



## SIMULASI DESAIN PASIF SEBAGAI TAHAP PRA-OTOMATISASI DALAM EVALUASI PERFORMA ENERGI BANGUNAN TROPIS DI INDONESIA

Jessica Fitriani Putri<sup>1\*</sup>, Andi Prasetyo Wibowo<sup>2</sup>

Program Magister Arsitektur, Fakultas Teknik, Universitas Atma Jaya Yogyakarta<sup>1,2</sup>

E-mail: [jessica.putri@gmail.com](mailto:jessica.putri@gmail.com)<sup>1</sup>, [andi.prasetyo@uajy.ac.id](mailto:andi.prasetyo@uajy.ac.id)<sup>2</sup>

### Abstract

*Building energy efficiency is a critical concern in developing sustainable architecture in humid tropical regions such as Indonesia. In practice, building automation systems are commonly applied during the operational stage, while optimisation through passive design at the early design stage remains underutilised, resulting in automation systems operating within inherently inefficient buildings. This study examines the role of early-stage energy simulation as a pre-automation process to evaluate tropical building performance. Simulations were conducted using Sefaira to assess the effects of passive design parameters—including building orientation, Window-to-Wall Ratio (WWR), shading configuration, envelope U-value, glazing characteristics, and internal loads—on energy consumption. The model used a small building of approximately 50 m<sup>2</sup> with Jakarta climate data representing an urban tropical environment. A one-variable-at-a-time approach was applied to identify parameter combinations that minimise energy use. The results define a performance envelope representing the achievable range of energy efficiency, which can inform the operational limits of building automation systems. These findings demonstrate that early passive design simulation functions not only as an evaluation tool but also as a methodological foundation for integrating energy efficiency with advanced building technologies.*

**Keyword:** *Passive design; Energy simulation; Building automation; Tropical buildings; Energy efficiency*

### Abstrak

Efisiensi energi bangunan merupakan isu krusial dalam pengembangan arsitektur berkelanjutan di wilayah tropis lembap seperti Indonesia. Pada praktiknya, sistem otomatisasi bangunan sering diterapkan pada tahap operasional, sementara optimalisasi desain pasif pada tahap perancangan awal belum dimanfaatkan secara maksimal. Akibatnya, sistem otomatisasi kerap bekerja pada bangunan yang sejak awal memiliki performa energi kurang efisien. Penelitian ini menganalisis peran simulasi energi tahap awal sebagai proses pra-otomatisasi dalam evaluasi performa energi bangunan tropis. Simulasi dilakukan menggunakan Sefaira untuk menguji pengaruh beberapa parameter desain pasif terhadap konsumsi energi, meliputi orientasi bangunan, *Window-to-Wall Ratio (WWR)*, konfigurasi peneduhan, nilai *U-Value* selubung bangunan, karakteristik kaca, serta beban internal. Objek simulasi berupa bangunan kecil seluas ±50 m<sup>2</sup> dengan data iklim Jakarta sebagai representasi iklim tropis perkotaan. Simulasi dilakukan secara bertahap dengan pendekatan satu variabel berubah pada satu waktu. Hasil simulasi digunakan untuk mengidentifikasi kombinasi parameter yang menghasilkan konsumsi energi minimum. Dalam kerangka penelitian ini, hasil simulasi diposisikan sebagai *performance envelope*, yaitu rentang performa energi yang menjadi dasar penentuan pagu operasional sistem otomatisasi. Dengan demikian, simulasi desain pasif tidak hanya berfungsi sebagai alat evaluasi tahap awal, tetapi juga sebagai fondasi metodologis bagi pengembangan bangunan berteknologi lanjut yang efisien energi.

**Kata Kunci:** Desain pasif; Simulasi energi; Otomatisasi bangunan; Bangunan tropis; Efisiensi energi

### Info Artikel :

Diterima: 2026-01-05

Revisi: 2026-03-05

Disetujui: 2026-03-06

## PENDAHULUAN

### 1. Latar Belakang

Bangunan di wilayah tropis lembap seperti Indonesia memerlukan pendinginan aktif hampir sepanjang tahun akibat temperatur tinggi, kelembapan besar, dan radiasi matahari yang intens. Kondisi ini menjadikan beban pendinginan sebagai komponen terbesar konsumsi energi bangunan, sehingga efisiensi energi menjadi isu penting dalam mendukung pembangunan berkelanjutan.

Perkembangan teknologi menghadirkan sistem otomatisasi bangunan yang mampu mengatur pencahayaan, ventilasi, dan pendinginan secara adaptif. Namun, sistem ini sering diterapkan pada bangunan yang belum dioptimalkan secara pasif, sehingga lebih berfungsi mengoreksi kelemahan desain dibanding mempertahankan efisiensi energi. Padahal, desain pasif—meliputi orientasi, proporsi bukaan, shading, dan material selubung bangunan—berperan besar dalam menekan panas yang masuk ke ruang dalam. Simulasi energi pada tahap awal desain memungkinkan evaluasi kuantitatif terhadap kinerja desain pasif sebelum bangunan direalisasikan. Dalam konteks bangunan cerdas, simulasi ini dapat diposisikan sebagai tahap pra-otomatisasi, yaitu proses penetapan batas performa energi yang menjadi dasar bagi sistem kontrol otomatis yang lebih efektif dan efisien.

### 2. Rumusan Masalah

Penelitian ini berangkat dari pertanyaan mengenai sejauh mana parameter desain pasif pada tahap awal memengaruhi performa energi bangunan tropis kecil berdasarkan simulasi Sefaira, parameter mana yang paling signifikan dalam menurunkan konsumsi energi hingga mencapai kategori beban minimum, serta bagaimana hasil simulasi tersebut dapat digunakan sebagai dasar konseptual dalam perancangan sistem otomatisasi bangunan berbasis performa energi.

### 3. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi parameter desain pasif terhadap konsumsi energi bangunan tropis kecil, mengidentifikasi parameter yang paling berkontribusi terhadap pencapaian performa energi minimum, serta menyusun kerangka konseptual yang mengaitkan hasil simulasi tahap awal dengan pengembangan sistem otomatisasi bangunan.

### 4. Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian dibatasi pada bangunan kecil dengan satu massa bangunan dan geometri sederhana. Analisis difokuskan pada parameter desain pasif tahap awal, yaitu orientasi bangunan, Window-to-Wall Ratio, shading, nilai **U-Value** material, karakteristik kaca, dan beban internal, dengan parameter mekanikal-elektrikal mengacu pada standar umum sebagai baseline simulasi. Kajian tidak mencakup implementasi teknis sistem otomatisasi, melainkan menitikberatkan pada hubungan konseptual antara hasil simulasi energi dan potensi penerapannya dalam sistem kontrol otomatis bangunan.

### 5. Kontribusi dan Signifikansi Penelitian

Kontribusi utama penelitian ini terletak pada penguatan hubungan antara desain pasif dan teknologi bangunan cerdas. Penelitian ini menunjukkan bahwa simulasi energi pada tahap awal desain dapat berfungsi sebagai dasar rasional dalam perancangan sistem otomatisasi, sehingga otomatisasi tidak diperlakukan sebagai lapisan tambahan semata, tetapi sebagai bagian dari strategi desain berbasis performa.

Secara praktis, penelitian ini memberikan referensi bagi perancang dan peneliti untuk memahami bagaimana hasil simulasi desain awal dapat digunakan sebagai pagu evaluasi dan dasar pengambilan keputusan dalam pengembangan bangunan berteknologi lanjut di iklim tropis Indonesia.

## TINJAUAN PUSTAKA

### 1. Iklim Tropis Lembap dan Implikasi Energi Bangunan

Iklim tropis lembap yang meliputi sebagian besar wilayah Indonesia ditandai dengan suhu udara relatif tinggi, kelembapan besar, dan intensitas radiasi matahari yang stabil sepanjang tahun. Kondisi ini menciptakan lingkungan bangunan yang secara termal cenderung panas sehingga sistem pengkondisian udara menjadi faktor energi dominan. (Lippsmeier, 1994) menegaskan bahwa arsitektur tropis menghadapi tantangan berupa masuknya panas berlebih ke ruang interior akibat radiasi langsung dan pantulan dari permukaan sekitar. (Olgyay, 1963) menambahkan bahwa radiasi matahari pada iklim tropis memiliki pengaruh hampir sepanjang hari, sehingga desain bangunan harus berupaya mengurangi paparan langsung sekaligus mempertahankan ventilasi yang cukup. Penelitian di iklim tropis lembap menunjukkan bahwa kombinasi radiasi matahari dan kelembapan tinggi dapat meningkatkan beban energi pada bangunan (Utama & Gheewala, 2008; Susanti & Siregar, 2019) sehingga desain bangunan tropis membutuhkan pendekatan holistik terhadap pergerakan panas, ventilasi, dan perlindungan radiasi.

### 2. Prinsip Desain Pasif dalam Arsitektur Tropis

Desain pasif merupakan strategi utama dalam mengurangi ketergantungan bangunan terhadap energi mekanis. Pada wilayah tropis lembap, desain pasif berperan mengendalikan masuknya panas sejak tahap awal melalui pengaturan orientasi, bentuk massa, konfigurasi bukaan, dan pemilihan material. Menurut (Givoni, 1998), strategi pasif yang tepat dapat menurunkan suhu interior beberapa derajat tanpa intervensi sistem pendingin. Studi kontemporer oleh (Emmanuel, 2017) juga menunjukkan bahwa bangunan tropis yang menerapkan orientasi tepat dan shading memadai dapat mengurangi beban pendinginan hingga 30%. Dengan demikian, desain pasif menjadi kerangka dasar bagi analisis performa energi dan menjadi alasan mengapa simulasi pada penelitian ini berfokus pada parameter desain awal (early design stage).

### 3. Window-to-Wall Ratio (WWR)

**Window-to-Wall Ratio (WWR)** adalah perbandingan antara luas bukaan dengan luas dinding pada satu fasad. Variasi **WWR** memengaruhi kualitas pencahayaan alami, intensitas radiasi, serta beban pendinginan. Peningkatan **WWR** dapat meningkatkan penetrasi cahaya alami, tetapi juga memperbesar beban panas masuk. ASHRAE 90.1-2019 merekomendasikan batasan **WWR** tertentu untuk menjaga efisiensi energi, terutama pada orientasi timur dan barat yang memiliki intensitas radiasi tinggi (ASHRAE, 2019). Fasad utara dan selatan cenderung lebih fleksibel karena variasi radiasi harian lebih stabil. Dalam praktik simulasi, modul pertama pada Sefaira memperlihatkan bagaimana perubahan **WWR** secara signifikan memengaruhi kebutuhan energi harian, terutama pada bangunan kecil dengan luasan permukaan relatif besar dibanding volume interior.

### 4. Peneduhan (Shading) sebagai Strategi Reduksi Radiasi

Shading adalah elemen penting yang digunakan untuk mengurangi radiasi matahari langsung. Pada iklim tropis, shading tidak hanya berfungsi sebagai perlindungan fisik, tetapi juga sebagai strategi termal yang dapat menurunkan beban pendinginan secara signifikan. (Givoni, 1998) melaporkan bahwa shading dapat mengurangi solar heat gain hingga 50% pada orientasi tertentu. Studi oleh (Elsayed & Reffat, 2020) juga menunjukkan bahwa peningkatan kedalaman shading pada bangunan tropis meningkatkan performa termal secara substansial. Modul kedua pada Sefaira mengeksplorasi sejauh mana variasi kedalaman shading memengaruhi konsumsi energi, memperlihatkan bahwa shading menjadi salah satu faktor desain paling efektif untuk bangunan tropis.

## 5. Thermal Transmittance (*U-Value*)

*U-Value* menggambarkan kemampuan material dalam mentransfer panas melalui konduksi. Material dengan *U-Value* tinggi memungkinkan perpindahan panas besar sehingga meningkatkan suhu ruang, sedangkan *U-Value* rendah dapat memperlambat aliran panas. ASHRAE 90.1-2019 menetapkan batas maksimum *U-Value* dinding dan atap untuk memastikan kinerja termal bangunan tetap efisien (ASHRAE, 2019). Studi oleh (Al-Sanea & Zedan, 2021) menunjukkan bahwa penurunan *U-Value* pada dinding dan atap secara langsung menurunkan beban pendinginan, terutama pada bangunan tropis. Modul ketiga Sefaira menguji variasi *U-Value* untuk memahami kontribusi material terhadap performa energi total.

## 6. Solar Heat Gain Coefficient (*SHGC*)

*Solar Heat Gain Coefficient (SHGC)* adalah ukuran jumlah panas matahari yang masuk melalui kaca. Nilai *SHGC* yang lebih rendah mengindikasikan performa penahanan panas yang lebih baik, yang sangat penting untuk bangunan tropis. ASHRAE menetapkan *SHGC* rendah sebagai bagian dari standar efisiensi energi untuk kaca bangunan nonhunian, khususnya pada fasad timur dan barat yang menerima radiasi intens (ASHRAE, 2019). Penelitian mutakhir menunjukkan bahwa kaca dengan *SHGC* rendah dapat mengurangi panas masuk hingga 40–60% tergantung kondisi iklim (Qin et al., 2020). Modul keempat Sefaira mengevaluasi pengaruh *SHGC* terhadap energi, *daylight*, dan *cooling load*.

## 7. Visible Transmittance (*VT*)

*Visible Transmittance (VT)* mengukur berapa banyak cahaya tampak yang diteruskan melalui kaca. *VT* berhubungan erat dengan pencahayaan alami, tetapi juga dapat meningkatkan radiasi panas jika tidak dikombinasikan dengan nilai *SHGC* yang rendah. Studi *Daylighting* oleh (Mardaljevic et al., 2016) menunjukkan bahwa peningkatan *VT* dapat mengurangi konsumsi energi pencahayaan, tetapi harus dianalisis bersamaan dengan beban pendinginan untuk menghindari overheating. Sefaira menggunakan nilai *VT* sebagai komponen kunci dalam perhitungan *Daylight Factor* untuk memastikan keseimbangan antara kenyamanan visual dan termal.

## 8. Daylight Factor (*DF*)

*Daylight Factor* adalah indikator yang membandingkan cahaya dalam ruangan terhadap cahaya luar dalam kondisi langit mendung standar. Nilai *DF* yang seimbang penting untuk mempertahankan kualitas visual tanpa meningkatkan resiko panas berlebih. (Engineers, 2002) menetapkan *DF* antara 2%–5% sebagai kategori ideal untuk ruang kerja. Penggunaan *DF* dalam simulasi energi diperlukan karena interaksi antara pencahayaan alami dan konsumsi energi lampu memiliki dampak pada total energi bangunan. Sefaira menghitung *DF* sebagai komponen *Daylighting* yang memberikan pemahaman holistik tentang kontribusi pencahayaan terhadap performa energi.

## 9. Beban Internal Bangunan

Beban internal berasal dari panas yang dihasilkan oleh peralatan elektronik, sistem pencahayaan, dan tubuh manusia. ASHRAE 90.1-2019 memberikan panduan *LPD (Lighting Power Density)* dan equipment load untuk berbagai jenis fungsi bangunan. Beban internal yang tinggi meningkatkan kebutuhan pendinginan karena suhu ruang lebih cepat naik. Penelitian oleh (Troup & Peel, 2019) menunjukkan bahwa pengurangan *LPD* dapat menurunkan energi pendinginan hingga 15% dalam bangunan beriklim panas. Modul kelima Sefaira mensimulasikan variasi internal load untuk memahami kontribusinya terhadap total energi.

## 10. Infiltrasi dan Ventilasi Minimum

Infiltrasi adalah masuknya udara luar yang tidak direncanakan melalui celah bangunan, yang sering kali meningkatkan beban pendinginan di iklim tropis. ASHRAE

62.1-2019 menetapkan ventilasi minimum untuk memastikan kualitas udara dalam ruang, namun infiltrasi yang berlebihan tetap menjadi komponen kerugian energi (Harmon et al., 2018) menunjukkan bahwa infiltrasi dapat menambah beban pendinginan hingga 20% pada bangunan tropis jika tidak dikendalikan. Parameter infiltrasi pada Sefaira mengikuti standar ASHRAE untuk menjaga konsistensi simulasi.

### **11. Cooling load sebagai Dasar Kebutuhan Energi**

*Cooling load* adalah jumlah panas yang harus dihilangkan oleh sistem pendingin untuk menjaga suhu ruang tetap nyaman. Dalam iklim tropis, *cooling load* dapat mencapai proporsi terbesar dari total konsumsi energi bangunan. Penelitian oleh (Saidur et al., 2011) memperlihatkan bahwa hampir 60% energi bangunan komersial di wilayah tropis digunakan untuk pendinginan. Sefaira menghitung *cooling load* secara langsung sehingga memungkinkan evaluasi pengaruh setiap parameter desain pada kebutuhan kapasitas AC.

### **12. Sistem Simulasi Energi Sefaira**

Sefaira adalah perangkat lunak simulasi energi yang mengintegrasikan *EnergyPlus* untuk perhitungan energi dan Radiance untuk *Daylighting*. Kelebihan utama Sefaira adalah kemampuannya melakukan simulasi cepat pada tahap awal desain. Kajian oleh (Juarez et al., 2021) menunjukkan bahwa perangkat seperti Sefaira dapat mengurangi *trial-and-error* desain energi hingga 50% pada tahap konseptual. Sefaira juga menyediakan indikator performa visual berupa lingkaran warna untuk menunjukkan tingkat efisiensi energi.

### **13. Benchmark Performa Berdasarkan Threshold Sefaira**

Penelitian ini menggunakan  $threshold \leq 25$  kWh/hari sebagai batas performa optimal atau kategori very low energy use. *threshold* ini merupakan indikator internal Sefaira berdasarkan model bangunan kecil dalam iklim tropis. Walaupun bukan standar global, nilai ini mencerminkan kondisi minimal energi yang dapat dicapai ketika strategi desain pasif bekerja secara efektif. Oleh karena itu, *threshold* ini digunakan sebagai dasar penyusunan pagu evaluasi energi pada bangunan tropis kecil.

### **14. Konsep Smart Building dan Sistem Otomatisasi Bangunan**

Konsep smart building berkembang dari kebutuhan untuk meningkatkan efisiensi energi, kenyamanan, dan keandalan operasional bangunan melalui integrasi sistem kontrol otomatis. Dalam literatur, smart building dipahami sebagai bangunan yang mampu memonitor kondisi internal dan eksternal, menganalisis data operasional, serta menyesuaikan kinerja sistemnya secara adaptif (Buckman et al., 2014). Sistem otomatisasi bangunan—yang umum dikenal sebagai *Building Automation System (BAS)* atau *Building Management System (BMS)*—menjadi tulang punggung implementasi konsep ini, terutama pada pengendalian HVAC, pencahayaan, dan elemen peneduhan.

Namun demikian, efektivitas *BAS/BMS* sangat dipengaruhi oleh karakteristik fisik dan termal bangunan. Bangunan dengan desain pasif yang tidak responsif terhadap iklim akan menghasilkan beban energi tinggi dan fluktuatif, sehingga sistem otomatisasi hanya berfungsi sebagai mekanisme koreksi, bukan optimasi. Studi oleh (Wong & Li, 2007) menegaskan bahwa kinerja otomasi meningkat signifikan ketika bangunan telah dioptimalkan secara pasif, karena sistem kontrol bekerja pada rentang operasi yang lebih stabil dan efisien. Oleh karena itu, pendekatan *smart building* yang matang menempatkan desain pasif sebagai prasyarat bagi keberhasilan otomatisasi.

Dalam kerangka ini, simulasi energi tahap awal berperan sebagai alat untuk mengantisipasi perilaku bangunan sebelum fase operasional. Informasi tentang pola beban pendinginan, kebutuhan pencahayaan, serta respon terhadap radiasi matahari

menjadi dasar penentuan strategi otomasi yang tepat. Dengan demikian, smartness bangunan tidak semata ditentukan oleh kompleksitas perangkat keras, melainkan oleh kualitas integrasi antara desain pasif dan logika kontrol otomatis.

### 15. Rule-Based Control dan Data Awal dalam Sistem Otomatisasi

Sebagian besar sistem otomatisasi bangunan beroperasi menggunakan rule-based control, yaitu logika pengendalian berbasis aturan “jika–maka” (*if–then rules*). Pendekatan ini mengandalkan parameter ambang (*threshold*), jadwal waktu, dan input sensor untuk mengatur respons sistem terhadap kondisi lingkungan (Oldewurtel et al., 2012). Contoh umum mencakup pengaturan setpoint suhu berdasarkan jam operasional, penurunan intensitas pencahayaan ketika cahaya alami mencukupi, atau aktivasi peneduhan otomatis saat radiasi matahari mencapai tingkat tertentu.

Akurasi dan efektivitas *rule-based control* sangat bergantung pada penetapan nilai ambang yang realistis dan kontekstual. Penentuan *threshold* yang tidak didasarkan pada karakteristik bangunan berpotensi menyebabkan overcooling, undercooling, atau pemborosan energi. Dalam hal ini, hasil simulasi energi desain awal menyediakan data kuantitatif yang krusial, seperti jam puncak beban pendinginan, sensitivitas fasad terhadap radiasi, serta interaksi antara pencahayaan alami dan beban termal.

Simulasi Sefaira, yang memanfaatkan mesin EnergyPlus dan Radiance, menghasilkan estimasi konsumsi energi harian serta indikator performa yang mudah diinterpretasikan. Informasi ini dapat diterjemahkan menjadi parameter awal dalam rule-based control, misalnya penentuan jam kritis pendinginan, batas intensitas cahaya untuk dimming, atau kebutuhan peneduhan pada orientasi tertentu. Dengan demikian, simulasi pasif tidak hanya berfungsi sebagai alat evaluasi desain, tetapi juga sebagai sumber data awal untuk penyusunan logika kontrol otomatis yang lebih presisi (Attia, 2018).

### 16. Integrasi Desain Pasif dan Sistem Otomatisasi pada Bangunan Tropis

Integrasi desain pasif dan sistem otomatisasi merupakan pendekatan yang semakin relevan pada bangunan di wilayah tropis, di mana variasi iklim harian relatif stabil tetapi intensitas radiasi dan kelembapan tinggi. Desain pasif berperan mengurangi beban energi dasar melalui orientasi yang tepat, pengendalian bukaan, pemilihan material, dan peneduhan. Sementara itu, sistem otomatisasi berfungsi sebagai lapisan adaptif yang menjaga kinerja bangunan tetap optimal sepanjang waktu (Kolokotsa, 2016). Selain studi internasional, penelitian di Indonesia juga menunjukkan bahwa penerapan strategi desain pasif secara signifikan menurunkan beban energi bangunan pada iklim tropis lembap. Kajian menemukan bahwa optimasi orientasi bangunan, bukaan, dan shading berkontribusi langsung pada efisiensi energi pendinginan (Sari & Putra, 2023).

Pada bangunan tropis berukuran kecil, rasio luas selubung terhadap volume ruang yang tinggi membuat perubahan kecil pada parameter desain pasif berdampak signifikan terhadap konsumsi energi. Melalui simulasi energi, kombinasi parameter pasif yang menghasilkan beban energi minimum dapat diidentifikasi dan dijadikan **baseline** bagi pengembangan strategi otomatisasi. Dengan demikian, sistem otomatisasi berfungsi untuk **mengoptimalkan operasi bangunan**, bukan mengoreksi kelemahan desain. Dalam penelitian ini, indikator performa energi Sefaira yang menunjukkan konsumsi energi  $\leq 25$  kWh/hari diposisikan sebagai **pagu evaluasi awal**. Nilai ini tidak dimaksudkan sebagai standar universal, tetapi sebagai referensi kontekstual bagi bangunan tropis kecil yang telah dioptimalkan secara pasif. Berdasarkan pagu tersebut, logika kontrol otomatis—seperti penyesuaian setpoint adaptif, pengaturan pencahayaan berbasis daylight, serta peneduhan responsif—dapat dirumuskan secara lebih efektif. Dengan demikian, integrasi antara simulasi

desain pasif dan sistem otomatisasi membentuk satu kesatuan strategi desain bangunan berteknologi lanjut yang berorientasi pada performa energi.

## **METODE PENELITIAN**

### **1. Jenis Penelitian dan Pendekatan**

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental berbasis simulasi performa energi bangunan pada tahap awal desain. Pendekatan ini dipilih untuk menganalisis hubungan sebab-akibat antara parameter desain pasif dan konsumsi energi bangunan dalam konteks iklim tropis Indonesia. Simulasi energi diposisikan sebagai alat analisis utama untuk menguji sensitivitas desain terhadap perubahan parameter secara terkontrol.

Berbeda dari penelitian yang berfokus pada implementasi sistem mekanikal atau otomasi secara langsung, penelitian ini menempatkan simulasi sebagai tahap pra-otomatisasi, yaitu fase awal yang bertujuan membentuk dasar performa energi bangunan sebelum pengembangan sistem kontrol otomatis.

### **2. Batasan Penelitian**

Penelitian ini dibatasi pada analisis bangunan kecil dengan satu massa bangunan dan geometri sederhana seluas  $\pm 50$  m<sup>2</sup>, satu lantai, dan tinggi ruang standar. Kajian difokuskan pada parameter desain pasif tahap awal, yaitu orientasi bangunan, **Window-to-Wall Ratio (WWR)**, konfigurasi shading, nilai **U-Value** selubung bangunan, karakteristik kaca (**SHGC** dan **Visible Transmittance**), serta beban internal bangunan.

Penelitian tidak mencakup perancangan detail sistem mekanikal dan elektrik, maupun implementasi sistem otomatisasi bangunan. Pembahasan otomatisasi hanya berada pada tataran konseptual, yaitu bagaimana hasil simulasi digunakan sebagai dasar penentuan logika dan batas operasional sistem kontrol berbasis performa energi. Konteks iklim dibatasi pada wilayah Indonesia dengan karakteristik tropis lembap, sehingga hasil penelitian tidak ditujukan untuk digeneralisasi langsung pada wilayah beriklim non-tropis.

### **3. Spesifikasi Objek dan Model Bangunan Simulasi**

Objek penelitian berupa model bangunan kecil dengan luas lantai  $\pm 50$  m<sup>2</sup> yang disimulasikan sebagai satu massa bangunan tunggal. Model ini dipilih untuk merepresentasikan tipologi bangunan sederhana yang umum dijumpai pada tahap awal perancangan bangunan di Indonesia, seperti bangunan pendidikan skala kecil atau kantor mikro.

Bangunan dirancang dengan denah memanjang dan orientasi utama menghadap arah utara-selatan. Orientasi ini ditetapkan untuk meminimalkan paparan radiasi matahari langsung pada fasad dengan luasan terbesar, sesuai dengan prinsip desain bangunan tropis pasif. Sisi timur dan barat memiliki luasan fasad yang lebih kecil untuk mengurangi beban panas akibat radiasi matahari pagi dan sore.

Seluruh parameter geometri bangunan, termasuk luas lantai, tinggi ruang, dan orientasi, dijaga tetap konstan sepanjang proses simulasi. Dengan pendekatan ini, setiap perubahan performa energi yang terjadi dapat dikaitkan secara langsung dengan variasi parameter desain pasif yang diuji.

### **4. Data Iklim dan Standar Acuan**

Data iklim yang digunakan dalam simulasi mengacu pada data iklim Jakarta, yang merepresentasikan kondisi iklim tropis lembap perkotaan di Indonesia. Data ini mencakup informasi suhu udara, kelembapan relatif, radiasi matahari, dan kondisi lingkungan lainnya yang digunakan oleh mesin simulasi energi.

Standar performa energi yang dijadikan acuan dalam penelitian ini adalah ASHRAE 90.1–2019, sedangkan standar ventilasi minimum mengacu pada ASHRAE 62.1–2019. Penggunaan standar internasional ini bertujuan untuk memastikan bahwa hasil simulasi berada dalam kerangka performa energi yang dapat diperbandingkan secara global.

#### 5. Tahapan Penelitian dan Posisi Simulasi sebagai Pra-Otomatisasi

Tahapan penelitian disusun sebagai rangkaian simulasi yang dilakukan secara berurutan dan sistematis. Setiap tahapan dirancang untuk menguji satu kelompok variabel desain pasif dengan pendekatan **satu variabel berubah pada satu waktu**, sementara parameter lainnya dipertahankan konstan. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi pengaruh masing-masing variabel terhadap performa energi bangunan secara terukur dan terisolasi.

Dalam kerangka penelitian ini, seluruh tahapan simulasi diposisikan sebagai proses pembentukan **performance envelope**, yaitu rentang kinerja energi bangunan yang mungkin terjadi akibat variasi parameter desain pasif. **Performance envelope** tersebut berfungsi sebagai dasar konseptual bagi pengembangan sistem otomatisasi bangunan, khususnya dalam penentuan **batas operasional energi minimum** yang perlu dipertahankan melalui strategi kontrol adaptif pada tahap operasional.

Tahap pertama penelitian difokuskan pada analisis **Window-to-Wall Ratio (WWR)**. Parameter ini dianalisis terlebih dahulu karena memiliki pengaruh dominan terhadap besaran radiasi matahari yang diterima bangunan, tingkat pencahayaan alami, serta besaran beban pendinginan. Pada tahap ini dilakukan tiga variasi **WWR** yang merepresentasikan kondisi bukaan rendah, sedang, dan tinggi. Setiap variasi dievaluasi berdasarkan konsumsi energi harian yang dihasilkan.

Tahap kedua dilanjutkan dengan analisis **konfigurasi elemen peneduh (shading devices)**. Beberapa variasi bentuk dan kedalaman shading disimulasikan untuk mengevaluasi efektivitasnya dalam menurunkan paparan radiasi matahari langsung dan dampaknya terhadap beban pendinginan.

Tahap ketiga mencakup analisis **karakteristik termal material selubung bangunan**, khususnya nilai **U-Value** pada dinding dan atap. Variasi nilai **U-Value** disimulasikan untuk memahami besaran kontribusi isolasi termal terhadap pengurangan panas konduksi yang masuk ke dalam bangunan.

Tahap keempat difokuskan pada analisis **karakteristik kaca**, yang meliputi **Solar Heat Gain Coefficient (SHGC)** dan **Visible Transmittance (VT)**. Kombinasi nilai **SHGC** dan **VT** dianalisis untuk memperoleh keseimbangan antara pengendalian panas matahari dengan optimalisasi pencahayaan alami.

Tahap kelima mencakup analisis **beban internal bangunan** yang terdiri atas beban pencahayaan dan beban peralatan. Variasi besaran beban internal disimulasikan untuk mengidentifikasi kontribusinya terhadap total konsumsi energi, serta potensinya untuk dikendalikan melalui strategi kontrol adaptif.

Tahap keenam merupakan **tahap sintesis**, yaitu analisis menyeluruh terhadap performa energi total bangunan. Pada tahap ini, seluruh hasil simulasi dibandingkan untuk mengidentifikasi kombinasi parameter desain yang menghasilkan konsumsi energi harian paling rendah. Kondisi tersebut diposisikan sebagai **kondisi performa energi minimum** yang menjadi dasar penentuan **pagu pra-otomatisasi** bagi bangunan.

## 6. Perangkat Simulasi dan Metode Analisis Data

Seluruh simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak Sefaira yang terintegrasi dengan mesin perhitungan EnergyPlus dan Radiance. Data yang dihasilkan berupa konsumsi energi harian dan indikator performa energi bangunan. Analisis data dilakukan secara deskriptif-kuantitatif dengan membandingkan hasil antar skenario simulasi untuk mengidentifikasi tren dan sensitivitas parameter desain.

## 7. Kerangka Metodologis Pengaitan Simulasi dengan Sistem Otomatisasi Bangunan

Dalam penelitian ini, sistem otomatisasi bangunan tidak disimulasikan secara langsung, tetapi diposisikan sebagai kerangka konseptual yang dibangun berdasarkan hasil simulasi desain pasif. Pendekatan ini berangkat dari prinsip bahwa sistem otomatisasi yang efektif harus bekerja pada bangunan yang telah memiliki performa energi dasar yang optimal sejak tahap perancangan.

Hasil simulasi energi tahap awal digunakan untuk membentuk **performance envelope**, yaitu rentang performa energi bangunan yang muncul akibat variasi parameter desain pasif. Rentang performa ini menjadi dasar penetapan batas operasional energi minimum dan maksimum yang secara konseptual dapat dijaga oleh sistem otomatisasi. Kondisi konsumsi energi minimum dari kombinasi desain pasif optimal diposisikan sebagai **baseline performance**, yang berfungsi sebagai pagu awal bagi strategi kontrol otomatis seperti pengaturan pencahayaan adaptif, pengendalian pendinginan berbasis beban aktual, dan penjadwalan operasional.

Dengan demikian, penelitian ini tidak merancang atau menguji sistem otomatisasi secara teknis, tetapi menyediakan dasar performa energi yang terukur bagi penerapannya. Pendekatan ini menegaskan bahwa simulasi energi tahap awal merupakan bagian integral dari desain bangunan berteknologi lanjut, sehingga sistem otomatisasi berfungsi mempertahankan efisiensi, bukan memperbaiki desain yang tidak optimal.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### 1. Gambaran Umum Hasil Simulasi Energi

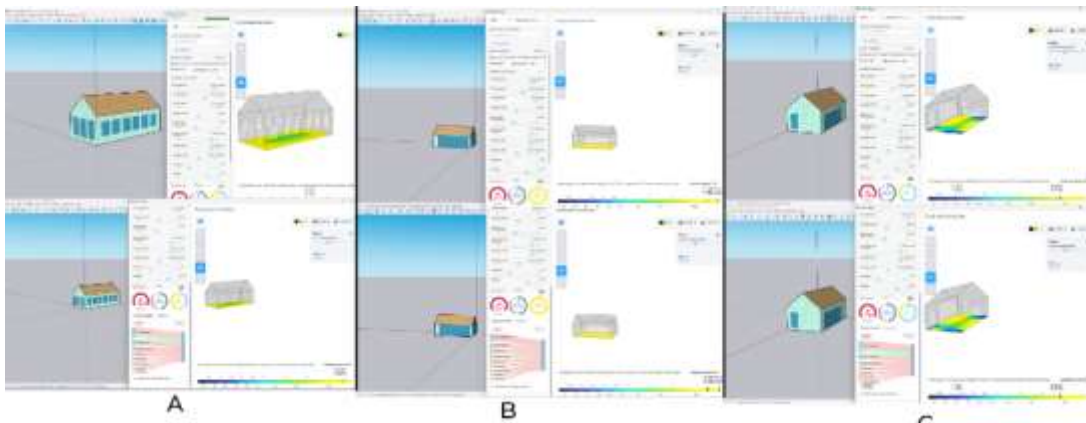
Simulasi energi yang dilakukan pada penelitian ini menghasilkan data konsumsi energi harian bangunan untuk setiap variasi parameter desain pasif yang diuji. Seluruh simulasi dilakukan pada model bangunan yang sama dengan luas  $\pm 50$  m<sup>2</sup>, orientasi memanjang utara-selatan, dan menggunakan data iklim Jakarta. Dengan menjaga geometri dan kondisi dasar bangunan tetap konstan, variasi konsumsi energi yang muncul dapat dikaitkan secara langsung dengan perubahan parameter desain pasif.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa konsumsi energi bangunan sangat sensitif terhadap perubahan parameter desain pada tahap awal perancangan. Perbedaan kecil pada proporsi bukaan, konfigurasi peneduhan, maupun karakteristik material selubung bangunan menghasilkan perbedaan konsumsi energi yang signifikan. Temuan ini menegaskan pentingnya pengambilan keputusan desain pasif sejak tahap awal sebagai dasar efisiensi energi bangunan.

### 2. Hasil Simulasi *Window-to-Wall Ratio* (WWR)

Tahap awal simulasi difokuskan pada analisis **Window-to-Wall Ratio** (WWR) karena parameter ini berpengaruh langsung terhadap intensitas radiasi matahari, pencahayaan alami, dan beban pendinginan. Tiga skenario WWR diuji untuk mewakili kondisi bukaan rendah, sedang, dan tinggi. Pada skenario pertama (Gambar A), WWR ditetapkan sebesar 30%. Hasil simulasi menunjukkan konsumsi energi sebesar **196 kWh per tahun** dengan **Daylight Factor (DF) 3,10–6,62%**, yang termasuk kategori **mostly overlit**. Pada skenario kedua (Gambar B), WWR ditingkatkan

menjadi **70%**, sehingga konsumsi energi naik menjadi **217 kWh per tahun** dengan **DF rata-rata 6,52%**, menunjukkan kondisi ruang yang **terlalu terang dan panas**. Skenario ketiga (Gambar C) menggunakan konfigurasi **WWR** diferensial, yaitu **30% pada fasad utara, 50% pada selatan, dan 10% pada timur–barat**. Hasilnya, konsumsi energi tetap berada pada kisaran **196 kWh per tahun**, dengan **DF 1,20–5,73%** yang termasuk kategori **mostly well-lit**, yaitu cukup terang tanpa menimbulkan overheating yang signifikan. Secara umum, hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan **WWR** menyebabkan peningkatan panas masuk ke bangunan, sehingga beban pendinginan ikut meningkat meskipun pencahayaan alami membaik. Dengan demikian, pengaturan proporsi bukaan menjadi strategi desain pasif yang krusial pada bangunan tropis, sekaligus menentukan besarnya intervensi sistem otomatisasi dalam pengendalian pencahayaan dan pendinginan.



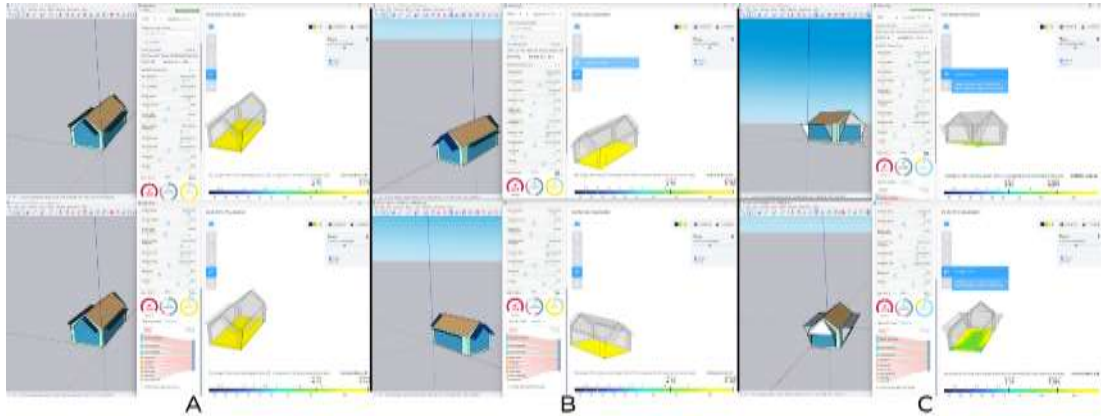
**Gambar 1.** Hasil Simulasi **WWR**  
Sumber : Analisis Penulis,2025

### 3. Hasil Simulasi Konfigurasi Elemen Peneduhan

Simulasi tahap berikutnya menganalisis pengaruh konfigurasi elemen peneduhan terhadap konsumsi energi bangunan. Variasi kedalaman dan konfigurasi shading diuji pada fasad yang terpapar radiasi matahari langsung. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penerapan elemen peneduhan yang tepat mampu menurunkan konsumsi energi pendinginan secara signifikan.

Bangunan tanpa peneduhan menunjukkan konsumsi energi yang lebih tinggi akibat paparan radiasi matahari langsung melalui bukaan. Penambahan elemen peneduhan dengan kedalaman tertentu menghasilkan penurunan beban pendinginan yang konsisten. Namun, peningkatan kedalaman shading secara berlebihan tidak selalu menghasilkan penurunan konsumsi energi yang proporsional, karena berpotensi mengurangi pencahayaan alami dan meningkatkan kebutuhan pencahayaan buatan. Hasil ini menunjukkan bahwa elemen peneduhan memiliki titik optimal yang perlu ditentukan secara cermat. Dalam kerangka pra-otomatisasi, temuan ini berfungsi sebagai dasar konseptual bagi pengembangan sistem kontrol adaptif, seperti pengaturan bukaan atau perangkat peneduhan dinamis, yang bekerja dalam rentang performa energi yang telah diidentifikasi melalui simulasi.

Gambar berikut menunjukkan perbandingan kinerja energi pada tiga konfigurasi shading dengan **WWR 70%**. Pada konfigurasi shading 1 m di semua sisi, konsumsi energi tercatat 206 kWh/tahun dengan **DF 4,70–8,19%** (cenderung overlit). Penyesuaian kedalaman shading menjadi 1 m (utara), 0,5 m (selatan), dan 1,5 m (timur–barat) menurunkan konsumsi energi menjadi 204 kWh/tahun dengan **DF 4,20–8,38%**. Konfigurasi paling efisien dicapai pada shading horizontal dan vertikal 1,5 m di seluruh sisi, dengan konsumsi energi 200 kWh/tahun dan **DF 2,90–5,09%** (mostly well-lit). Hasil ini menunjukkan bahwa shading vertikal pada fasad timur–barat sangat efektif menurunkan panas radiasi dan beban pendinginan.

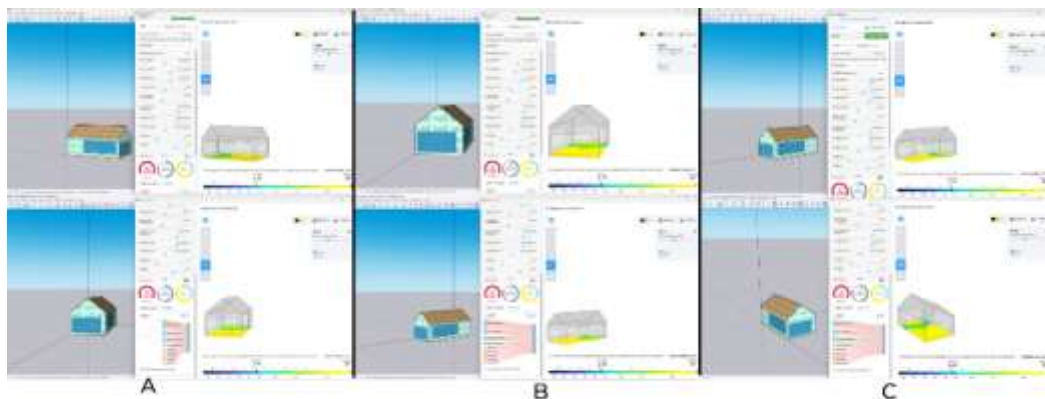


**Gambar 2.** Hasil Simulasi Elemen Peneduh  
Sumber : Analisis Penulis, 2025

#### 4. Hasil Simulasi Karakteristik Material Selubung Bangunan

Analisis berikut meninjau pengaruh ***U-Value*** dinding dan atap terhadap konsumsi energi bangunan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penurunan ***U-Value*** secara konsisten menurunkan energi pendinginan, karena perpindahan panas melalui selubung bangunan menjadi lebih kecil. Namun, pengaruhnya tidak sebesar variabel ***WWR*** dan shading, terutama pada bangunan kecil dengan luas selubung yang terbatas.

Pada model dengan ***WWR*** 40%, kondisi awal dengan ***U-Value*** 2,5 W/m<sup>2</sup>K menghasilkan konsumsi energi 236 kWh dengan ***DF*** 2,5–8% (mostly overlit). Ketika ***U-Value*** diturunkan menjadi 1,5 W/m<sup>2</sup>K, konsumsi energi berkurang menjadi 225 kWh dengan ***DF*** yang relatif sama. Pada kondisi terbaik, ***U-Value*** dinding 1,0 W/m<sup>2</sup>K dan atap 1,5 W/m<sup>2</sup>K menghasilkan konsumsi energi 222 kWh. Temuan ini menegaskan bahwa semakin rendah ***U-Value*** selubung bangunan, semakin rendah pula energi pendinginan yang dibutuhkan.



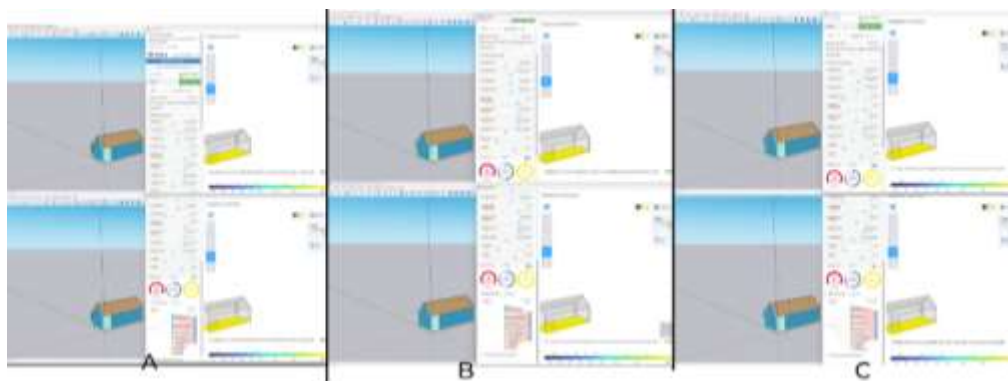
**Gambar 3.** Hasil Simulasi ***U-Value***  
Sumber : Analisis Penulis, 2025

#### 5. Hasil Simulasi Karakteristik Kaca (***SHGC*** dan ***VT***)

Simulasi karakteristik kaca dilakukan dengan memvariasikan nilai ***Solar Heat Gain Coefficient (SHGC)*** dan ***Visible Transmittance (VT)***. Hasil simulasi menunjukkan bahwa ***SHGC*** yang lebih rendah umumnya menurunkan beban pendinginan karena panas matahari yang masuk ke dalam bangunan berkurang. Namun, penurunan ***SHGC*** yang terlalu besar juga dapat mengurangi pencahayaan alami sehingga meningkatkan kebutuhan penerangan buatan. Karena itu, diperlukan keseimbangan antara ***SHGC*** dan ***VT*** agar performa energi tetap optimal.

Pada bangunan dengan **WWR** 70% dan **U-Value** dinding serta atap 2,5 W/m<sup>2</sup>K, kaca dengan U-factor 5 W/m<sup>2</sup>K dan **SHGC** 0,8 menghasilkan konsumsi energi 249 kWh (A). Ketika U-factor kaca diturunkan menjadi 2,5 W/m<sup>2</sup>K dengan **SHGC** yang sama (B), konsumsi energi berkurang menjadi 243 kWh. Namun pada kondisi **SHGC** 0,4 (C), konsumsi energi justru meningkat menjadi 295 kWh karena berkurangnya kontribusi pencahayaan alami.

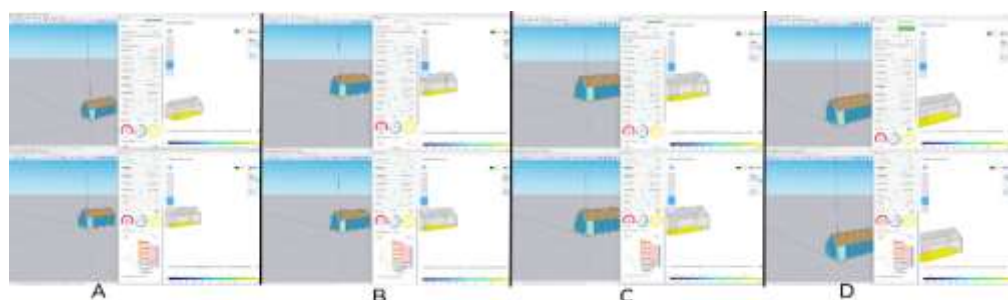
Temuan ini menegaskan bahwa U-factor kaca membantu mengurangi perpindahan panas konduksi, sedangkan **SHGC** mengontrol panas radiasi matahari. Pada iklim tropis, kombinasi keduanya perlu dioptimalkan agar pengurangan panas tidak mengorbankan pencahayaan alami. Dalam konteks pra-otomatisasi, hasil simulasi ini dapat menjadi acuan bagi sistem kontrol pencahayaan dan pendinginan berbasis sensor untuk menjaga bangunan tetap berada dalam rentang energi pasif yang efisien.



**Gambar 4.** Hasil Simulasi **SHGC** dan **Glazing**  
 Sumber : Analisis Penulis, 2025

## 6. Hasil Simulasi Beban Internal Bangunan

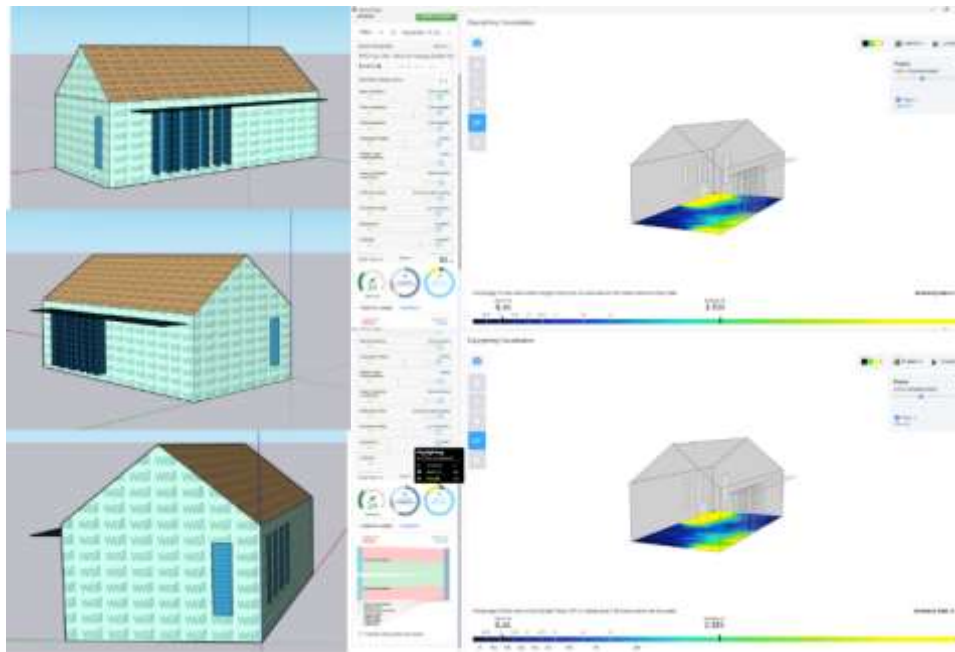
Simulasi beban internal dilakukan dengan memvariasikan beban pencahayaan dan peralatan listrik. Hasilnya menunjukkan bahwa peningkatan beban internal secara langsung menaikkan konsumsi energi pendinginan, karena panas yang dihasilkan peralatan dan pencahayaan menambah beban termal ruang. Pada bangunan dengan **WWR** 70%, **U-Value** dinding dan atap 2,5 W/m<sup>2</sup>K, serta kaca U-factor 5 W/m<sup>2</sup>K dan **SHGC** 0,8, kondisi dasar menghasilkan konsumsi energi 370 kWh. Penerapan beban peralatan 25 W/m<sup>2</sup> dan pencahayaan 10 W/m<sup>2</sup> meningkatkan energi menjadi 371 kWh. Penurunan beban peralatan menjadi 15 W/m<sup>2</sup> menurunkan konsumsi menjadi 343 kWh, sedangkan penurunan beban pencahayaan menjadi 5 W/m<sup>2</sup> menghasilkan konsumsi 357 kWh. Temuan ini menegaskan bahwa semakin besar beban peralatan dan pencahayaan, semakin tinggi konsumsi energi bangunan. Dalam konteks pra-otomatisasi, hasil ini memperkuat pentingnya strategi kontrol seperti *daylight-responsive lighting* dan penjadwalan operasional peralatan untuk menjaga konsumsi energi tetap minimal.



**Gambar 5.** Hasil Simulasi Beban internal Bangunan  
 Sumber : Analisis Penulis, 2025

## 7. Sintesis Hasil Simulasi dan Pembentukan *Performance envelope*

Model bangunan akhir dengan kombinasi desain pasif paling efisien (P 5 m, L 10 m, tinggi ruang 3 m, tinggi atap 2 m). Konfigurasi kinerja minimum dicapai melalui *WWR* kecil (utara 12%, selatan 12%, timur–barat 6%), shading 60% pada fasad utara, serta insulasi dinding, lantai, dan atap sebesar 0,1 W/m<sup>2</sup>K. Kaca berperforma tinggi digunakan (U-factor 0,25 W/m<sup>2</sup>K, *SHGC* 0,01, *VT* 1), dengan infiltrasi 0,36 ACH dan ventilasi 0,9 ACH. Beban internal dijaga minimal (peralatan 1,5 W/m<sup>2</sup> dan pencahayaan 1 W/m<sup>2</sup>). Konfigurasi ini menghasilkan konsumsi energi sebesar **24 kWh** dengan *Daylight Factor* **0,4–3,53%**, yang menunjukkan kondisi *mostly well-lit* tanpa beban pendinginan berlebih. Hasil ini merepresentasikan *performance envelope* atau batas bawah performa energi bangunan yang dicapai murni melalui desain pasif sebelum penerapan sistem otomatisasi.



**Gambar 6.** Visualisasi Model Akhir dan Hasil Simulasi *Daylighting* pada Kondisi Performa Energi Minimum  
Sumber : Analisis Penulis, 2025

## 8. Implikasi Hasil terhadap Pengembangan Sistem Otomatisasi Bangunan

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa desain pasif yang dioptimalkan melalui simulasi energi tahap awal dapat membentuk batas performa energi yang jelas dan terukur. Dalam konteks sistem otomatisasi, batas ini berfungsi sebagai referensi awal dalam menentukan logika kontrol dan batas operasional sistem.

Sistem otomatisasi yang dikembangkan berdasarkan *performance envelope* berpotensi bekerja lebih efektif dan efisien, karena beroperasi pada bangunan yang sejak awal telah dirancang dengan performa energi yang baik. Dengan demikian, integrasi antara simulasi desain pasif dan sistem otomatisasi tidak bersifat tumpang tindih, melainkan saling melengkapi dalam mencapai efisiensi energi bangunan secara menyeluruh.

Temuan penelitian ini konsisten dengan studi (Emmanuel, 2017) yang menegaskan bahwa optimasi orientasi dan elemen peneduhan secara signifikan menurunkan beban pendinginan pada bangunan tropis. Hasil terkait *sensitivitas Window-to-Wall Ratio* dan karakteristik kaca juga sejalan dengan penelitian (Qin et al., 2020) yang menunjukkan bahwa pengendalian *solar heat gain* melalui kombinasi *SHGC* dan *U-factor* menjadi faktor kunci dalam efisiensi energi iklim panas. Selain itu, temuan ini

memperkuat kajian (Sari & Putra, 2023) pada konteks Indonesia yang menekankan pentingnya desain pasif sebagai strategi utama pengurangan beban energi sebelum intervensi sistem aktif. Namun, penelitian ini memperluas diskursus tersebut dengan memposisikan hasil simulasi sebagai *performance envelope* pra-otomatisasi, sehingga memberikan kerangka konseptual yang lebih terstruktur bagi integrasi desain pasif dan sistem kontrol otomatis berbasis performa.

## KESIMPULAN DAN SARAN

### 1. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan strategi desain pasif melalui simulasi energi berbasis Sefaira mampu menurunkan konsumsi energi bangunan sederhana di iklim tropis lembap hingga kisaran  $\pm 24\text{--}25$  kWh per meter persegi per tahun. Nilai ini dapat dipahami sebagai benchmark efisiensi energi minimum yang realistis untuk tipologi bangunan non-hunian sederhana. Parameter yang paling berpengaruh terhadap beban pendinginan adalah orientasi bangunan, rasio bukaan terhadap dinding, jenis kaca, insulasi atap, serta strategi peneduhan dan ventilasi alami. Temuan ini menegaskan bahwa desain pasif merupakan fondasi utama yang menentukan kinerja energi bangunan. Selain itu, hasil simulasi energi ini dapat diposisikan sebagai tahap pra-otomatisasi, karena mampu membentuk batas performa energi yang kemudian dapat dijadikan acuan bagi sistem otomatisasi bangunan dalam menjaga efisiensi operasional.

### 2. Rekomendasi

Berdasarkan hasil penelitian, nilai konsumsi energi  $\pm 24\text{--}25$  kWh per meter persegi per tahun dapat digunakan sebagai acuan evaluasi awal bagi bangunan tropis sederhana yang dirancang dengan pendekatan desain pasif, meskipun tidak dimaksudkan sebagai standar universal. Praktik simulasi energi disarankan dilakukan sejak tahap awal perancangan karena parameter bentuk, orientasi, dan bukaan merupakan aspek yang paling menentukan performa energi sekaligus paling sulit diubah pada tahap konstruksi. Untuk penelitian lanjutan, integrasi antara desain pasif dan sistem otomatisasi bangunan perlu diperdalam dengan memasukkan variabel operasional seperti pola penggunaan ruang, skenario kontrol otomatis, serta pengujian langsung pada bangunan nyata guna memastikan kesesuaian antara hasil simulasi dan performa aktual.

### 3. Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini masih dibatasi oleh penggunaan model bangunan sederhana dengan asumsi kondisi operasional yang ideal serta variabel perilaku pengguna yang belum dimasukkan secara menyeluruh. Analisis juga hanya berfokus pada satu bangunan tanpa mempertimbangkan pengaruh lingkungan sekitar seperti vegetasi, bangunan tetangga, dan efek *urban heat island*. Selain itu, sistem otomatisasi yang dibahas masih berada pada tataran konseptual dan belum diuji pada level implementasi teknis menggunakan perangkat dan sensor nyata, sehingga diperlukan penelitian lanjutan untuk memvalidasi penerapannya di lapangan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Al-Sanea, S. A., & Zedan, M. F. (2021). Optimum insulation thickness for building walls in hot climates. *Applied Thermal Engineering*, 190, 116757. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116757>
- ASHRAE. (2019). *ANSI/ASHRAE Standard 90.1-2019: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Attia, S. (2018). *Net Zero Energy Buildings (NZEB): Concepts, Frameworks and Roadmap for Project Analysis and Implementation*. Butterworth-Heinemann.
- Buckman, A. H., Mayfield, M., & Beck, S. B. M. (2014). What Is a Smart Building? *Smart and Sustainable Built Environment*, 3(2), 92–109.

- Elsayed, H., & Reffat, R. (2020). The impact of shading devices geometry on building energy performance in hot climates. *Energy and Buildings*, 214, 109873. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109873>
- Emmanuel, R. (2017). *Urban Climate Challenges in the Tropics: Rethinking Planning and Design Opportunities*. Imperial College Press.
- Engineers, C. I. of B. S. (2002). *Lighting Guide LG10: Daylighting and Window Design*. CIBSE.
- Givoni, B. (1998). *Climate Considerations in Building and Urban Design*. John Wiley & Sons.
- Harmon, T., Bahnfleth, W., & Freihaut, J. (2018). The impact of building envelope infiltration on cooling energy use in humid climates. *Energy and Buildings*, 174, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.021>
- Juarez, M., Reinhart, C., & Lagios, K. (2021). Evaluating conceptual building energy modeling tools for early design decision making. *Energy and Buildings*, 231, 110561. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110561>
- Kolokotsa, D. (2016). The Role of Smart Grids in the Building Sector. *Energy and Buildings*, 116, 703–708.
- Lippsmeier, G. (1994). *Bangunan Tropis*. Erlangga.
- Mardaljevic, J., Andersen, M., Roy, N., Christoffersen, J., & Wienold, J. (2016). Daylighting metrics: Is there a relation between useful daylight illuminance and daylight glare probability? *Lighting Research & Technology*, 48(3), 261–277. <https://doi.org/10.1177/1477153515588254>
- Oldewurtel, F., Parisio, A., Jones, C. N., Gyalistras, D., Gwerder, M., Stauch, V., Lehmann, B., & Morari, M. (2012). Use of model predictive control and weather forecasts for energy efficient building climate control. *Energy and Buildings*, 45, 15–27. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.022>
- Olgyay, V. (1963). *Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*. Princeton University Press.
- Qin, M., Yang, X., & Tan, Y. (2020). Impact of solar heat gain coefficient on cooling energy consumption of buildings in hot climates. *Energy and Buildings*, 210, 109753. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109753>
- Saidur, R., Masjuki, H. H., & Jamaluddin, M. (2011). Energy consumption, energy savings, and emission analysis in Malaysian office buildings. *Energy Policy*, 39, 5960–5968. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.06.041>
- Sari, D., & Putra, R. A. (2023). Passive design strategies for improving thermal performance of small buildings in tropical climates. *KOLABORASI Jurnal Arsitektur*, 3(2), 101–110. <https://doi.org/10.31098/kolaborasi.v3i2.xxx>
- Susanti, L., & Siregar, I. M. (2019). Strategi desain pasif pada bangunan pendidikan di iklim tropis lembap. *Jurnal Arsitektur Tropis*, 7(2), 85–96.
- Troup, L., & Peel, J. (2019). Lighting power density and cooling load interactions in warm climate office buildings. *Energy and Buildings*, 199, 164–175. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.07.034>
- Utama, A., & Gheewala, S. H. (2008). Indonesian Residential High Rise Buildings: A Life Cycle Energy Assessment. *Energy and Buildings*, 40(10), 1819–1826.
- Wong, N. H., & Li, S. (2007). A Study of the Effectiveness of Passive Climate Control in Naturally Ventilated Buildings. *Building and Environment*, 42(1), 338–351.