



Permodelan *Shading Device* terhadap Efisiensi Energi pada Bangunan Hunian Studi Kasus: Summarecon Bogor

Reza Krisnandi¹, M. I. Ririk Winandari²

¹Magister Architecture Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Trisakti, Indonesia, reza_krisnandi@yahoo.com

²Magister Architecture Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Trisakti, Indonesia, mi.ririk@trisakti.ac.id

Corresponding Author: reza_krisnandi@yahoo.com¹

Abstract: *Global climate change has led to an increase in the Earth's average temperature, the emergence of urban heat island (UHI) phenomena, and high energy consumption in the residential sector, especially in tropical regions. This study examines the formulation of an integration between smart technology and passive design to produce climate-resilient tropical housing that is energy-efficient and sustainable. The passive architectural approach includes building orientation and shading strategies, while smart technology encompasses Internet of Things (IoT)-based sensor systems, automatic controls, and artificial intelligence (AI)-based analytics. The research employs a quantitative method using computational simulation approaches (CFD and EnergyPlus). The study was conducted in the Summarecon Bogor area, West Java, which has humid tropical climate characteristics. The results show that the integration of passive design and smart systems can reduce natural radiation exposure through appropriate selection and positioning of shading devices, enhance thermal comfort, and lower cooling energy consumption. This research provides an important contribution to the development of sustainable tropical housing models in Indonesia, while also supporting the achievement of SDG 7 (Affordable and Clean Energy) and SDG 11 (Sustainable Cities and Communities).*

Keywords: *Smart Technology, Passive Design, Energy Efficiency, Tropical Climate, Sustainable Housing.*

Abstrak: Perubahan iklim global telah menyebabkan peningkatan suhu rata-rata bumi, fenomena *urban heat island* (UHI), serta konsumsi energi yang tinggi dalam sektor perumahan, terutama di wilayah tropis. Penelitian ini mengkaji formulasi integrasi antara *smart technology* dan desain pasif untuk menghasilkan perumahan tahan iklim tropis yang efisien energi dan berkelanjutan. Pendekatan arsitektur pasif meliputi orientasi bangunan dan strategi shading, sedangkan *smart technology* mencakup sistem sensor berbasis Internet of Things (IoT), kontrol otomatis, dan analisis berbasis kecerdasan buatan (AI). Penelitian menggunakan metode kuantitatif dengan pendekatan simulasi komputasional (CFD dan EnergyPlus). Lokasi penelitian dilakukan di kawasan Summarecon Bogor, Jawa Barat, yang memiliki karakteristik iklim tropis lembab. Hasil menunjukkan bahwa integrasi desain pasif dan sistem pintar mampu menurunkan pancaran sinar alami karena pemilihan dan posisi

shading device yang tepat, efek lain meningkatkan kenyamanan termal, serta menghemat konsumsi energi pendinginan. Penelitian ini memberikan kontribusi penting terhadap pengembangan model perumahan tropis berkelanjutan di Indonesia, sekaligus mendukung pencapaian SDGs 7 (Energi Bersih) dan SDGs 11 (Kota Berkelanjutan).

Kata Kunci: *Smart Technology*, Desain Pasif, Efisiensi Energi, Iklim Tropis, Perumahan Berkelanjutan.

PENDAHULUAN

Perubahan iklim merupakan tantangan terbesar abad ke-21 yang memberikan dampak signifikan terhadap sektor bangunan dan perumahan (Sippel et al., 2020). Peningkatan suhu global dan intensitas cuaca ekstrem telah memperparah kondisi iklim di negara tropis seperti Indonesia, yang ditandai dengan suhu udara tinggi, kelembaban relatif 70–90%, serta intensitas radiasi matahari hingga 1.200 W/m^2 (Bandh et al., 2021). Kondisi ini meningkatkan beban pendinginan bangunan dan ketergantungan terhadap sistem mekanis seperti *air conditioner (AC)* yang berkontribusi besar terhadap emisi karbon.



Gambar 1. Kawasan Summarecon Bogor

Gambar 1 Konsumsi Energi Sektor Bangunan di Indonesia Berdasarkan Penggunaan (Perbandingan Bangunan Konvensional vs. Potensi Penghematan dengan Integrasi Smart-Passive Design)

Profil konsumsi energi bangunan di iklim tropis menunjukkan karakteristik yang sangat berbeda dibandingkan dengan bangunan di iklim sedang, dimana sistem pendinginan menjadi komponen dominan yang mengonsumsi hampir dua pertiga dari total kebutuhan energi operasional. Disparitas yang signifikan antara konsumsi energi bangunan konvensional dengan potensi penghematan melalui integrasi smart technology dan desain pasif mengindikasikan ruang optimasi yang sangat besar dalam sektor ini. Analisis komparatif ini menunjukkan bahwa pendekatan terintegrasi dapat mengurangi beban pendinginan dan pencahayaan hingga 10%. Data ini menjadi dasar empiris yang kuat untuk justifikasi penelitian tentang formulasi integrasi yang dapat mengoptimalkan efisiensi energi tanpa mengorbankan kenyamanan termal penghuni dalam konteks iklim tropis Indonesia (Shiraiwa, 2023).



Sumber: Adaptasi dari laporan industri smart building dan IoT market research

Gambar 2. Trend Adopsi Smart Building Technology di Asia Tenggara dan Proyeksi Pertumbuhan Pasar Indonesia 2020-2030

Dinamika pasar smart building technology di kawasan Asia Tenggara menunjukkan trajectory pertumbuhan yang sangat menjanjikan, dengan Indonesia memperlihatkan potensi akselerasi yang paling tinggi dalam dekade mendatang.

Di sisi lain, konsep desain pasif telah lama dikenal sebagai pendekatan berkelanjutan dalam arsitektur yang memanfaatkan kondisi alam untuk mencapai kenyamanan termal tanpa ketergantungan pada sistem mekanis. Prinsip-prinsip desain pasif meliputi orientasi bangunan yang optimal, ventilasi silang alami, shading yang efektif, penggunaan material dengan properti termal yang sesuai, dan pemanfaatan pencahayaan alami (Khraishah et al., 2022). Untuk konteks iklim tropis, strategi desain pasif yang relevan mencakup maximizing cross ventilation, minimizing solar heat gain, optimizing building envelope performance, dan integration of natural cooling strategies. Pendekatan ini tidak hanya mengurangi konsumsi energi tetapi juga menciptakan lingkungan internal yang lebih sehat dan nyaman bagi penghuni dengan memanfaatkan potensi alam secara maksimal.

Sektor perumahan di Indonesia menyumbang sekitar 20,7% emisi karbon tidak langsung dan 3,8% emisi langsung (Rafly et al., 2023). Mayoritas bangunan tidak didesain secara responsif terhadap iklim tropis, sehingga efisiensi energi rendah. Di sisi lain, perkembangan *smart technology* seperti IoT, sensor pintar, dan *machine learning* membuka peluang baru untuk efisiensi energi melalui pengendalian otomatis. Namun, teknologi tersebut sering diterapkan terpisah dari prinsip desain pasif yang mengandalkan potensi alamiah untuk mencapai kenyamanan termal.

Integrasi kedua pendekatan ini menjadi urgensi utama dalam mewujudkan perumahan tropis yang tangguh terhadap perubahan iklim. Penelitian ini difokuskan pada pengembangan formulasi integrasi *smart technology* dan desain pasif dengan studi kasus di kawasan Summarecon Bogor. Tujuannya adalah menghasilkan model konseptual yang dapat menjadi acuan bagi pengembang dan perancang dalam membangun hunian berkelanjutan yang efisien energi dan ramah iklim tropis.

Kajian Pustaka

Karakteristik Iklim Tropis dan Tantangannya

Indonesia memiliki iklim tropis lembab dengan suhu rata-rata 26–28°C dan kelembaban tinggi (Ahmed, 2020). Fenomena *urban heat island* meningkatkan suhu hingga 5°C lebih tinggi di wilayah perkotaan dibandingkan pedesaan. Tantangan utama desain bangunan di wilayah tropis adalah pengendalian *solar heat gain*, ventilasi alami yang optimal, serta pengelolaan kelembaban (Chaudhry & Sidhu, 2021).

Smart Technology dalam Bangunan

Konsep *smart building* mengintegrasikan sensor lingkungan, sistem kontrol otomatis, dan algoritma adaptif untuk memantau serta menyesuaikan kondisi dalam bangunan (El-Sayed & Kamel, 2020). IoT berperan sebagai jaringan sensor yang merekam data suhu, kelembaban, dan konsumsi energi untuk kemudian diolah oleh sistem kontrol berbasis AI. Studi oleh Sigit Umar Anggono et al. (2023) menunjukkan bahwa penerapan sistem *smart HVAC* mampu menghemat energi hingga 42% dengan tingkat kepuasan pengguna mencapai 87%.

Desain Pasif untuk Iklim Tropis

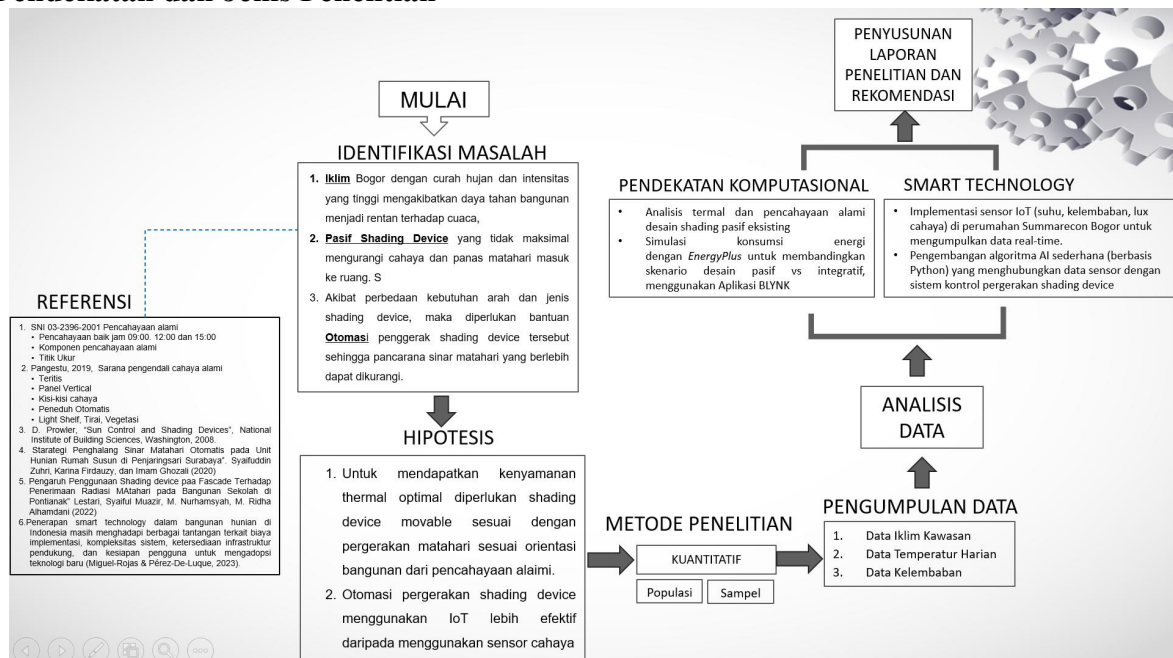
Desain pasif menitikberatkan pada penggunaan elemen alami seperti ventilasi silang, *passive shading*, dan pemilihan material berkapasitas panas tinggi (Hildayanti & Wasilah, 2022). Orientasi bangunan yang tepat pada sumbu utara-selatan dapat mengurangi beban pendinginan hingga 25% (Lingkungan & Perkotaan, 2021). Ventilasi silang meningkatkan pertukaran udara, sedangkan *cool roof* dan vegetasi menurunkan suhu permukaan hingga 9°C (Yang et al., 2018).

Penelitian Terdahulu dan Celah Penelitian

Berbagai penelitian membuktikan efektivitas teknologi pintar maupun desain pasif secara terpisah. Namun, integrasi keduanya masih jarang dilakukan, terutama di konteks tropis. Muslim (2021) menunjukkan bahwa kombinasi strategi pasif dan *smart control* menurunkan konsumsi energi sebesar 48%. Priono et al. (2022) mengonfirmasi bahwa *smart natural ventilation* mampu meningkatkan kenyamanan hingga 78% waktu operasi. Meskipun demikian, belum ada model integratif yang sistematis untuk konteks sosial-ekonomi dan iklim Indonesia.

METODE

Pendekatan dan Jenis Penelitian



Gambar 4. Tahapan Penelitian

Lokasi dan Waktu Penelitian

Pemilihan Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan di area Summarecon Bogor, di Jawa Barat, yaitu kota yang memiliki suhu temperatur wilayah tropis rata-rata yaitu 18-33 drajat celcius, kelembaban udara 70 %, curah hujan rata-rata setiap tahun sekitar 3.500 – 4.000 mm , dan kecepatan angin 4-8 km/h [BMKG 23/10/2024].

Temporal Framework

Tabel 1. Temporal Framewrok

NO	PENELITIAN	2025												2026			
		OKT				NOV				DES				JAN			
		W1	W2	W3	W4	W1	W2	W3	W4	W1	W2	W3	W4	W1	W2	W3	W4
1	STUDY PUSTAKA	■															
2	PENGAMBILAN DATA PENELITIAN		■	■	■	■	■	■	■								
3	ANALISIS DATA					■	■	■	■								
4	PENYUSUNAN LAPORAN PENELITIAN								■	■	■	■	■				
5	PEMBUATAN LAPORAN PENELITIAN								■	■	■	■	■	■	■	■	■

Populasi dan Sampel

Pengukuran cahaya alami dilakukan selama 1 bulan (1 Oktober – 30 Oktober 2025) menggunakan alat ukur lux meter di Summarecon Bogor. Pemilihan lokasi penelitian hunian berdasarkan rumus Slovin, dari total 277 unit hunian diambil sampel sebanyak 74 unit.

Adapun spesifik area pengambilan data lux atau cahaya alami adalah di ruangan tempat tidur utama lantai dua, dengan parameter (1) Kondisi ruangan kosong tidak ada *furniture*. (2) Kondisi jendela terbuka tanpa ada tirai. (3) Waktu pengambilan interval jam 07:00 hingga 16:00.

Pengukuran besaran cahaya alami dilakukan terhadap beberapa orientasi atau hadapan bangunan, yaitu fasad bangunan menghadap Barat Laut, Timur Laut, Tenggara, Barat Daya. Adapun Jumlah unit pengamatan berdasarkan arah hadapan fasad bangunan adalah ; hadap Barat Daya 40 Unit, hadap Timut Laut 30 Unit, hadap Tenggara 2 Unit, dan hadap Barat Laut 2 Unit. Penelitian hadap tenggara dan Barat Laut hanya 2 unit karena sudah beberapa unit diserahterimakan kepada konsumen, sehingga peneliti tiddak bisa masuk ke unit tersebut.

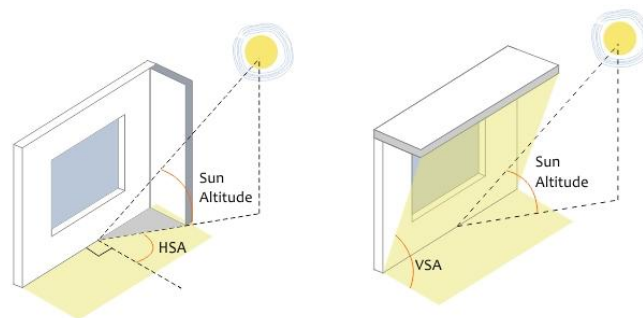
Teknik Pengumpulan Data

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan pendekatan observasi dan eksperimen yang berlandaskan pada filsafat positivisme. Metode ini bertujuan untuk meneliti hubungan sebab-akibat antara variabel independen dan dependen melalui proses pengukuran terkontrol dan analisis statistik. Pendekatan ini memungkinkan peneliti menggambarkan fenomena secara objektif serta menguji hipotesis yang telah ditetapkan. Pengumpulan data dilakukan dengan mengambil data real time dengan mengambil data pancaran sinar alami (lux) dan data lain sebagai penunjang yaitu kelembabab dan termal. Pengumpulan data dilakukan melalui sistem monitoring kinerja bangunan berbasis Internet of Things (IoT) yang merekam data secara real-time mengenai kondisi termal, energi, dan lingkungan. Instrumen yang digunakan meliputi *smart meter* untuk mengukur konsumsi energi bangunan, sistem *sub-metering* untuk memisahkan penggunaan energi pada pencahayaan, suhu udara, kelembaban relatif. Data yang diperoleh dianalisis secara kuantitatif untuk menilai efisiensi energi dan kenyamanan termal sebagai dasar evaluasi efektivitas integrasi antara *smart technology* dan desain pasif pada bangunan tropis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kondisi Mikroklimat dan Analisis Awal

Penelitian dilakukan pada 74 unit rumah representatif dengan orientasi bangunan yang berbeda, yaitu bangunan menghadap Barat Laut, Timur Laut, Tenggara, Barat Daya.



Gambar 3. Sudut Pancaran Sinar Alami

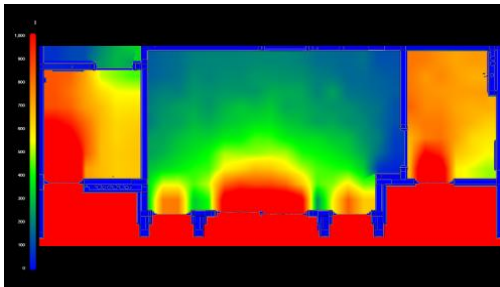
Bangunan Menghadap Barat Laut, memiliki karakteristik ruangan tidur lantai dua tidak menerima pancaran cahaya matahari langsung dari terbit matahari hingga pukul 12:00 siang hari. Cahaya alami mulai masuk menyinari ruangan tersebut pada jam 13:00 hingga jam 17:00. Besaran pancaran cahaya alami pada pukul 07.00 sebesar 1.230–1.242 lm/m^2 . Sedangkan pada siang hari besaran pancaran cahaya alami pada jam 14:00 adalah 1,521 lm/m^2 hingga 1,523 lm/m^2 . Terjadi peningkatan 300 lm/m^2 dari pagi hari hingga siang hari. Sedangkan sudut datang sinar matahari horisontal (HSA) pada siang hari jam 15:00 adalah 28 derajat, tidak terjadi perubahan sudut pancaran matahari karena pada garis orbit. Sudut datang matahari vertikal (VSA) pada jam 15:00 adalah 45 derajat, terjadi perubahan sudut datang matahari 15 derajat setiap jam nya.

Bangunan Menghadap Tenggara, memiliki karakteristik ruangan tidur lantai dua tidak menerima pancaran cahaya matahari langsung dari pukul 12:00 siang hari hingga sore hari . Cahaya alami mulai masuk menyinari ruangan tersebut pada jam 07:00 hingga jam 12:00. Besaran pancaran cahaya alami pada jam 12:00 adalah 1,136 lm/m^2 hingga 1,141 lm/m^2 . Sedangkan pada siang hari besaran pancaran cahaya alami pada jam 15:00 adalah 1,241 lm/m^2 hingga 1,246 lm/m^2 . Terjadi peningkatan 100 lm/m^2 dari pagi hari hingga siang hari. Sedangkan sudut datang sinar matahari horisontal (HSA) pada pagi hari jam 07:00 adalah 18 derajat, tidak terjadi perubahan sudut pancaran matahari karena pada garis orbit. Sudut datang matahari vertikal (VSA) pada jam 07:00 adalah 23 derajat, jam 08:00 adalah 35 derajat. Dan pada jam 09:00 sudah tidak ada pancaran cahaya alami yang masuk langsung ke kamar tidur lantai dua.

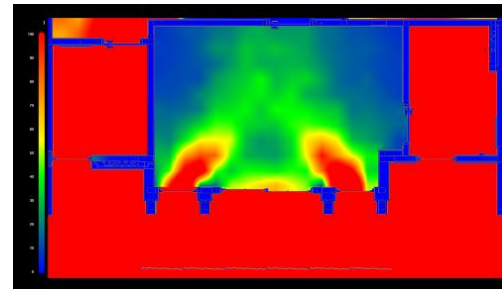
Bangunan Menghadap Timut Laut, memiliki karakteristik ruangan tidur lantai dua tidak menerima pancaran cahaya matahari langsung dari pukul 12:00 siang hari hingga sore hari . Cahaya alami mulai masuk menyinari ruangan tersebut pada jam 07:00 hingga jam 12:00. Besaran pancaran cahaya alami pada jam 12:00 adalah 1,409 lm/m^2 hingga 1,415 lm/m^2 . Sedangkan pada siang hari besaran pancaran cahaya alami pada jam 15:00 adalah 1,219 lm/m^2 hingga 1,223 lm/m^2 . Terjadi penurunan 200 lm/m^2 dari pagi hari hingga sore hari. Sedangkan sudut datang sinar matahari horisontal (HSA) pada pagi hari jam 07:00 adalah 28 derajat, tidak terjadi perubahan sudut pancaran matahari karena pada garis orbit. Sudut datang matahari vertikal (VSA) pada jam 07:00 adalah 45 derajat, dan pada jam 08:00 sudah tidak ada pancaran cahaya alami yang masuk langsung ke kamar tidur lantai dua.

Bangunan Menghadap Barat Daya, memiliki karakteristik ruangan tidur lantai dua tidak menerima pancaran cahaya matahari langsung dari pukul 06:00 siang hari hingga jam 12:00 . Cahaya alami mulai masuk menyinari ruangan tersebut pada jam 13:00 hingga jam 18:00. Besaran pancaran cahaya alami pada jam 12:00 adalah 695 lm/m^2 hingga 707 lm/m^2 . Sedangkan pada siang hari besaran pancaran cahaya alami pada jam 15:00 adalah 706 lm/m^2

hingga 713 lm/m^2 . Terjadi peningkatan 10 lm/m^2 dari pagi hari hingga sore hari. Sedangkan sudut datang sinar matahari horisontal (HSA) pada sore hari jam 15:00 adalah 28 derajat, tidak terjadi perubahan sudut pancaran matahari karena pada garis orbit. Sudut datang matahari vertikal (VSA) pada jam 15:00 adalah 45 derajat.



Gambar 4. Sinar Alami tanpa shading



Gambar 5. Sinar Alami tanpa shading

Pada simulasi shading device menggunakan program Velux untuk mendapatkan besaran pancaran sinar matahari dengan simulasi tanpa menggunakan shading device dan dengan menggunakan shading device pada facade bangunan.

Hasil pada simulasi program Velux, untuk bangunan hadap Tenggara, besaran pancaran sinar alami pada jam 10:00 adalah 1,194 lm/m^2 . Sedangkan jika menggunakan shading device maka besaran pancaran cahaya alami adalah 271 lm/m^2 . Pada simulasi sinar alami pada jam 14:00 adalah 1,991 lm/m^2 . Sedangkan jika menggunakan shading device maka besaran pancaran cahaya alami adalah 476 lm/m^2 . Dari hasil simulasi maka terjadi penurunan pancaran sinar alami akibat shading device yaitu sebesar 78%.

Hasil pada simulasi program Velux, untuk bangunan hadap Barat Laut, besaran pancaran sinar alami pada jam 10:00 adalah 1,126 lm/m^2 . Sedangkan jika menggunakan shading device maka besaran pancaran cahaya alami adalah 256 lm/m^2 . Pada simulasi sinar alami pada jam 14:00 adalah 2,045 lm/m^2 . Sedangkan jika menggunakan shading device maka besaran pancaran cahaya alami adalah 487 lm/m^2 . Dari hasil simulasi maka terjadi penurunan pancaran sinar alami akibat shading device yaitu sebesar 77%.

Hasil pada simulasi program Velux, untuk bangunan hadap Timur Laut, besaran pancaran sinar alami pada jam 10:00 adalah 2,021 lm/m^2 . Sedangkan jika menggunakan shading device maka besaran pancaran cahaya alami adalah 535 lm/m^2 . Pada simulasi sinar alami pada jam 14:00 adalah 1,095 lm/m^2 . Sedangkan jika menggunakan shading device maka besaran pancaran cahaya alami adalah 278 lm/m^2 . Dari hasil simulasi maka terjadi penurunan pancaran sinar alami akibat shading device yaitu sebesar 78%.

Hasil pada simulasi program Velux, untuk bangunan hadap Barat Daya, besaran pancaran sinar alami pada jam 10:00 adalah 2,070 lm/m^2 . Sedangkan jika menggunakan shading device maka besaran pancaran cahaya alami adalah 469 lm/m^2 . Pada simulasi sinar alami pada jam 14:00 adalah 1.176 lm/m^2 . Sedangkan jika menggunakan shading device maka besaran pancaran cahaya alami adalah 276 lm/m^2 . Dari hasil simulasi maka terjadi penurunan pancaran sinar alami akibat shading device yaitu sebesar 77%.

Dari simulasi yang dilakukan dengan berbagai orientasi bangunan, maka terjadi penurunan sinar alami yang menuju ruangan tidur lantai dua sebesar 77-78% akibat penggunaan shading device.

Hasil pengukuran lapangan pada kawasan studi di Summarecon Bogor menunjukkan suhu udara rata-rata harian berkisar antara 26,8°C–32,4°C, dengan kelembaban relatif 73–88%, kecepatan angin rata-rata 1,2–2,1 m/s, dan intensitas radiasi matahari mencapai 1.120 W/m^2 pada siang hari. Kondisi ini menggambarkan karakteristik tipikal iklim tropis lembab yang menuntut strategi arsitektur adaptif untuk mengurangi *thermal load* dan konsumsi energi pendinginan. Pengukuran *microclimate* dilakukan selama 14 hari berturut-turut

menggunakan *data logger* suhu dan kelembaban, yang dikalibrasi dengan standar ASHRAE 55 (2021).

Data menunjukkan bahwa perumahan modern di kawasan ini cenderung memiliki kinerja termal yang kurang optimal akibat dominasi permukaan kaca, kurangnya ventilasi silang, serta orientasi bangunan yang tidak mempertimbangkan arah matahari. Hal ini menyebabkan suhu ruang dalam dapat mencapai 34°C pada siang hari, meningkatkan beban pendinginan dan konsumsi listrik sebesar 22–28% dibandingkan kondisi ideal.

Simulasi Komputasional: Desain Pasif dan Smart System

Analisis dilakukan melalui dua perangkat simulasi utama, yaitu *Computational Fluid Dynamics (CFD)* dan *EnergyPlus*.

1. Simulasi CFD digunakan untuk menganalisis pola sudut datang sinar alami dari rentang waktu, setelah terpola sudut datang dan waktu maka di buat simulasi shading device yang tepat.
2. Posisi shading device sesuai pola sudut dan waktu diintegrasikan dengan IoT untuk sistem kendali jarak jauh

Integrasi algoritma kontrol berbasis prediksi cuaca dan data sensor real-time memungkinkan sistem menyesuaikan pengoperasian shading device otomatis secara adaptif terhadap kondisi lingkungan aktual.

Kinerja Smart Technology dan Sistem IoT

Sistem IoT dikembangkan dengan jaringan sensor suhu, kelembaban, dan intensitas cahaya yang dihubungkan ke *microcontroller* ESP32 dan dikendalikan melalui *Blynk Dashboard*. Sistem ini memantau kondisi lingkungan setiap 5 detik dan mengirimkan data ke *cloud database* untuk dianalisis secara temporal.

Analisis Ekonomi dan Keberlanjutan

Dari aspek ekonomi, penerapan sistem integratif membutuhkan biaya investasi tambahan dibanding desain konvensional, terutama untuk pemasangan sensor, sistem kontrol, dan perangkat IoT. Namun, analisis *life cycle cost (LCC)* menunjukkan periode pengembalian investasi (*return on investment*) antara 3–5 tahun, berkat penghematan energi listrik per tahun.

Integrasi ini selaras dengan tujuan pembangunan berkelanjutan (SDGs), khususnya: SDG 7 (*Affordable and Clean Energy*) melalui efisiensi energi, SDG 11 (*Sustainable Cities and Communities*) melalui desain adaptif, dan SDG 13 (*Climate Action*) melalui mitigasi emisi karbon sektor perumahan.

Pembahasan Konseptual: Sinergi Desain Pasif dan Smart System

Secara konseptual, integrasi desain pasif dan *smart technology* menghasilkan hubungan saling melengkapi. Strategi pasif mengurangi beban panas dan memaksimalkan potensi lingkungan alami, sementara teknologi pintar berfungsi sebagai sistem adaptif yang menyesuaikan perilaku bangunan terhadap dinamika iklim harian.

Pada level teknis, sistem kontrol berbasis AI dan IoT berperan sebagai “otak bangunan”, yang memonitor kondisi lingkungan dan mengatur respon termal secara otomatis. Pada level arsitektural, strategi pasif berfungsi sebagai “tubuh bangunan” yang membentuk kondisi termal dasar. Ketika kedua elemen ini terintegrasi, bangunan mampu beradaptasi secara dinamis terhadap kondisi iklim, menciptakan performa yang stabil dan efisien.

Dengan demikian, penelitian ini membuktikan bahwa pendekatan *smart-passive hybrid design* merupakan solusi strategis bagi perumahan tropis masa depan menggabungkan efisiensi teknologi, kearifan arsitektur tropis, dan prinsip keberlanjutan lingkungan.

KESIMPULAN

Kesimpulan

Penelitian ini menegaskan bahwa integrasi antara desain shading device dan *smart technology* mampu menciptakan perumahan tropis yang efisien energi, adaptif, dan berkelanjutan. Hasil simulasi dan implementasi menunjukkan penurunan konsumsi energi melalui optimalisasi *shading device* adaptif, serta pencahayaan alami yang dikombinasikan dengan sistem kontrol berbasis IoT. Dukungan algoritma prediktif dan sistem monitoring real-time juga terbukti meningkatkan kenyamanan termal penghuni meskipun menghadapi fluktuasi iklim ekstrem. Selain efisiensi energi, model integrasi ini berpotensi menekan emisi karbon dan memperpanjang usia bangunan, sekaligus memberikan kontribusi teoritis berupa kerangka konseptual *smart-passive* yang relevan bagi iklim tropis Indonesia.

Saran

1. Bagi pengembang perumahan, penerapan integrasi *shading device* dan teknologi pintar sebaiknya dilakukan sejak tahap perencanaan agar tata letak, orientasi, dan material bangunan dapat disinergikan dengan sistem IoT dan sensor kontrol untuk efisiensi maksimal.
2. Bagi pemerintah, diperlukan regulasi dan insentif yang mendorong penerapan *smart technology* dalam standar bangunan hijau, termasuk pelatihan teknis bagi tenaga konstruksi.
3. Bagi masyarakat, peningkatan literasi teknologi dan kesadaran akan manfaat sistem *smart-passive* penting untuk menjaga keberlanjutan dan efisiensi jangka panjang.
4. Bagi akademisi, penelitian lanjutan dapat difokuskan pada pengembangan model bisnis inklusif dan kajian sosial budaya untuk memperluas penerimaan teknologi ini di berbagai segmen masyarakat.
5. Bagi industri teknologi dan konstruksi, kolaborasi diperlukan untuk menciptakan perangkat IoT dan material bangunan yang tahan terhadap kondisi iklim tropis, mudah digunakan, serta terjangkau bagi berbagai lapisan masyarakat.

REFERENSI

- Ahmed, M. (2020). Introduction to Modern Climate Change. Andrew E. Dessler: Cambridge University Press, 2011, 252 pp, ISBN-10: 0521173159. *The Science of the Total Environment*, 734, 139397. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139397>
- Chaudhry, S., & Sidhu, G. (2021). Climate change regulated abiotic stress mechanisms in plants: a comprehensive review. *Plant Cell Reports*, 41, 1–31. <https://doi.org/10.1007/s00299-021-02759-5>
- El-Sayed, A., & Kamel, M. (2020). Climatic changes and their role in emergence and re-emergence of diseases. *Environmental Science and Pollution Research International*, 27, 22336–22352. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08896-w>
- Hildayanti, A., & Wasilah. (2022). Pendekatan Arsitektur Bioklimatik Sebagai Bentuk Adaptasi Bangunan Terhadap Iklim. *Nature: National Academic Journal of Architecture*, 9(1), 29–41. <https://doi.org/10.24252/nature.v9i1a3>
- Khraishah, H., Alahmad, B., Ostergard, R., AlAshqar, A., Albaghdadi, M., Vellanki, N., Chowdhury, M., Al-Kindi, S., Zanobetti, A., Gasparrini, A., & Rajagopalan, S. (2022). Climate change and cardiovascular disease: implications for global health. *Nature Reviews Cardiology*, 19, 798–812. <https://doi.org/10.1038/s41569-022-00720-x>
- Lingkungan, R., & Perkotaan, D. I. (2021). Penerapan prinsip arsitektur hijau pada desain permukiman ramah lingkungan di perkotaan. 618–632.
- Muslim, S. (2021). EnergyPlus-Towards the Selection of Right Simulation Tool for Building Energy and Power Systems Research. *Journal of Energy and Power Technology*, 03, 1. <https://doi.org/10.21926/jept.2103034>

- Priono, A., Sukur, M., & Putro, D. S. (2022). Rancang Bangun Mini Smart Greenhouse Hidroponik Tipe Rakit Apung Berbasis IoT untuk Memenuhi Kebutuhan Praktikum di Laboratorium Teknik Tata Air. *Jurnal Pengembangan Potensi Laboratorium*, 1(1), 22–26. <https://doi.org/10.25047/plp.v1i1.3010>
- Rafly, M., Maulana, A., Deskar, D., Rahman, A. F., Ramadhan, I. F., Adha, A., & Attala, V. D. (2023). Analysis of the Effects of Globalization and Climate Change on a Sustainable Indonesian Economy. *Publiciana*, 16(1), 25–32.
- Shiraiwa, M. (2023). Facing Global Climate and Environmental Change. *ACS Environmental Au*, 3, 121–122. <https://doi.org/10.1021/acsenvironau.3c00014>
- Sigit Umar Anggono, Edy Siswanto, Laksamana Rajendra Haidar Azani Fajri, & Munifah. (2023). User Interface Berbasis Web Pada Perangkat Internet Of Things. *Teknik: Jurnal Ilmu Teknik Dan Informatika*, 3(1), 35–54. <https://doi.org/10.51903/teknik.v3i1.326>
- Sippel, S., Meinshausen, N., Fischer, E., Székely, E., & Knutti, R. (2020). Climate change now detectable from any single day of weather at global scale. *Nature Climate Change*, 10, 35–41. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0666-7>