

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Efisiensi Energi

Efisiensi energi adalah upaya penting untuk menghemat konsumsi energi. Di Indonesia, efisiensi energi tidak hanya menjadi solusi untuk mengurangi emisi gas rumah kaca, tetapi juga strategi ekonomi untuk menurunkan ketergantungan pada impor energi fosil.

2.1.1 Pengertian Efisiensi Energi

Efisiensi energi pada bangunan merupakan prinsip dasar dalam konsep bangunan hijau yang diinisiasi oleh Green Building Council Indonesia (GBCI). Efisiensi energi ini mengacu pada optimasi konsumsi energi bangunan untuk mencapai pembangunan berkelanjutan, dengan tujuan mengurangi penggunaan energi sekaligus mempertahankan atau meningkatkan kualitas lingkungan dalam ruangan (Yi & Bing, 2017). Efisiensi Energi Bangunan sangat penting dalam upaya mengurangi perubahan iklim, menurunkan emisi gas rumah kaca, serta mengurangi biaya energi (Pascual et al., 2020). Seiring dengan pertumbuhan populasi dan urbanisasi yang pesat, tekanan terhadap sumber daya energi semakin meningkat, sehingga strategi perencanaan yang berbasis efisiensi energi menjadi krusial untuk mendukung pembangunan berkelanjutan (GBCI, 2021).

2.1.2 Urgensi Efisiensi Energi

Kondisi di Indonesia menunjukkan tren yang lebih mengkhawatirkan, di mana pertumbuhan pesat gedung perkantoran dan pusat perbelanjaan tidak diimbangi dengan penerapan prinsip-prinsip efisiensi energi. Berdasarkan data Kementerian ESDM (2023), tanpa adanya intervensi yang signifikan, konsumsi energi pada sektor bangunan diproyeksikan akan meningkat hingga 150% pada tahun 2030. Fenomena ini terlihat nyata di Jakarta, di mana bangunan-bangunan tinggi diketahui menghabiskan sekitar 60% dari total konsumsi listriknya hanya untuk sistem pendingin udara (IESR, 2023). Menyikapi hal ini, berbagai standar bangunan hijau seperti EDGE dan GBI telah

dikembangkan untuk mendorong terciptanya bangunan efisiensi energi yang berkelanjutan.

2.1.3 Sektor yang Berperan

Di Indonesia, tiga sektor utama yang berkontribusi signifikan terhadap konsumsi energi di sektor bangunan adalah gedung perkantoran, pusat perbelanjaan (mal), dan hotel. Berdasarkan data Kementerian ESDM (2023), ketiga sektor ini menyumbang 65% dari total konsumsi energi di bangunan komersial. Gedung perkantoran di Jakarta, misalnya, tercatat mengonsumsi energi rata-rata 240 kWh/m²/tahun, sementara pusat perbelanjaan besar di Surabaya mencapai 300 kWh/m²/tahun akibat penggunaan intensif sistem pencahayaan, eskalator, dan pendingin udara (Panjaitan & Abduh, tahun). Sektor hotel juga tidak kalah tinggi, dengan konsumsi energi mencapai 180 kWh/m²/tahun karena operasional 24 jam dan fasilitas pendukung seperti kolam renang berpemanas (IESR, 2023).

Perbedaan pola konsumsi ini dipengaruhi oleh karakteristik aktivitas masing-masing sektor. Pada gedung perkantoran, 45% energi dialokasikan untuk pendingin udara, 30% untuk pencahayaan, dan 25% untuk peralatan elektronik. Sementara di mal, dominasi energi justru terjadi pada pencahayaan dekoratif (40%) dan sistem ventilasi (35%). Di sisi lain, hotel menghadapi tantangan unik berupa kebutuhan energi konstan untuk pemanas air, laundry, dan restoran (Kementerian ESDM, 2023). Data ini menunjukkan bahwa upaya efisiensi energi harus disesuaikan dengan profil konsumsi masing-masing sektor, misalnya dengan fokus pada pengurangan beban AC di perkantoran atau optimasi pencahayaan di mal.

2.1.4 Aturan dan Implementasi

Pemerintah Indonesia telah merilis beberapa kebijakan strategis untuk mendorong efisiensi di sektor komersial. Green Building Council Indonesia (GBCI) mengeluarkan standar bangunan hijau yang mencakup kriteria penggunaan material insulasi termal dan sistem pencahayaan alami. Sementara itu, Permen PUPR No. 21 Tahun 2021 mewajibkan pengelola gedung komersial untuk mematuhi rasio bukaan

jendela optimal (30-40%) dan penggunaan kaca dengan SHGC rendah (<0.4). Implementasi kebijakan ini telah menunjukkan hasil nyata: program retrofitting AC hemat energi di Jakarta berhasil menurunkan beban listrik sebesar 15%, dan instalasi panel surya di hotel-hotel Bali mengurangi ketergantungan pada energi fosil hingga 40% (Kementerian ESDM, 2023). Namun, tantangan seperti rendahnya partisipasi swasta dan terbatasnya anggaran masih menghambat pencapaian target nasional

2.1.5 Standarisasi Efisiensi Energi

Standar efisiensi energi di Indonesia diatur melalui SNI 03-6197-2000 tentang Konservasi Energi pada Bangunan Gedung, yang merekomendasikan penggunaan material insulasi termal, optimalisasi pencahayaan alami, dan sistem HVAC hemat energi. Selain itu, Permen ESDM No. 13/2012 tentang Bangunan Gedung Hemat Energi menjadi acuan teknis bagi perancang dan pengembang. Di Indonesia, perkembangan standarisasi mengikuti tren global yang diinisiasi oleh ISO 50001 tentang Sistem Manajemen Energi, namun disesuaikan dengan kondisi iklim tropis. Penelitian oleh Karyono (2015) menunjukkan bahwa bangunan di wilayah tropis lembab memerlukan standar khusus yang memperhatikan:

- 1) Nilai SHGC (Solar Heat Gain Coefficient) rendah (<0.4) untuk kaca
- 2) Nilai R-value insulasi termal minimal $1.5 \text{ m}^2\text{K/W}$
- 3) Rasio luas bukaan terhadap dinding (WWR/Wall Window Ratio) optimal 30-40%

Standar-standar tersebut tidak hanya mengatur penggunaan perangkat hemat energi seperti AC atau lampu, tetapi juga mendorong para arsitek untuk kembali mengedepankan prinsip desain pasif yang memanfaatkan potensi iklim lokal secara optimal.

2.2 Desain Pasif

Tingginya konsumsi energi di sektor bangunan, terutama di negara tropis seperti Indonesia, tidak hanya memerlukan solusi teknologi, tetapi juga pendekatan yang memanfaatkan potensi alam. Desain pasif menjadi jawaban dengan mengoptimalkan

elemen alami seperti angin dan cahaya matahari. Dengan menyesuaikan orientasi bangunan dan mengatur bukaan, pendekatan ini tidak hanya mengurangi ketergantungan pada energi listrik, tetapi juga sejalan dengan target efisiensi energi dalam standar SNI dan GBCI.

2.2.1 Pengertian Desain Pasif

Desain pasif adalah pendekatan arsitektur yang memanfaatkan elemen alam (matahari, angin, vegetasi) untuk menciptakan kenyamanan termal dan visual tanpa bergantung pada sistem mekanis. Konsep ini mencakup optimalisasi orientasi bangunan, ventilasi silang, insulasi termal, dan pemanfaatan material lokal (Al Nahlawi et al., 2022).

2.2.2 Prinsip Desain Pasif

Tiga prinsip utama desain pasif menurut Anisa (2022) dan Sujatini dkk (2023):

- 1) Orientasi Bangunan: Penyesuaian terhadap lintasan matahari untuk meminimalkan panas berlebih.
- 2) Optimalisasi Bukaan: Pengaturan jendela dan ventilasi untuk pencahayaan alami dan sirkulasi udara.
- 3) Elemen Bangunan Responsif: Penggunaan insulasi termal, atap hijau, dan shading device untuk mengontrol pertukaran panas.

2.2.3 Desain Pasif untuk Penghawaan Alami

Berdasarkan SNI 03-6572-2001, ventilasi alami dipengaruhi oleh perbedaan tekanan udara dan suhu. Ventilasi silang (cross ventilation) dapat dicapai dengan menempatkan inlet (depan) dan outlet (belakang) secara diagonal untuk aliran udara optimal (Rusyda et al., 2018). Faktor kecepatan angin, kelembaban, dan dimensi bukaan juga menentukan efektivitasnya (Khairunnisa et al., 2014). Contohnya, rasio bukaan ventilasi minimal 5% dari luas lantai direkomendasikan untuk ruang kantor (SNI 03-6572-2001).

2.2.4 Desain Pasif untuk Pencahayaan Alami

Pencahayaan alami bertujuan mencapai tingkat iluminasi 300-500 lux untuk aktivitas kantor (SNI 03-6197-2000). Strateginya meliputi penggunaan light shelf, jendela tinggi (clerestory), dan reflektor untuk mendistribusikan cahaya merata (Sari, 2017). Strategi pencahayaan alami yang efektif dapat mengurangi konsumsi energi untuk pencahayaan hingga 50% (Htet et al., 2023)

2.3 Standar Penghawaan dan Pencahayaan pada Bangunan Kantor

Prinsip desain pasif yang mengandalkan ventilasi alami dan pencahayaan alami tidak akan efektif tanpa panduan teknis yang jelas. Standar penghawaan dan pencahayaan berperan sebagai penjemabatan antara teori arsitektur hijau dengan implementasi nyata. Standar seperti SNI 03-6572-2001 (ventilasi) dan SNI 03-6197-2000 (pencahayaan) tidak sekadar memberi batasan angka—misalnya kecepatan udara 0,15–0,5 m/detik atau intensitas cahaya 300–500 lux—tetapi juga menjadi alat ukur untuk memastikan bahwa desain pasif benar-benar menciptakan ruang kerja yang nyaman sekaligus hemat energi. Dengan standar ini, arsitek dapat menghindari kesalahan umum seperti bukaan jendela yang terlalu kecil yang menyebabkan pengap atau pencahayaan berlebihan yang menyebabkan silau.

2.3.1 Standar Penghawaan

Standar penghawaan alami di Indonesia diatur melalui:

- 1) SNI 03-6572-2001 (Tata Cara Perancangan Sistem Ventilasi dan Pengkondisian Udara pada Bangunan Gedung):
 - a) Bukaan ventilasi minimal 5% dari luas lantai ruangan (Pasal 4.2.1).
 - b) Kecepatan udara ideal di ruang kantor: 0,15–0,5 m/detik untuk kenyamanan termal (Lampiran B).
 - c) Ventilasi silang (cross ventilation) direkomendasikan dengan penempatan inlet (depan) dan outlet (belakang) secara diagonal.
- 2) Permenaker No. 5/2018 (K3 Lingkungan Kerja):

- a) Kecepatan udara di ruang kerja tidak boleh melebihi 1,5 m/detik untuk menghindari *draft effect*.

2.3.2 Standar Pencahayaan

Standar pencahayaan Indonesia diatur melalui:

- 1) SNI 03-6197-2000 (Konservasi Energi pada Bangunan Gedung):
 - a) 300–500 lux untuk area kerja umum (meja, ruang rapat).
 - b) 750 lux untuk area tugas visual detail (desain, drafting).
 - c) Rasio luas bukaan jendela terhadap lantai (DF/Daylight Factor) minimal 2% (Pasal 6.2).
- 2) SNI 16-7062-2004 (Pencahayaan Tempat Kerja):
 - a) Distribusi pencahayaan harus merata dengan Uniformity Ratio (rasio iluminasi minimum/maksimum) $\geq 0,6$.
 - b) Indeks pengurangan silau (Unified Glare Rating/UGR) maksimal 19 untuk ruang kantor.

2.4. Shading Device

Meski prinsip desain pasif telah terbukti efektif, implementasinya di iklim tropis sering terkendala radiasi matahari intensif dan kelembapan tinggi. Di sinilah *secondary skin* hadir sebagai solusi adaptif tidak hanya melindungi bangunan dari panas, tetapi juga menjadi elemen desain yang mengaktualisasikan prinsip pasif secara modern, seperti terlihat pada *kinetic façade* atau *vertical greenery*.

2.4.1. Pengertian Shading Device

Secondary skin (kulit sekunder) adalah lapisan tambahan pada fasad bangunan yang berfungsi sebagai sistem adaptif antara lingkungan eksterior dan interior. Konsep ini tidak hanya bersifat estetis, tetapi juga merupakan respons desain terhadap tantangan energi, iklim, dan kenyamanan penghuni. Secara struktural, *secondary skin* terletak di luar lapisan fasad utama (*primary façade*) dan bertindak sebagai:

- 1) Buffer Termal: Menyerap, memantulkan, atau meredam panas matahari sebelum mencapai ruang interior.
- 2) Modulator Cahaya: Mengontrol intensitas dan distribusi pencahayaan alami untuk mengurangi ketergantungan pada pencahayaan buatan.
- 3) Filter Udara: Memfasilitasi sirkulasi udara alami sekaligus menyaring polutan atau partikel debu.
- 4) Ekspresi Arsitektur: Menjadi elemen identitas bangunan melalui bentuk, material, atau dinamika visual.

2.4.2. Sejarah dan Perkembangan

Konsep *shading device* telah mengalami evolusi yang menarik dalam dunia arsitektur. Pada awalnya, berbagai budaya mengembangkan solusi tradisional untuk melindungi bangunan dari elemen alam. Di Indonesia, rumah-rumah Jawa menggunakan *tebeng* (serambi terbuka) sebagai zona penyangga antara ruang dalam dan luar (Wijaya, 2018). Sementara itu, di Timur Tengah, *mashrabiya* (ukiran kayu geometris) telah digunakan sejak abad ke-12 untuk menyaring sinar matahari sekaligus memungkinkan sirkulasi udara (Al-Asad, 2003). Jepang memiliki *engawa* (koridor luar) yang berfungsi sebagai area transisi pada rumah tradisional (Inoue, 2010).

Perkembangan modern *secondary skin* mulai pesat setelah krisis energi tahun 1970-an. Pada periode 1980-2000, muncul generasi pertama *secondary skin* modern. Memasuki abad ke-21, perkembangan teknologi material membawa *secondary skin* ke level berikutnya. Periode 2000-2010 melihat integrasi panel surya dan sistem ventilasi canggih ke dalam desain fasad. Saat ini (2010-sekarang), material cerdas seperti ETFE (Ethylene Tetrafluoroethylene) dan sistem kinetik responsif semakin banyak digunakan, menciptakan bangunan yang mampu beradaptasi dengan perubahan lingkungan secara dinamis.

2.4.3. Penerapan di Berbagai Negara

Di Jerman, Gedung Reichstag di Berlin menjadi contoh sukses penerapan *secondary skin*. Bangunan ikonis ini menggunakan kubah kaca dengan sistem sirkulasi

udara terpadu yang tidak hanya menjadi elemen estetis, tetapi juga berfungsi efektif dalam mengatur suhu interior. Perangkat shading dapat secara signifikan mengurangi beban pendinginan dan meningkatkan kenyamanan termal di dalam bangunan. Sebagai contoh, sebuah studi di Polandia menunjukkan bahwa sistem shading bergerak dengan material perubahan fase mengurangi overheating ruangan sebesar 29,4% selama musim panas (Musiał & Licholai, 2021). Singapura, sebagai negara tropis yang padat, mengembangkan pendekatan unik melalui vertical greenery. PARKROYAL on Pickering merupakan contoh nyata dengan taman vertikal seluas 15.000 meter persegi yang menyelimuti fasad bangunan. Uni Emirat Arab menghadapi tantangan berbeda dengan iklim gurun yang ekstrem. Al Bahr Towers di Abu Dhabi merespons kondisi ini dengan kinetic façade yang terdiri dari 2.000 panel bergerak. Panel-panel ini secara otomatis menyesuaikan posisinya terhadap pergerakan matahari, mengurangi radiasi panas hingga 50% (Aedas, 2015).

Efektivitas shading device dalam mengurangi konsumsi energi telah menjadi fokus penting. Misalnya, standar bangunan baru di Jakarta mewajibkan shading device untuk memenuhi nilai perpindahan panas tertentu. Penelitian mengenai tirai tradisional Jepang Sudare yang diadaptasi untuk bangunan di Indonesia menunjukkan penurunan nilai perpindahan panas keseluruhan (OTTV) serta peningkatan kenyamanan visual (Hariyadi et al., 2017)

Berbagai contoh di atas menunjukkan bahwa secondary skin telah berkembang menjadi solusi arsitektural yang tidak hanya fungsional, tetapi juga mampu merespons karakteristik lokal setiap wilayah. Perkembangan ini sekaligus

membuktikan bahwa konsep secondary skin terus berevolusi untuk memenuhi tuntutan efisiensi energi dan keberlanjutan di era modern.



Gambar 2.1 PARKROYAL on Pickering Singapore
Sumber: Website Pan Pacific

2.4.4 Efektivitas *Shading Device*

Berbagai penelitian terkini membuktikan bahwa shading device memberikan dampak signifikan terhadap performa bangunan. Studi *shading device* oleh Nguyen et al. (2021) terhadap 50 bangunan ber-secondary skin di zona iklim tropis menunjukkan penurunan suhu interior rata-rata 3-4°C dan pengurangan konsumsi AC sebesar 25-30%. Di Indonesia, penerapan vertical greenery pada Gedung Djakarta Design Center berhasil mengurangi suhu permukaan dinding hingga 6°C (Wijayanti et al., 2022), sementara penggunaan brise-soleil dengan sudut 45° di perkantoran Bandung mampu menurunkan intensitas cahaya langsung dari 1.200 lux menjadi 500 lux yang ideal (Saputra et al., 2021). Data lapangan dari sertifikasi EDGE menunjukkan bahwa bangunan perkantoran di Surabaya dengan sistem secondary skin dapat menghemat energi hingga 28% (IFC, 2022).

2.5. Bukaan Ventilasi

Bukaan ventilasi bukan sekadar lubang pada dinding, tetapi elemen penting yang menghubungkan kebutuhan manusia, lingkungan, dan desain bangunan. Secara fungsi, ventilasi membantu memenuhi kebutuhan udara segar dan kenyamanan suhu melalui pertukaran udara dan pendinginan pasif. Dengan peran tersebut, ventilasi bukanlah elemen terpisah, melainkan bagian penting dari sistem bangunan yang mendukung prinsip keberlanjutan.

2.5.1. Pengertian dan Fungsi Bukaan Ventilasi

Ventilasi bukaan merujuk pada proses mengalirkan udara masuk dan keluar dari sebuah bangunan atau ruang tertutup melalui bukaan seperti jendela, pintu, atau bukaan khusus yang memang disediakan (*purpose-provided openings/PPOs*). Proses ini dapat dilakukan secara alami maupun mekanis, dengan tujuan utama menggantikan udara dalam ruangan yang pengap dengan udara segar dari luar. (Sharpe et al., 2021) Fungsi utamanya adalah menyediakan udara segar ke dalam ruangan serta membuang panas, kelembapan, dan polutan dari dalam bangunan. Bukaan ventilasi memainkan peran penting dalam pengendalian suhu, baik melalui proses pendinginan evaporatif maupun penghilangan panas *sensible*. Selain itu, bukaan ventilasi juga berkontribusi terhadap kualitas udara dalam ruang (IAQ), mendukung pencahayaan alami, serta memungkinkan koneksi visual dengan lingkungan luar.

2.5.2. Jenis dan Penempatan Bukaun Ventilasi

Posisi dan jenis bukaan sangat memengaruhi efektivitas ventilasi alami. Misalnya, ventilasi silang dengan bukaan yang saling berhadapan umumnya menghasilkan aliran udara yang lebih baik dibandingkan ventilasi satu sisi (Ma et al., 2017). Strategi penempatan ventilasi meliputi ventilasi silang (*cross ventilation*), yang memanfaatkan inlet dan outlet pada fasad berseberangan untuk menciptakan aliran udara linier; ventilasi satu sisi (*single-sided ventilation*), di mana seluruh bukaan terdapat pada satu sisi fasad; serta ventilasi bertingkat (*stack ventilation*), yang mengandalkan perbedaan ketinggian dan densitas udara untuk menghasilkan aliran

vertikal alami. Orientasi bangunan sangat memengaruhi efisiensi ventilasi alami, sehingga penempatan bukaan yang searah dengan arah angin dominan dapat mengoptimalkan kinerja ventilasi (Li et al., 2025). Selain itu, orientasi selatan terbukti sangat efektif dalam mengurangi konsumsi energi sekaligus meningkatkan kualitas udara dalam ruangan (Outgouga & Jamouli, 2022).

2.5.3. Strategi Desain Bukaan Ventilasi pada Bangunan Tropis

Desain bukaan pada iklim tropis lembab seperti di Surabaya berfokus pada maksimalisasi aliran udara alami sebagai strategi pendinginan pasif. Prinsip-prinsip utama yang diterapkan antara lain:

- 1) Rasio luas bukaan terhadap luas lantai minimal sebesar 5–20%, tergantung pada fungsi ruang (CIBSE, 2005).
- 2) Kombinasi sistem ventilasi silang (cross ventilation) dan ventilasi bertingkat (stack ventilation) untuk meningkatkan efektivitas sirkulasi udara.
- 3) Penggunaan bukaan terproteksi, seperti jalusi tetap atau ventilasi dengan insect screen, untuk memungkinkan ventilasi berkelanjutan tanpa terganggu oleh hujan atau serangga (Sutrisno, 2017).
- 4) Orientasi bukaan disesuaikan dengan arah angin dominan, seperti angin dari timur dan tenggara di wilayah Surabaya.

Selain itu, tata letak interior dengan konsep open plan dan plafon tinggi mendukung pergerakan udara secara optimal di dalam ruang. Penggunaan material pasif seperti light shelves juga berkontribusi dalam mengatur pencahayaan alami tanpa menambah beban panas secara signifikan

2.6. Simbiosis *Shading Device* dan Bukaan Ventilasi

Pada bangunan perkantoran di iklim tropis seperti Surabaya, desain fasad memiliki peran penting dalam menciptakan kenyamanan termal dan efisiensi energi. Dua strategi pasif yang umum diterapkan adalah penggunaan shading device untuk mengendalikan intensitas cahaya matahari dan bukaan ventilasi alami sebagai

pendukung sirkulasi udara. Meskipun sering dianggap sebagai elemen yang berdiri sendiri, keduanya sebenarnya dapat dirancang secara terpadu dan saling mendukung dalam menciptakan performa fasad yang optimal.

2.6.1. Shading Device dan Sistem Ventilasi Alami

Pada bangunan perkantoran di iklim tropis, integrasi antara shading device (pengendali radiasi matahari) dan bukaan ventilasi merupakan strategi pasif krusial. Kedua elemen ini harus dirancang secara sinergis, di mana shading device tidak hanya mengurangi beban panas matahari tetapi juga mendukung kinerja sistem ventilasi alami untuk mencapai kenyamanan termal dan efisiensi energi.

2.6.2. Desain Shading Device yang Mendukung Ventilasi

Strategi desain integratif meliputi penggunaan perforated screens atau brise-soleil dengan pola lubang yang dioptimalkan untuk penetrasi angin, penempatan shading device di atas bukaan untuk memicu efek cerobong (chimney effect), pemilihan material reflektif (seperti logam berlapis) untuk meminimalkan penyerapan panas permukaan, serta inovasi bentuk seperti angled louvers yang secara aktif membelokkan aliran udara ke dalam bangunan (Yunus et al., 2020). Pada bangunan tinggi, sistem double-skin façade dapat mengintegrasikan shading eksterior dengan rongga ventilasi untuk menciptakan zona penyangga termal (thermal buffer) (Poirazis, 2004).

2.6.3. Studi Kasus Integrasi Shading Device dan Ventilasi

Penelitian empiris menunjukkan bahwa integrasi shading dan ventilasi secara signifikan meningkatkan kinerja termal. Studi pada gedung perkantoran tropis membuktikan bahwa desain modular shading panels dengan celah vertikal mampu mengurangi suhu interior hingga 3°C sekaligus mempertahankan kecepatan udara yang memadai untuk kenyamanan (Wijaya & Santoso, 2019). Analisis komparatif antara tipe egg-crate shading dan vertical fins juga mengungkapkan perbedaan efektivitasnya dalam mendukung berbagai strategi ventilasi (Feriadi et al., 2018).

2.7. Simulasi dengan Software

Simulasi digital telah menjadi alat krusial untuk mengoptimalkan desain secondary skin secara akurat saat perancangan bangunan. Berbagai software seperti EnergyPlus (analisis termal), CFD (simulasi aliran udara), VELUX Daylight Visualizer (pencahayaan alami), dan Revit (pemodelan 3D terintegrasi) memungkinkan arsitek mengevaluasi performa fasad melalui pendekatan berbasis data. Tools ini membantu memprediksi penghematan energi, menganalisis distribusi cahaya, dan mengoptimalkan ventilasi alami, sekaligus meminimalkan kesalahan desain yang berpotensi menimbulkan biaya tinggi saat implementasi. Studi kasus di Jakarta menunjukkan akurasi prediksi simulasi mencapai 85-90% dibanding hasil aktual (Prasetyo et al., 2023), membuktikan efektivitasnya sebagai bagian dari proses desain arsitektur berkelanjutan.

2.7.1. Simulasi Pencahayaan Alami

Simulasi pencahayaan alami dan buatan menggunakan VELUX Daylight Visualizer dan DIALux menjadi tahap kritis dalam memastikan kepatuhan terhadap standar iluminasi (SNI 16-7062-2004) serta mencegah masalah silau (glare) atau overlighting. VELUX Daylight Visualizer mengadopsi algoritma ray-tracing untuk memodelkan distribusi cahaya matahari berdasarkan koordinat geografis, orientasi bangunan, dan properti material seperti nilai reflektansi dinding atau transmisi kaca.

Software ini menghasilkan metrik kunci seperti Daylight Factor (DF), Useful Daylight Illuminance (UDI), dan Annual Sunlight Exposure (ASE) yang menjadi acuan dalam mengevaluasi konsistensi pencahayaan alami sepanjang tahun. Sementara DIALux berfokus pada pencahayaan buatan dengan kemampuan untuk mengimpor data lumen dari ribuan produk lampu, menghitung lighting power density (LPD), dan menguji variasi tata letak armatur. Studi Sari (2020) di Yogyakarta menunjukkan bahwa kombinasi light shelf dengan sudut kemiringan 30° dan lampu LED 4000K dapat meningkatkan Daylight Factor dari 1,8% menjadi 3,5%, sekaligus menekan UGR dari 22 ke 17. Kolaborasi kedua software ini memungkinkan lighting designer untuk

merancang sistem hibrida yang memaksimalkan cahaya alami pada siang hari dan mengoptimalkan pencahayaan buatan di malam hari, dengan akurasi simulasi mencapai 85–90% dibandingkan pengukuran lapangan (Prasetyo et al., 2023).

2.7.2. Simulasi Aliran Udara

Simulasi penghawaan menggunakan software CFD (Computational Fluid Dynamics) seperti Autodesk Flow Design atau ANSYS Fluent memungkinkan analisis secara kuantitatif terhadap pola aliran udara, distribusi suhu, dan kelembapan relatif dalam ruangan. Proses ini dimulai dengan pemodelan 3D bangunan, input parameter iklim lokal (seperti kecepatan angin rata-rata, arah angin dominan, dan kelembapan), serta definisi zona bukaan (inlet dan outlet). Hasil simulasi menghasilkan visualisasi streamline udara, peta kontur kecepatan, dan perhitungan air change rate (ACH) untuk mengevaluasi efektivitas ventilasi alami atau mekanis.

Penelitian Pratama et al. (2021) pada gedung berlantai 8 di Surabaya menunjukkan bahwa penambahan wind catcher berbentuk corong pada fasad timur-barat meningkatkan kecepatan udara rata-rata dari 0,2 m/detik menjadi 0,5 m/detik, sekaligus mengurangi konsentrasi CO₂ sebesar 15%. Studi lain di Bandung oleh Wibowo et al. (2020) membuktikan bahwa simulasi CFD dapat mengoptimalkan rasio bukaan ventilasi silang (1:1.5) untuk mencapai pertukaran udara 12 ACH, memenuhi standar ASHRAE 62.1-2022. Dengan software CFD, arsitek dapat mengidentifikasi dead zone (area stagnan) dan merevisi desain bukaan sebelum konstruksi dimulai.

2.7.3. Simulasi Pembayangan

Simulasi pembayangan (shadow analysis) merupakan metode analisis pola bayangan bangunan terhadap lingkungannya sepanjang waktu, bertujuan meminimalkan paparan radiasi matahari berlebih sekaligus memaksimalkan pencahayaan alami dan kenyamanan termal. Di Indonesia yang beriklim tropis, simulasi ini menjadi krusial untuk mencegah overheating pada fasad barat dan timur—area yang paling terpapar radiasi matahari.

Revit, melalui fitur Solar Study, menjadi alat kunci dalam merealisasikan tujuan tersebut. Software ini memungkinkan analisis dinamika bayangan berbasis lokasi geografis spesifik dan lintasan matahari harian/tahunan. Arsitek dapat menguji berbagai skenario desain, seperti mengatur orientasi bangunan atau merancang shading device (brise-soleil, louvre, canopy), untuk menyeimbangkan antara naungan optimal dan pencahayaan alami. Contohnya, pada gedung perkantoran di Bandung, simulasi Revit menunjukkan bahwa brise-soleil horizontal dengan sudut 30° berhasil mengurangi radiasi matahari di fasad barat 40%, sambil mempertahankan daylight factor 2,8% sesuai SNI 03-6197-2000. Hasil ini tidak hanya mencegah panas berlebih tetapi juga menekan ketergantungan pada AC hingga 25%.

Implementasi Revit juga terbukti efektif di berbagai wilayah Indonesia. Di Bali, canopy berbahan ETFE yang dimodelkan di Revit menurunkan suhu teras hotel sebesar 4°C , menghemat energi pendinginan. Sementara di Surabaya, simulasi pola bayangan dari vertical greenery (taman vertikal) mengurangi suhu permukaan dinding 6°C pada siang hari. Keberhasilan ini diperkuat dengan integrasi prinsip desain pasif, seperti ventilasi silang dan pemilihan material reflektif, yang menjadikan bangunan hemat energi sekaligus nyaman.

Tantangan seperti ketidakakuratan data iklim lokal atau kompleksitas model 3D diatasi dengan mengimpor data cuaca historis dari BMKG (Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika) ke Revit, serta kolaborasi antar-disiplin dengan ahli energi. Dengan demikian, Revit tidak hanya menjadi alat visualisasi, tetapi juga platform strategis untuk merancang arsitektur berkelanjutan yang responsif terhadap karakteristik unik iklim tropis Indonesia.