcher* sangat dipengaruhi oleh jumlah, bentuk, dan orientasi bukaan yang digunakan. Ketiga aspek tersebut

menentukan seberapa besar volume udara yang dapat ditangkap, arah alirannya, serta kestabilan ventilasi alami di dalam ruang.

a) Jumlah Sisi Bukaannya

Windcatcher satu sisi umumnya lebih efektif digunakan di wilayah dengan arah angin dominan yang stabil, karena aliran udara dapat diarahkan secara konsisten. Sebaliknya, *Windcatcher* dengan dua atau empat sisi lebih fleksibel dalam menghadapi pola angin yang berubah-ubah, sehingga cocok diterapkan pada kondisi iklim tropis atau daerah dengan turbulensi arah angin yang tinggi.

b) Bentuk Bukaannya

Hasil berbagai penelitian menunjukkan bahwa bukaan berbentuk persegi panjang dengan rasio panjang terhadap lebar yang lebih tinggi mampu meningkatkan laju ventilasi alami dibandingkan dengan bentuk persegi atau lingkaran. Hal ini disebabkan oleh karakteristik aerodinamis yang lebih baik dalam menangkap dan mengarahkan aliran udara masuk.

c) Luas Bukaannya

Secara umum, luas bukaan yang optimal setara dengan luas penampang poros *Windcatcher*, atau sekitar 3% dari luas lantai ruang yang dilayani. Rasio ini menjaga keseimbangan antara volume udara masuk dan kapasitas ruang, sehingga aliran udara tetap stabil tanpa menyebabkan tekanan berlebih di dalam ruang.

2. Penampang Poros (*Shaft Cross-section*)

Penampang poros berperan penting dalam menentukan volume udara yang dapat mengalir melalui sistem *Windcatcher* serta karakteristik turbulensi internal di

dalam saluran. Variasi bentuk dan orientasi penampang akan memengaruhi efisiensi penyaluran udara serta pola distribusi aliran di ruang yang dilayani.

a) Geometri Penampang

Bentuk segi empat dan heksagonal umumnya menunjukkan performa aerodinamis yang lebih baik dibandingkan dengan penampang lingkaran. Studi eksperimental di Iran menunjukkan bahwa *Windcatcher* dengan penampang heksagonal mampu meningkatkan laju aliran udara hingga sekitar 19% dibandingkan dengan bentuk persegi. Peningkatan ini terjadi karena sisi-sisi miring pada bentuk heksagonal membantu mengarahkan aliran udara dengan lebih stabil dan mengurangi pembentukan pusaran (vortex) di dinding saluran.

b) Orientasi Poros

Windcatcher dengan penampang persegi panjang longitudinal cenderung menghasilkan distribusi udara dalam ruang yang lebih merata. Orientasi ini memungkinkan udara bergerak dengan kecepatan yang lebih stabil dan nyaman bagi penghuni, karena aliran dapat menyebar lebih efektif sepanjang dimensi ruang.

3. Ketinggian dan Bentuk Longitudinal Poros

Ketinggian *Windcatcher* memiliki peran penting dalam menentukan tekanan dinamis dan efisiensi aliran ventilasi di dalam sistem. Semakin tinggi poros, semakin besar potensi perbedaan tekanan antara bagian atas dan bawah, namun peningkatan tinggi yang berlebihan tidak selalu menghasilkan kinerja yang lebih baik.

a) Tinggi Optimal

Berdasarkan hasil studi eksperimental dan simulasi, tinggi *Windcatcher* yang ideal umumnya tidak melebihi tiga lantai atau sekitar 9 meter. Pada ketinggian tersebut, efek tekanan dinamis masih bekerja secara efektif tanpa menimbulkan kehilangan energi signifikan akibat gesekan dan turbulensi. Sebaliknya, penambahan tinggi yang berlebihan justru dapat menurunkan efisiensi sirkulasi udara, karena aliran cenderung melemah di bagian bawah saluran.

b) Bentuk Longitudinal Poros

Penelitian menunjukkan bahwa poros dengan bentuk melengkung secara longitudinal mampu meningkatkan kecepatan aliran udara sebesar 10-15% dibandingkan dengan poros lurus. Peningkatan ini terjadi karena bentuk melengkung dapat mengurangi kehilangan energi akibat turbulensi di sepanjang dinding saluran, sehingga aliran udara bergerak lebih stabil menuju ruang dalam.

4. Permukaan Atas dan Bawah Poros

Desain permukaan atas dan bawah poros *Windcatcher* memiliki pengaruh signifikan terhadap efisiensi aliran udara dan stabilitas ventilasi di dalam sistem. Bentuk serta sudut kemiringan pada kedua bagian ini menentukan arah masuk dan keluarnya udara, sekaligus mengontrol tingkat turbulensi di sepanjang saluran.

a) Permukaan Atas (Upper Surface)

Desain permukaan atas yang miring antara 30° - 45° atau melengkung dengan jari-jari setara lebar poros terbukti mampu meningkatkan efisiensi aliran udara sebesar 4-10%. Bentuk ini membantu memperlancar transisi aliran dari udara luar

menuju saluran utama, mengurangi separasi aliran di tepi bukaan, serta menghasilkan pergerakan udara yang lebih halus dan stabil.

b) Permukaan Bawah (*Lower Surface*)

Sementara itu, kemiringan dasar poros sekitar 55° menunjukkan peningkatan efektivitas pertukaran udara hingga 14%. Sudut ini membantu mempercepat pelepasan udara panas ke ruang luar sekaligus meningkatkan sirkulasi udara segar ke area bawah. Namun, penerapan desain ini perlu mempertimbangkan pemerataan distribusi suhu, agar tidak terjadi perbedaan temperatur signifikan antara bagian atas dan bawah ruang yang dilayani.

5. Komponen Tambahan dan Elemen Suplementer

Dalam perkembangan desain modern, berbagai komponen tambahan dan elemen suplementer telah diterapkan untuk meningkatkan kinerja konveksi dan distribusi udara pada sistem *Windcatcher*. Inovasi-inovasi ini berfungsi mengoptimalkan arah aliran, mengurangi kehilangan energi, serta menstabilkan tekanan udara di dalam saluran.

a) Perpanjangan Bukaan (*Inlet Extension*)

Desain divergent *Inlet* terbukti dapat meningkatkan volume udara yang masuk hingga 2,5% pada kondisi kecepatan angin tinggi (sekitar 6 m/s). Sudut pelebaran bukaan yang dianggap optimal berada pada rentang 15° - 30° , karena mampu memperbesar area penangkapan angin tanpa menimbulkan separasi aliran berlebihan di tepi bukaan.

b) Dinding Sayap (*Wing Wall*)

Penambahan wing wall di sisi bukaan berfungsi memperbaiki arah datang angin dan menstabilkan tekanan di sekitar *Inlet*. Komponen ini efektif terutama pada wilayah dengan kecepatan angin rendah, di mana tekanan dinamis alami tidak cukup kuat untuk mendorong udara masuk secara optimal.

c) Sirip atau Kisi (*Fins/Louvers*)

Elemen ini berperan sebagai flow straightener, yaitu penstabil aliran udara agar bergerak lebih seragam menuju saluran vertikal. Penggunaan hingga enam lapis sirip diketahui memberikan kinerja optimal, membantu mengarahkan aliran tanpa menimbulkan efek short-circuit udara antar sisi saluran.

d) Sekat Internal (*Shaft Partitions*)

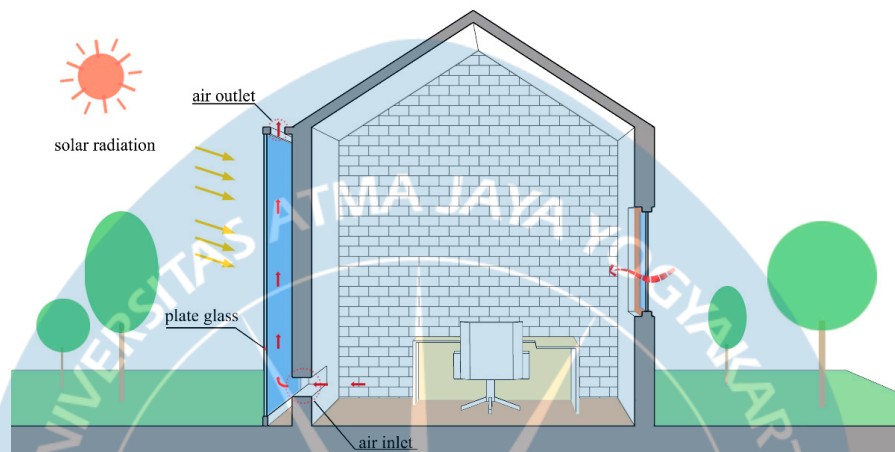
Pembagian ruang dalam poros menjadi beberapa sub-saluran kecil melalui penambahan sekat internal dapat meningkatkan kecepatan aliran serta memperbaiki pola distribusi udara di sepanjang penampang vertikal. Strategi ini juga membantu mengurangi turbulensi berlebih dan menjaga kestabilan tekanan antar saluran.

6. Integrasi Dengan Bukaan Ruangan

Efisiensi *Windcatcher* meningkat signifikan ketika dikombinasikan dengan sistem ventilasi silang (cross-ventilation). Rasio bukaan: Perbandingan luas bukaan masuk (*Inlet*) dan keluar (*Outlet*) idealnya berada pada rasio 1:2, agar perbedaan tekanan antara sisi angin (windward) dan sisi terlindung (leeward) dapat dimanfaatkan secara optimal. Posisi *Outlet*: Bukaan *Outlet* sebaiknya ditempatkan di sisi leeward bangunan, tepat di tengah bidang dinding luar, untuk menghasilkan

alur aliran yang simetris dan mempercepat pembuangan udara panas dari ruang dalam.

2.3 Teknologi *Solar Chimney*



Gambar 2. 7 Ilustrasi *Solar Chimney*

Sumber: (Fang et al., 2022)

Solar Chimney, atau dikenal juga sebagai cerobong surya, merupakan sistem ventilasi pasif yang bekerja dengan memanfaatkan panas matahari untuk meningkatkan pergerakan udara di dalam bangunan. Prinsip dasarnya mengandalkan efek *buoyancy* (daya apung udara panas): ketika udara di dalam cerobong terpapar panas, densitasnya menurun sehingga udara naik secara alami dan menciptakan tarikan udara segar dari bawah bangunan. Dengan mekanisme ini, *Solar Chimney* mampu memperkuat ventilasi alami sekaligus membantu menjaga kenyamanan termal tanpa perlu energi mekanis tambahan seperti kipas atau pendingin udara.

Konsep ini sebenarnya bukan hal baru. Sejak berabad-abad lalu, masyarakat di kawasan Timur Tengah dan Mediterania telah memanfaatkan sistem serupa sebagai solusi sederhana untuk sirkulasi udara dalam arsitektur tradisional mereka.

Kini, dengan dukungan teknologi modern dan pendekatan desain yang lebih presisi, *Solar Chimney* kembali menjadi elemen penting dalam arsitektur hijau dan berkelanjutan, terutama di wilayah beriklim panas dan kering.

Secara umum, sistem *Solar Chimney* terdiri dari tiga komponen utama:

1. Area kolektor surya, biasanya dilapisi material berwarna gelap dan dilindungi kaca transparan untuk menangkap serta mempertahankan panas matahari.
2. Saluran atau cerobong vertikal, terbuat dari material konduktor panas untuk mempercepat proses pemanasan udara dan memfasilitasi gerakan udara ke atas.
3. Bukaannya atas dan bawah, yang berfungsi sebagai jalur keluar udara panas dan jalur masuk udara segar, menjaga sirkulasi alami tetap berkesinambungan.

Melalui kombinasi ketiga komponen tersebut, *Solar Chimney* bekerja secara pasif namun efektif untuk meningkatkan aliran udara vertikal, memperbaiki kualitas udara dalam ruang, serta menurunkan beban energi pendinginan pada bangunan.

Sejumlah penelitian terbaru menunjukkan bahwa *Solar Chimney* terbukti efektif diterapkan pada berbagai kondisi iklim, baik panas-lembap maupun panas-kering, sebagai solusi hemat energi untuk pengendalian iklim dalam bangunan (Maghrabie et al., 2022b). Dalam studi yang meneliti performa *Solar Chimney* dua sisi aktif, suhu udara pada bagian keluaran cerobong tercatat dapat mencapai 49,4°C, dengan kecepatan aliran udara maksimum sekitar 0,8 m/s. Nilai ini cukup untuk mendukung ventilasi alami yang efektif sekaligus menjaga udara dalam ruang tetap segar dan bersirkulasi dengan baik (Fereidoni et al., 2025).

Dari sisi desain, geometri cerobong menjadi faktor krusial. Parameter seperti kemiringan cerobong, tinggi saluran, dan luas penampang berperan besar terhadap efisiensi aliran udara serta kemampuan sistem dalam meningkatkan suhu udara di dalam cerobong. Desain yang tepat mampu memaksimalkan efek daya apung (*buoyancy*) tanpa menyebabkan kehilangan tekanan berlebih.

Lebih jauh lagi, pendekatan hibrida modern yang mengombinasikan *Solar Chimney* dengan ventilasi mekanik dan teknologi termal adaptif menunjukkan hasil yang menjanjikan. Menurut Kumar *et al.*, (2025), sistem ini dapat meningkatkan efisiensi energi bangunan secara signifikan dan berkontribusi pada penurunan emisi karbon.

Integrasi *Solar Chimney* ke dalam desain bangunan tidak hanya membantu mengurangi konsumsi energi total, tetapi juga mendukung penerapan prinsip arsitektur berkelanjutan dan rendah karbon. Sistem ini dapat berfungsi sepanjang hari, serta mudah diintegrasikan dengan panel surya fotovoltaik, menciptakan sinergi antara produksi energi dan pengelolaan ventilasi pasif (Maghrabie *et al.*, 2022; Kumar *et al.*, 2025).

1. Inovasi Model *Solar Chimney* Terkini

Penelitian terbaru menunjukkan bahwa pengembangan *Solar Chimney* tidak lagi terbatas pada bentuk cerobong vertikal konvensional. Arah riset kini bergerak menuju berbagai konfigurasi yang lebih adaptif terhadap kebutuhan bangunan masa kini, termasuk gedung bertingkat serta konteks iklim panas-lembap.

a. *Solar Chimney* Terintegrasi pada Bangunan Bertingkat

Zhang *et al.*, (2022) mmeneliti kinerja ventilasi *Solar Chimney* yang dipadukan secara langsung dengan fasad bangunan multi-lantai melalui pendekatan teoritis dan numerik. Hasil penelitian mereka menunjukkan bahwa sistem ini mampu meningkatkan suplai aliran udara ke setiap lantai, selama dimensi saluran dan posisi bukaan dirancang secara optimal.

b. *Solar Chimney* dengan Sistem Penyimpanan Panas (*Sensible Heat Storage*)

Sornek, Figaj and Papis-fr (2025) mengembangkan model *Solar Chimney* yang dilengkapi material penyimpan panas, seperti batu atau beton berat, di dalam salurannya. Material ini berfungsi menyerap panas pada siang hari, lalu melepaskannya kembali pada sore hingga malam sehingga efek cerobong dapat berlangsung lebih lama dan mendukung ventilasi malam (*night purge*). Penelitian tersebut juga melaporkan potensi pengurangan penggunaan listrik tahunan serta menurunkan beban sistem pendingin ketika teknologi ini diintegrasikan.

c. *Solar Chimney* Berkanal Ganda dan Kombinasi Dinding-Atap

Penelitian Nguyen and Nguyen (2023) menilai kinerja wall *Solar Chimney* serta sistem gabungan dinding-atap (*vertical wall-horizontal roof Solar Chimney*). Mereka menemukan bahwa konfigurasi gabungan mampu meningkatkan laju aliran udara hingga puluhan persen dibanding sistem cerobong tunggal, meskipun sangat bergantung pada pengaturan posisi bukaan, bentuk geometri belokan, serta potensi terjadinya *reverse flow*.

d. *Solar Chimney* Hibrida dengan Sistem Pendingin Aktif

Beberapa studi mutakhir mengombinasikan *Solar Chimney* dengan sistem pendingin aktif, antara lain evaporative cooling serta pendingin mekanis berkapasitas rendah.

2. **Konsep *Solar Chimney* Berundak (*Stepped / Tiered Solar Chimney*)**

Pada bangunan bertingkat yang tidak memiliki void tengah, seperti Gedung Balai Kota dengan 10 lantai, penggunaan satu cerobong vertikal yang menjulang dari lantai dasar hingga atap dapat menimbulkan beberapa kendala. Tantangan tersebut meliputi potensi kehilangan tekanan yang besar, keterbatasan ruang pada fasad, serta kompleksitas integrasi dengan struktur eksisting. Untuk menjawab kendala ini, penelitian ini mengusulkan konsep *Solar Chimney* berundak atau bertingkat (*stepped/tiered Solar Chimney*).

a. Definisi dan Ide Dasar

Solar Chimney berundak merupakan sistem cerobong yang dibagi ke dalam beberapa segmen sesuai kelompok lantai, misalnya setiap 2-3 lantai, bukan dalam bentuk satu shaft tunggal dari bawah hingga atas. Setiap segmen bertindak sebagai thermal booster lokal: udara di dalam segmen dipanaskan oleh kolektor surya, naik melalui *Outlet* segmen tersebut, kemudian diteruskan ke segmen berikutnya atau langsung ke luar bangunan. Dengan pendekatan ini, efek cerobong yang terjadi tidak berlangsung satu kali dalam ketinggian penuh, namun berlangsung secara berulang dan berlapis (*multi-stage stack effect*).

Konsep ini terinspirasi dari sistem *Wall Windcatcher* (WWC) yang dikembangkan Almazmumi, Sun, *et al.*, (2025) untuk ventilasi pasif multi-lantai. WWC memanfaatkan duct eksternal pada fasad yang dilengkapi bukaan per lantai, sehingga ventilasi dapat dicapai tanpa memerlukan void besar di tengah bangunan. Dalam penelitian ini, prinsip tersebut diterjemahkan ke dalam modul *Solar Chimney* yang ditempel pada fasad bangunan, dengan karakteristik berikut:

- 1) modul cerobong ditempatkan pada fasad luar,
- 2) satu modul melayani 2-3 lantai,
- 3) setiap modul mencakup kolektor surya, saluran vertikal pendek, serta bukaan *Inlet-Outlet* per lantai.

b. Mekanisme Kerja

Secara umum, proses kerja *Solar Chimney* berundak dapat dijelaskan bertingkat sebagai berikut:

1) Segmen Bawah (Lantai 1-3)

Kolektor surya memanaskan udara di dalam segmen sehingga udara bergerak naik menuju *Outlet*, menciptakan zona tekanan rendah yang menarik udara dari ruang lantai 1-3.

2) Segmen Tengah (Lantai 4-6)

Udara segar kembali masuk melalui bukaan lantai 4-6 dan dipanaskan di segmen tengah. Pemanasan dapat berasal dari radiasi langsung maupun sisa panas dari segmen bawah jika sistem dihubungkan secara seri, sehingga terbentuk *buoyancy effect* tahap kedua.

3) Segmen Atas (Lantai 7-10)

Segmen ini berfungsi sebagai final booster untuk mendorong udara keluar ke atmosfer pada elevasi yang lebih tinggi. Pada tahap ini, sistem dapat digabungkan dengan panel fotovoltaik atau elemen atap lain untuk meningkatkan efisiensi energi.

Dengan pendekatan berlapis, tinggi efektif tiap segmen menjadi lebih pendek sehingga kerugian tekanan akibat gesekan dinding dan perubahan arah aliran lebih mudah dikendalikan. Di sisi lain, akumulasi panas tetap signifikan karena diperoleh secara bertahap di setiap segmen, mirip dengan prinsip *combined wall-roof Solar Chimney* yang dilaporkan memiliki kinerja aliran lebih baik dibanding sistem cerobong tunggal.

c. Keunggulan Konfigurasi Berundak

Jika dibandingkan dengan *Solar Chimney* tunggal yang membentang penuh, konfigurasi berundak menawarkan beberapa keunggulan teoritis untuk bangunan bertingkat di iklim tropis lembap, antara lain:

1) Kontrol distribusi aliran per lantai

Setiap segmen memiliki *Inlet-Outlet* tersendiri sehingga luas bukaan, posisi, dan resistansi lokal dapat dikalibrasi untuk memperoleh distribusi aliran yang lebih seimbang.

2) Kinerja lebih stabil pada iklim lembap

Pada iklim lembap, selisih temperatur dalam-luar sering kali kecil sehingga efek cerobong kurang kuat. Dengan membagi segmen, gradien suhu dapat

dioptimalkan pada tiap level, dan jika menggunakan material penyimpan panas, kinerja dapat berlangsung lebih lama meski perbedaan suhu total tidak besar.

3) Lebih mudah diintegrasikan dengan struktur dan konstruksi

Modul berundak dapat dirancang sebagai elemen fasad prefabrikasi, sehingga cocok untuk bangunan baru maupun retrofit tanpa perubahan besar pada tata ruang.

4) Fleksibel untuk sistem hibrida *multi-driver*

Segmen paling atas dapat dikombinasikan dengan *Windcatcher* atau windshield untuk memanfaatkan tekanan angin, sehingga sistem tidak hanya bergantung pada *stack effect* dan menjadi lebih adaptif terhadap kondisi cuaca harian.

2.4 Kombinasi *Windcatcher* dan *Solar Chimney*

1. Konsep dasar dan prinsip kerja

Kombinasi *Windcatcher* dan *Solar Chimney* merupakan konsep ventilasi alami hibrida yang bekerja dengan memanfaatkan dua mekanisme sekaligus: tekanan angin pada *Windcatcher* (*wind-driven ventilation*) dan gaya apung udara panas pada *Solar Chimney* (*stack-driven ventilation*).

Windcatcher sendiri adalah menara ventilasi yang ditempatkan pada bagian atap bangunan dengan beberapa bukaan yang diarahkan ke arah datangnya angin. Sistem ini memanfaatkan perbedaan tekanan antara sisi yang terkena angin (*windward*) dan sisi yang terlindungi (*leeward*) untuk menangkap dan mengalirkan udara segar ke dalam bangunan. Pada saat kecepatan angin rendah, aliran udara

tetap dapat terbentuk melalui efek buoyancy akibat perbedaan temperatur antara udara dalam dan luar ruangan.

Penelitian Sangdeh and Nasrollahi, (2022) menunjukkan bahwa performa *Windcatcher* bergantung pada beberapa faktor, di antaranya tinggi menara, bentuk penampang (persegi atau lingkaran), orientasi bukaan terhadap arah angin, jumlah partisi internal, serta bentuk atap bangunan yang menjadi tempat pemasangan *Windcatcher*.

Sementara itu, *Solar Chimney* merupakan saluran vertikal tertutup yang biasanya dilapisi material penyerap panas dan kaca. Sistem ini memanfaatkan energi radiasi matahari untuk meningkatkan temperatur udara di dalam saluran. Udara yang memanaskan akan naik ke bagian atas dan keluar melalui *Outlet*, sehingga menciptakan dorongan (*draft*) yang menarik udara yang lebih sejuk dari bagian bawah atau dari luar bangunan. Menurut Zhang, Tao and Shi (2021) *Solar Chimney* merupakan salah satu sistem ventilasi pasif yang paling efektif dalam meningkatkan ventilasi alami dan kenyamanan termal, dengan kinerja yang dipengaruhi oleh tinggi cerobong, luas permukaan kolektor, rasio *Inlet-Outlet*, serta orientasinya terhadap matahari.

Ketika *Windcatcher* dan *Solar Chimney* diintegrasikan, keduanya bekerja sebagai satu siklus ventilasi alami yang lengkap: *Windcatcher* menjadi jalur masuk udara segar, sedangkan *Solar Chimney* menjadi jalur keluarnya udara panas. Dalam kondisi angin yang cukup kuat, aliran udara akan lebih didominasi oleh *wind-driven flow*, sementara pada kondisi angin yang lemah namun radiasi matahari tinggi, aliran tetap dapat terjadi melalui *stack effect* pada *Solar Chimney*. Sistem ini

potensial untuk diterapkan pada bangunan beriklim panas, baik kering maupun lembap, yang memiliki intensitas angin dan radiasi matahari yang berubah-ubah sepanjang hari.

2. Mekanisme Fisika Kombinasi

Secara prinsip, mekanisme aliran udara pada sistem hibrida *Windcatcher-Solar Chimney* dapat dijelaskan melalui tiga tahapan utama, yaitu zona masuk, distribusi dalam ruang, dan zona keluar.

a. Zona Masuk (*Inlet*) - *Windcatcher*

Bukaan *Windcatcher* yang menghadap arah datangnya angin menerima tekanan positif sehingga udara luar terdorong masuk ke dalam saluran vertikal. Partisi yang ada di dalam menara berfungsi mengarahkan aliran udara menuju saluran horizontal yang terhubung dengan ruang-ruang di dalam bangunan. Pada malam hari atau ketika kecepatan angin rendah, aliran udara tetap dapat terjadi secara perlahan melalui perbedaan densitas udara dalam saluran (*buoyancy-assisted flow*).

b. Distribusi dalam Ruang

Udara segar yang masuk melalui *Windcatcher* kemudian mengalir dan menyapu area hunian (*occupied zone*). Seiring waktu, udara tersebut akan menghangat akibat adanya beban internal seperti aktivitas penghuni, penggunaan peralatan, dan pengaruh radiasi panas. Peningkatan suhu ini menyebabkan densitas udara menurun dan mendorongnya berpindah menuju zona keluaran.

c. Zona Keluar (*Outlet*) - *Solar Chimney*

Solar Chimney dilengkapi dengan dinding penyerap panas (thermal storage wall) yang memanfaatkan radiasi matahari untuk meningkatkan suhu udara di dalam saluran. Udara panas kemudian bergerak naik dan keluar melalui *Outlet* di bagian atas cerobong, menciptakan tekanan negatif di sisi bawah. Tekanan negatif ini menarik udara hangat dari dalam ruang melalui bukaan yang terhubung ke saluran *Solar Chimney*, sehingga membentuk siklus ventilasi alami yang berkelanjutan.

Pembahasan mengenai integrasi *Windcatcher* dan *Solar Chimney* menunjukkan bahwa keduanya bekerja sebagai satu sistem ventilasi pasif hibrida yang saling melengkapi. *Windcatcher* memanfaatkan tekanan angin di area atap untuk memasukkan udara segar ke dalam bangunan, sementara *Solar Chimney* mengandalkan pemanasan akibat radiasi matahari untuk membentuk efek cerobong yang mendorong udara panas naik dan keluar. Ketika dua mekanisme ini digabungkan, terbentuklah siklus aliran udara yang utuh: udara masuk dari windcatcher, bergerak melewati ruang-ruang hunian, kemudian naik menuju cerobong untuk dibuang. Pola ini dapat berlangsung stabil, baik pada kondisi angin yang cukup kuat maupun ketika angin melemah tetapi intensitas radiasi matahari tinggi.

Dari sudut pandang fisika bangunan, kombinasi ini menghasilkan *pressure loop* vertikal yang tidak dapat diperoleh jika bangunan hanya mengandalkan bukaan fasad horizontal. Hal ini sangat penting bagi gedung bertingkat, terutama

yang tidak memiliki *void* atau *atrium* sebagai jalur aliran udara vertikal. Pada kasus gedung perkantoran 10 lantai seperti Balaikota Magelang, ketiadaan ruang vertikal internal membuat udara luar sulit mencapai lantai bawah dan lantai tengah. Karena itu, dibutuhkan sistem yang mampu menggerakkan udara secara aktif dengan mengandalkan perbedaan tekanan dan temperatur.

Dengan demikian, penerapan *Windcatcher-Solar Chimney* menjadi sangat relevan bagi bangunan studi kasus ini. Sistem hibrida tersebut mampu menggantikan peran void dengan menyediakan jalur masuk dan jalur buangan udara yang terhubung secara vertikal, sehingga ventilasi alami dapat tetap berlangsung secara efektif di semua lantai. Selain mengatasi keterbatasan fisik bangunan 10 lantai tanpa void, integrasi dua mekanisme ini juga mendukung tujuan utama penelitian, yakni meningkatkan efisiensi energi dan memperbaiki kualitas udara dalam ruang.

3. Penerapan Kombinasi *Windcatcher* dan *Solar Chimney* di Iklim Tropis Lembap

a. Latar iklim dan masalah di permukiman padat

Banyak kota besar di Indonesia seperti Jakarta, Surabaya, Medan, Pekanbaru, dan Pontianak memiliki suhu rata-rata harian di atas 27 °C dengan tingkat kelembapan yang tinggi. Kondisi ini diperburuk oleh fenomena urban heat island serta keterbatasan ruang terbuka. Pada kawasan permukiman padat, bangunan umumnya berdiri sangat berdekatan sehingga bukaan samping seperti jendela konvensional sulit diterapkan dan aliran angin menjadi terbatas. Akibatnya,

ventilasi silang (*cross-ventilation*) sering tidak dapat terwujud, dan penghuni bergantung pada perangkat mekanis seperti kipas angin dan AC untuk mendapatkan kenyamanan termal.

Menurut Prima and Sugini (2019), situasi tersebut menunjukkan adanya kesenjangan antara kebutuhan kenyamanan termal dengan efektivitas ventilasi pasif. Oleh karena itu, diperlukan sistem ventilasi yang mampu memanfaatkan potensi angin dan panas matahari dari elevasi atap, kemudian mendistribusikannya sebagai aliran udara alami di dalam bangunan yang terhimpit secara spasial.

b. *Windcatcher* di iklim tropis: peluang dan kendala

Windcatcher awalnya berkembang di kawasan beriklim kering seperti Timur Tengah sebagai menara penangkap angin yang berfungsi mengalirkan udara sejuk ke dalam bangunan. Di wilayah Asia Tenggara, termasuk Indonesia, penerapannya masih terbatas. Menurut Prima and Sugini (2019), terdapat sejumlah kekhawatiran dari pengguna, antara lain risiko masuknya serangga, debu, air hujan, hingga kemungkinan menjadi tempat bersarang burung. Hal ini menjadi isu sensitif, terutama di wilayah yang memiliki potensi penyebaran penyakit seperti demam berdarah dan malaria.

Meski demikian, berbagai temuan penelitian yang dikumpulkan oleh Prima menunjukkan bahwa *Windcatcher* dapat bekerja secara efektif di iklim tropis lembap, termasuk pada kondisi angin berkecepatan rendah, asalkan desainnya disesuaikan dengan karakter iklim setempat. Beberapa rekomendasi desain tersebut meliputi:

- 1) Desain denah poligonal (misalnya segi delapan) dinilai lebih cocok untuk daerah dengan arah angin tidak stabil dan kecepatan rendah karena mampu menangkap aliran dari berbagai arah.
- 2) Penggunaan partisi internal (*blade*) yang rapat untuk membagi saluran menjadi pori-pori kecil. Konsep ini mampu meningkatkan kecepatan aliran (efek Bernoulli). Konfigurasi seperti X-blade atau +-blade direkomendasikan untuk kawasan tropis dengan kondisi angin lemah.
- 3) Tinggi menara yang memadai sangat berpengaruh terhadap performa sistem. Semakin tinggi *Windcatcher*, semakin besar volume udara yang dapat ditangkap, serta semakin rendah risiko masuknya polusi atau kotoran dari area jalan.

Untuk menjawab tantangan air hujan dan serangga, *Windcatcher* modern kini dibekali louver horizontal dan jaring pelindung berpori halus. Louver tidak hanya bertugas sebagai penahan hujan dan sinar matahari langsung, tetapi juga berfungsi sebagai elemen aerodinamis yang dapat meningkatkan performa ventilasi apabila sudut kemiringannya diatur pada kisaran $\pm 35-45^\circ$.

c. *Solar Chimney* sebagai gaya pendorong sekunder di iklim tropis

Solar chimney bekerja dengan memanfaatkan intensitas radiasi matahari yang relatif tinggi dan konsisten sepanjang tahun di wilayah tropis. Dinding kolektor berwarna gelap menyerap panas, sehingga temperatur udara di dalam saluran meningkat. Udara panas tersebut menjadi lebih ringan dan bergerak naik menuju bagian atas cerobong. Perbedaan tekanan inilah yang menghasilkan *stack effect*,

yaitu proses terhisapnya udara dari ruang dalam melalui *Inlet* di bagian bawah cerobong.

Menurut rangkuman Prima and Sugini (2019) yang merujuk pada berbagai literatur internasional, terdapat sejumlah kriteria desain penting yang perlu diperhatikan agar *Solar Chimney* dapat berfungsi optimal, di antaranya yakni digambarkan pada tabel 2.x.

Tabel 2. 3 Kriteria Desain *Solar Chimney*

Parameter Desain	Penjelasan Umum	Rekomendasi / Rentang Nilai (Literatur)	Catatan Teknis / Pertimbangan
Tinggi cerobong	Meningkatkan <i>pressure difference</i> antara bagian bawah dan atas cerobong	Semakin tinggi → semakin baik performa aliran	Memperhatikan struktur, estetika, dan beban angin
Cavity gap (jarak antar dinding)	Ruang tempat udara dipanaskan dan bergerak naik	$\pm 0,2-0,3$ m (umum digunakan)	Terlalu besar → efisiensi menurun; tergantung tinggi dan bukaan
Rasio panjang cavity terhadap gap	Menjaga stabilitas <i>airflow</i> dan panas dalam saluran	$\pm 10:1$, terutama untuk atap miring	Dapat disesuaikan dengan bentuk atap dan material
Luas <i>Inlet</i> & <i>Outlet</i>	Mengatur debit massa udara masuk dan keluar	Sama besar = optimal; <i>Outlet</i> sedikit lebih besar dapat lebih efisien	Hindari perbedaan terlalu besar agar tidak menimbulkan turbulensi berlebih
Sudut kemiringan (tipe atap miring)	Mengoptimalkan penyerapan radiasi matahari	$\pm 45-60^\circ$	Bergantung orientasi atap & sudut datang radiasi harian/tahunan
Material kolektor	Penyerap panas untuk meningkatkan temperatur udara di cavity	Material absorptif & konduktif (mis. metal/gipsum hitam + kaca)	Perlu mempertimbangkan <i>thermal mass</i> & perlindungan cuaca
Orientasi	Arah paparan terhadap matahari	Mengarah ke jalur radiasi optimum (timur-barat atau utara-selatan tergantung lokasi)	Dapat dikombinasi shading dan <i>low-E glass</i>
Jenis penutup <i>Outlet</i>	Penghalang air, serangga, dan <i>backflow</i>	Louver & mesh halus	Kemiringan louver dapat memengaruhi performa aliran

d. Sintesis Peran Kombinasi *Windcatcher* Dan *Solar Chimney*

Salah satu poin penting dari penelitian Prima and Sugini (2019) adalah bahwa *Windcatcher* dan *Solar Chimney* sebaiknya tidak dipandang sebagai dua sistem yang bekerja secara terpisah, melainkan sebagai satu sistem ventilasi alami hibrida yang saling melengkapi. Pendekatan ini dianggap relevan untuk bangunan pada kawasan permukiman padat di iklim tropis lembap, di mana ketersediaan aliran

angin dan kondisi termal sering berfluktuasi. Ringkasan sintesis perannya dapat dijelaskan sebagai berikut:

1) *Windcatcher* sebagai Penggerak Utama (*Primary Driver*)

Ketika kecepatan angin di area atap mencukupi, *Windcatcher* berfungsi sebagai sistem penangkap udara luar dan menyalurkannya ke ruang dalam. Desain denah poligonal dan penggunaan partisi internal yang rapat membantu memaksimalkan aliran udara meskipun arah angin berubah-ubah atau tidak terprediksi.

2) *Solar Chimney* sebagai Penggerak Sekunder (*Secondary Driver*)

Pada kondisi angin lemah atau hampir tidak ada (umumnya terjadi pada siang hari di iklim tropis), *Solar Chimney* mengambil peran sebagai pendorong aliran melalui *stack effect*. Udara di dalam saluran yang terpapar panas matahari menjadi lebih ringan, bergerak naik, dan menciptakan efek hisap yang menarik udara dari ruang melalui bukaan yang terhubung. Prima, mengutip Kalantar dan Hughes, menekankan bahwa peran ini memastikan ventilasi tetap berlangsung meskipun tidak ada pasokan angin dari luar, sehingga kinerja sistem tidak sepenuhnya bergantung pada kondisi atmosfer.

3) Peningkatan Ventilasi Silang (*Cross-Flow Ventilation*)

Integrasi *Windcatcher* dan *Solar Chimney* mampu membentuk lintasan aliran udara yang lengkap dan terarah: udara segar masuk melalui *Windcatcher*, melewati zona hunian, kemudian keluar melalui *Solar Chimney*. Beberapa studi yang dikompilasi oleh Prima menunjukkan bahwa kombinasi ini dapat meningkatkan

cross-flow ventilation dan menyediakan pasokan udara alami bahkan pada hari yang panas tanpa kehadiran angin yang signifikan.

e. Rekomendasi desain awal untuk penelitian di iklim tropis

Berdasarkan sintesis Prima and Sugini (2019) serta beberapa studi pendukung dari Malaysia dan Thailand, terdapat sejumlah rekomendasi awal yang dapat dijadikan acuan dalam merancang sistem hibrida *Windcatcher-Solar Chimney* pada wilayah beriklim tropis lembap.

1) Penempatan dan Orientasi

a) *Windcatcher* sebaiknya ditempatkan pada bagian atap yang paling tinggi dan terbebas dari hambatan seperti bangunan tetangga atau elemen struktural lain. Arah bukaan perlu menyesuaikan arah angin dominan tahunan agar potensi aliran udara dapat dimanfaatkan secara maksimal.

b) *Solar Chimney* idealnya dipasang pada fasad yang paling banyak menerima radiasi matahari, yang pada umumnya mengarah ke barat-barat laut untuk sebagian besar kota di Indonesia. Alternatif lainnya adalah menjadikannya bagian dari atap miring dengan sudut kemiringan sekitar 45-60° untuk memaksimalkan penyerapan panas.

2) Rasio Bukaan *Windcatcher-Solar Chimney*

a) Merujuk pada literatur mengenai *Solar Chimney*, luas *Inlet* dan *Outlet* disarankan memiliki ukuran yang sebanding. Dalam beberapa kasus, *Outlet* yang sedikit lebih besar dapat membantu menurunkan kerugian tekanan dan meningkatkan debit aliran.

- b) Untuk tahap awal desain, luas *Inlet Windcatcher* dapat disetarakan dengan luas *Outlet Solar Chimney*. Rasio 1 hingga 2 dianjurkan untuk diuji lebih lanjut melalui simulasi CFD guna menentukan konfigurasi yang paling efektif sesuai konteks lokasi penelitian.

3) Kontrol Kelembapan dan Aspek Kesehatan

- a) Mengingat karakter iklim tropis yang memiliki kelembapan tinggi serta potensi penyakit berbasis vektor, *Windcatcher* perlu dilengkapi dengan *insect screen*, *louver*, dan opsi penutup (*damper*) sebagai bagian integral sistem.
- b) Pada *Solar Chimney*, pemilihan material dinding dalam *cavity* yang mudah dibersihkan, tidak menyerap air, dan tidak memicu pertumbuhan jamur sangat penting untuk menjaga kualitas udara dalam ruangan.

4) Peran Simulasi dan Pengukuran

Prima menegaskan bahwa parameter geometrik yang diperoleh dari literatur tidak seharusnya diadopsi secara langsung tanpa penyesuaian. Nilai-nilai tersebut perlu diperlakukan sebagai titik awal yang kemudian disempurnakan melalui simulasi, misalnya menggunakan CFD, serta divalidasi melalui pengukuran lapangan sesuai konteks iklim masing-masing kota.

2.5 Simulasi CFD untuk Evaluasi Kinerja *Windcatcher*

1. Prinsip Dasar CFD dalam *Windcatcher*

Computational Fluid Dynamics (CFD) bekerja dengan menyelesaikan persamaan Navier-Stokes untuk memodelkan perilaku fluida (udara) di dalam domain yang merepresentasikan bentuk geometris *Windcatcher*. Dalam konteks ventilasi alami, simulasi ini berfokus pada dua mekanisme utama, yaitu *wind-driven flow* dan *buoyancy-driven flow*, yang merupakan hasil dari perbedaan tekanan dan suhu antara udara luar dan dalam ruang. Proses pemodelan meliputi tahap pembuatan geometri, meshing, penentuan boundary condition, pemilihan model turbulensi, serta analisis hasil berupa kontur kecepatan, tekanan, dan temperatur.

2. Pemilihan Model Turbulensi

Sebagian besar penelitian menggunakan pendekatan Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) karena dianggap paling seimbang antara akurasi dan efisiensi komputasi. Model standard k- ϵ , RNG k- ϵ , dan realizable k- ϵ merupakan yang paling umum digunakan untuk simulasi ventilasi *Windcatcher*.

Montazeri and Montazeri, (2018) menunjukkan bahwa model realizable k- ϵ memberikan hasil terbaik untuk mensimulasikan ventilasi silang (cross ventilation) dibandingkan model lainnya. Sementara *Large Eddy Simulation* (LES) menawarkan presisi lebih tinggi dalam menangkap fenomena pusaran (vortex) dan dinamika aliran transien, metode ini memerlukan sumber daya komputasi yang jauh lebih besar.

Penelitian lain oleh Balabel, Faizan and Alzaed, (2021) juga membandingkan model SST k- ω dan standard k- ω , dan menemukan bahwa model second-order k- ϵ

memberikan hasil yang paling mendekati data eksperimental, terutama dalam estimasi distribusi kecepatan dan tekanan di saluran *Windcatcher*.

3. Validasi dan Kalibrasi Model

Validasi merupakan tahap penting untuk memastikan reliabilitas hasil simulasi. Beberapa studi, seperti oleh Li and Mak, (2007), membandingkan hasil simulasi dengan data eksperimen dari model skala di terowongan angin (wind tunnel). Parameter yang divalidasi meliputi profil kecepatan udara, Air Change per Hour (ACH), dan efisiensi pendinginan pasif. Korelasi tinggi antara data numerikal dan eksperimental memperkuat keandalan penggunaan CFD dalam memprediksi performa sistem ventilasi alami.

4. Parameter Analisis Kinerja *Windcatcher*

CFD memungkinkan evaluasi mendalam terhadap parameter yang memengaruhi efektivitas ventilasi alami, di antaranya:

- a. Kecepatan dan arah angin eksternal
- b. Rasio bukaan *Inlet-Outlet*
- c. Sudut kemiringan dan konfigurasi partisi internal
- d. Efek tambahan seperti heat transfer dan solar radiation

Nouh Ma'bdeh *et al.*, (2023) menekankan pentingnya memasukkan faktor Indoor Air Quality (IAQ) dan adaptive thermal comfort dalam model CFD. Dengan mengombinasikan hasil kecepatan aliran udara dan temperatur, simulasi mampu memastikan kondisi kenyamanan termal bahkan pada kecepatan angin rendah (2,5-4 m/s), sesuai rekomendasi CIBSE Guide A.

5. Pemanfaatan CFD untuk Perancangan Arsitektur

Dalam konteks desain arsitektur, hasil simulasi CFD memberikan dasar kuantitatif bagi pengambilan keputusan desain. Analisis kontur tekanan dan kecepatan udara digunakan untuk menentukan orientasi optimal *Windcatcher*, tinggi bukaan, serta rasio luas saluran udara. Selain itu, simulasi membantu mengidentifikasi zona stagnan, bagian ruang yang tidak tersuplai udara segar dan memperkirakan nilai ACH (Air Change Rate) untuk memastikan ventilasi alami bekerja sesuai target kenyamanan dan efisiensi energi.

6. Penggunaan Software Autodesk CFD Sebagai Alat Simulasi

Autodesk CFD merupakan perangkat lunak simulasi komputasional yang banyak digunakan dalam bidang arsitektur dan rekayasa bangunan untuk menganalisis aliran udara, distribusi panas, serta kinerja sistem ventilasi alami seperti *Windcatcher*. Dengan kemampuan integrasi terhadap model BIM (Building Information Modeling) dari Autodesk Revit, perangkat lunak ini memungkinkan analisis yang komprehensif dan visualisasi hasil yang detail, sehingga mendukung proses pengambilan keputusan desain berbasis data dan performa nyata.

a. Integrasi Model BIM dan Persiapan Simulasi

Tahapan awal simulasi dimulai dengan pembuatan model tiga dimensi bangunan beserta sistem *Windcatcher* menggunakan Autodesk Revit. Model tersebut kemudian diekspor ke Autodesk CFD dalam format SAT untuk menjaga detail geometris, skala, serta orientasi bangunan. Integrasi ini memungkinkan peneliti mengatur parameter lingkungan secara presisi, seperti arah dan kecepatan

angin, tekanan atmosfer, temperatur udara luar, serta kondisi termal permukaan bangunan. Dengan demikian, simulasi dapat merepresentasikan kondisi riil lapangan secara akurat (Rateb, 2025).

b. Proses *Meshing* dan Penentuan Kondisi Batas

Pada tahap *pre-processing*, Autodesk CFD menyediakan fitur auto size meshing yang secara otomatis menyesuaikan ukuran elemen mesh berdasarkan kompleksitas geometri dan gradien aliran. Ukuran mesh yang lebih rapat diterapkan pada area dengan perubahan kecepatan dan tekanan tinggi, seperti di sekitar *Inlet*, *Outlet*, dan partisi internal *Windcatcher*, untuk meningkatkan ketelitian hasil. Penentuan boundary condition mencakup parameter utama seperti:

- 1) Kecepatan dan arah angin eksternal (*velocity Inlet*)
- 2) Tekanan pada *Outlet* (*pressure Outlet*)
- 3) Suhu udara dan kondisi termal permukaan (*wall temperature*)

Kombinasi parameter tersebut menjadi dasar perhitungan numerik yang menggambarkan perilaku aliran udara dalam domain simulasi (Ibrahim and Abdelhady, 2023).

c. Pengaturan dan Iterasi Simulasi

Setelah domain dan kondisi batas ditetapkan, proses simulasi dijalankan melalui sejumlah iterasi (biasanya 100-200 kali) hingga hasil konvergen atau mencapai stabilitas nilai residual. Autodesk CFD memungkinkan analisis pada berbagai bidang pengukuran (horizontal dan vertikal) untuk mengevaluasi parameter seperti Indoor Air Quality (IAQ), kecepatan udara, dan distribusi suhu.

Fitur visualisasi tiga dimensi memungkinkan pengguna memantau perkembangan hasil selama iterasi, memeriksa kestabilan aliran, dan melakukan perbandingan antar skenario desain secara langsung (Rateb, 2025).

d. Analisis Hasil dan Visualisasi

Hasil simulasi divisualisasikan dalam bentuk kontur warna, vektor aliran, dan iso-surface, yang menunjukkan distribusi kecepatan, tekanan, serta suhu di seluruh domain ruang. Analisis ini memudahkan identifikasi:

- 1) Zona stagnan (area dengan kecepatan udara rendah),
- 2) Area ventilasi efektif, dan
- 3) Gradien temperatur vertikal (antara posisi kepala dan kaki penghuni), yang berpengaruh langsung terhadap kenyamanan termal.

Melalui hasil visual ini, perancang dapat melakukan penyesuaian geometri *Windcatcher* secara iteratif, misalnya pada ukuran bukaan, orientasi saluran, atau kemiringan partisi hingga diperoleh konfigurasi desain paling efisien dalam meningkatkan ventilasi alami dan mengurangi kebutuhan energi pendinginan.

e. Penelitian Sebelumnya yang Menggunakan Autodesk CFD

Autodesk CFD telah banyak digunakan dalam berbagai studi ilmiah terkini yang terindeks Scopus untuk menganalisis performa ventilasi alami, kenyamanan termal, serta dampak desain bangunan terhadap lingkungan mikro. Hasil dari beragam penelitian tersebut menunjukkan bahwa Autodesk CFD tetap menjadi alat simulasi yang relevan, akurat, dan efisien untuk studi berbasis performa bangunan, khususnya dalam konteks iklim tropis, lingkungan urban padat, serta fasilitas ibadah.

1) Studi Ventilasi Alami dan Kesehatan Bangunan

Waheeb and Hemeida, (2022) menggunakan Autodesk CFD untuk mengevaluasi strategi ventilasi alami pada dua tipe bangunan multi-lantai di Aswan, Mesir, dalam konteks pandemi COVID-19. Simulasi ini memvisualisasikan pola pergerakan udara, distribusi kecepatan, dan interaksi aliran dengan geometri bangunan.

2) Simulasi Infrastruktur Hijau Perkotaan dan Kenyamanan Pejalan Kaki

Dalam penelitian L Pardo-del Viejo and Fernández-Rodríguez, (2024), Autodesk CFD digunakan untuk mensimulasikan pengaruh vegetasi urban terhadap distribusi kecepatan angin dan kenyamanan pedestrian di lingkungan kampus universitas di Spanyol.

3) Evaluasi Strategi Ventilasi Pasif pada Bangunan Ibadah

Azmi *et al.*, (2023) memanfaatkan Autodesk CFD untuk mengevaluasi efektivitas strategi ventilasi alami pada masjid di iklim panas-lembap. Beragam alternatif konfigurasi fasad, termasuk variasi desain dinding Qiblah dan rasio bukaan jendela, diuji dalam skenario arah angin berbeda.

Berdasarkan telaah terhadap berbagai penelitian terkini, dapat disimpulkan bahwa Autodesk CFD memiliki tingkat relevansi dan keandalan tinggi dalam analisis ventilasi alami dan performa bangunan berkelanjutan.

Temuan dari ketiga studi menunjukkan bahwa Autodesk CFD:

- 1) Mampu memodelkan ventilasi alami dan distribusi udara secara detail pada berbagai tipologi bangunan mulai dari bangunan multi-lantai, area urban

terbuka, hingga fasilitas ibadah dengan tingkat akurasi yang memadai untuk keperluan penelitian maupun desain arsitektur berbasis performa.

- 2) Mendukung integrasi dengan model BIM (Building Information Modeling) serta data spasial seperti LiDAR, yang memungkinkan analisis menyeluruh dari skala mikro (ruangan) hingga makro (lingkungan tapak dan kota).
- 3) Efektif untuk mengevaluasi strategi desain pasif dan kenyamanan termal, khususnya di wilayah tropis dan urban padat, dengan kemampuan visualisasi hasil berupa kontur kecepatan udara, distribusi suhu, serta identifikasi zona stagnan yang sulit dicapai secara eksperimental.
- 4) Masih digunakan secara aktif dalam publikasi ilmiah terindeks Scopus hingga tahun 2024, menunjukkan keberlanjutan pemakaiannya dalam penelitian akademik dan profesional di bidang arsitektur, teknik bangunan, serta lingkungan binaan.

Dengan demikian, Autodesk CFD tetap layak dan sangat relevan digunakan sebagai alat analisis dalam penelitian ini, khususnya untuk:

- 1) mempelajari performa ventilasi alami pada konfigurasi *Windcatcher* dan bukaan bangunan,
- 2) mengevaluasi kenyamanan termal ruang ibadah tropis, serta
- 3) mendukung optimalisasi desain arsitektur berkelanjutan melalui pendekatan simulasi berbasis data.

Secara keseluruhan, kajian pustaka ini menunjukkan bahwa ventilasi alami pada bangunan bertingkat dipengaruhi oleh interaksi kompleks antara tekanan angin, geometri bangunan, perbedaan temperatur, serta konfigurasi sistem *inlet-outlet*. *Windcatcher* terbukti efektif sebagai pengarah aliran angin masuk, sementara *Solar Chimney* memberikan kontribusi signifikan melalui mekanisme gaya apung yang memperkuat pergerakan udara vertikal. Untuk mensimulasikan perilaku aliran tersebut secara akurat, *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dengan model turbulensi RANS dan pendekatan *non-isothermal* menjadi metode yang paling relevan. Teori-teori inti mengenai ventilasi alami, *Windcatcher*, *Solar Chimney*, dan parameter CFD ini menjadi dasar analitis dalam bab selanjutnya untuk mengevaluasi performa kombinasi ventilasi pasif pada bangunan 10 lantai tanpa *void*.