

ANALISIS SENSITIVITAS DESAIN PENCAHAYAAN ALAMI PADA RUANG KELAS DI KAWASAN URBAN PADAT BERIKLIM TROPIS

Putri Sri Alisia Nabila¹, Atthaillah², Sisca Olivia³

[¹](mailto:putri.210160040@mhs.unimal.ac.id), [²](mailto:atthalilah@unimal.ac.id), [³](mailto:sisca.olivia@unimal.ac.id)

Universitas Malikussaleh

ABSTRAK

Pencahayaan alami merupakan elemen penting dalam menciptakan lingkungan belajar yang sehat dan produktif. Namun, penerapannya di kawasan urban padat beriklim tropis menghadapi tantangan kompleks akibat tingginya kepadatan bangunan dan keterbatasan ruang. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi variabel desain yang memiliki sensitivitas tinggi terhadap performa pencahayaan alami ruang kelas serta mengevaluasi pengaruh konteks bangunan sekitar terhadap sensitivitas variabel tersebut. Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental berbasis simulasi digital dengan Ladybug Tools dan validasi model maket skala 1:10. Sepuluh variabel desain dianalisis menggunakan metode Latin Hypercube Sampling (LHS) dengan 1.000 sampel simulasi, meliputi kedalaman peneduh (X_1, X_2), elevasi peneduh (X_3, X_4), WWR (X_5, X_6), jarak konteks (X_7, X_8), dan tinggi konteks (X_9, X_{10}). Metrik pencahayaan yang dievaluasi mencakup ASE, sDA, dan aUDI. Analisis sensitivitas menggunakan Standardized Regression Coefficient (SRC). Hasil analisis menunjukkan bahwa WWR selatan (X_6) dan WWR utara (X_5) memiliki pengaruh paling signifikan terhadap seluruh metrik pencahayaan dengan nilai SRC tertinggi, diikuti oleh kedalaman peneduh selatan (X_2). Sebaliknya, variabel jarak dan tinggi konteks bangunan (X_7-X_{10}) menunjukkan nilai sensitivitas yang sangat rendah (mendekati 0), mengindikasikan bahwa keberadaan konteks bangunan di sekitar ruang kelas tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap pencahayaan alami. Hasil validasi model menunjukkan tingkat akurasi memadai dengan nilai RMSE 15,56%–16,76%. Optimasi desain pencahayaan alami di kawasan urban padat beriklim tropis sebaiknya difokuskan pada pengaturan WWR dan dimensi peneduh, sementara variabel konteks dapat menjadi pertimbangan sekunder dalam proses desain.

Kata Kunci: Pencahayaan Alami, Analisis Sensitivitas, Window-To-Wall Ratio (WWR).

PENDAHULUAN

Pencahayaan alami memainkan peran penting dalam menciptakan lingkungan belajar yang sehat, nyaman, dan produktif (Iskandar et al., 2022). Dalam konteks ruang kelas, pencahayaan alami tidak hanya mendukung aktivitas visual siswa, tetapi juga berdampak positif terhadap performa belajar dan kesehatan psikologis. Standar kenyamanan visual di ruang kelas yang dikembangkan oleh Illuminating Engineering Society (IES) menggarisbawahi pentingnya pencahayaan alami dengan tingkat iluminansi minimal 300 lux dan distribusi cahaya yang merata (IES, 2023).

Namun demikian, penerapan pencahayaan alami di ruang kelas menghadapi tantangan kompleks di kawasan urban padat. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (2023), tingkat urbanisasi Indonesia mencapai 57,3% dan diproyeksikan terus meningkat, yang mengakibatkan kepadatan bangunan yang semakin tinggi di pusat-pusat kota. Kondisi ini menjadi tantangan utama dalam penerapan pencahayaan alami, khususnya di lingkungan sekolah. Bangunan sekolah yang berada di tengah lingkungan padat sering kali terhalang oleh bangunan lain yang lebih tinggi, sehingga mengurangi intensitas cahaya alami yang masuk ke dalam ruang kelas (Ekasiwi et al., 2020).

Indonesia yang terletak di wilayah ekuator memiliki karakteristik iklim tropis dengan intensitas sinar matahari yang cukup besar sepanjang tahun. Karakteristik ini memberikan tantangan tersendiri dalam perancangan pencahayaan alami untuk ruang kelas. Salah satu tantangan utama dalam iklim tropis adalah pengendalian terhadap kondisi panas berlebih

dan silau. Cahaya matahari yang intens dapat menimbulkan peningkatan suhu dalam ruang kelas, yang berdampak negatif terhadap kenyamanan termal siswa (Ekasiwi et al., 2020).

Penelitian yang dilakukan oleh Atthaillah et al. (2025) menjadi acuan utama dalam penelitian ini karena secara langsung membahas analisis sensitivitas dan optimasi desain fasad terhadap performa pencahayaan alami pada ruang kelas di wilayah beriklim tropis. Meskipun penelitian tersebut telah memberikan kontribusi signifikan, masih terdapat beberapa keterbatasan yang perlu dikembangkan lebih lanjut, terutama terkait kondisi dengan multiple bangunan berdekatan dan analisis variabel kontekstual urban yang lebih luas.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengisi gap tersebut dengan melakukan analisis sensitivitas komprehensif terhadap elemen-elemen desain pencahayaan alami di ruang kelas pada kawasan urban padat beriklim tropis. Penelitian ini akan mengembangkan pemahaman yang lebih mendalam mengenai interaksi multi-variabel dalam pencahayaan alami dan menghasilkan hierarki sensitivitas yang dapat menjadi panduan praktis bagi perancang.

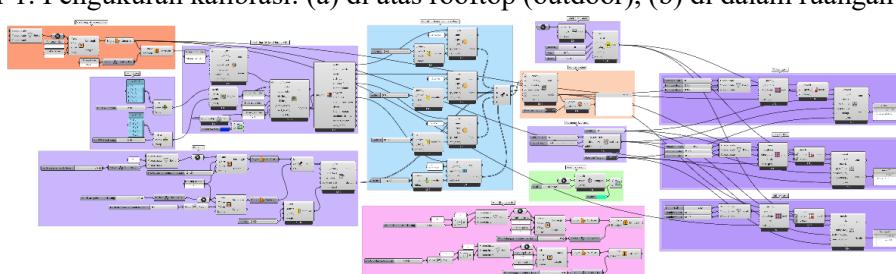
METODE PENELITIAN

1. Pendekatan Penelitian

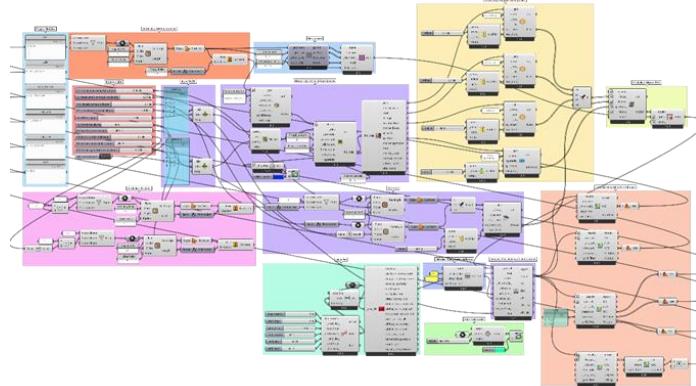
Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental berbasis simulasi digital dan pemodelan fisik. Simulasi dilakukan dengan menggunakan Grasshopper dan Rhinoceros yang terintegrasi dengan Ladybug Tools sebagai engine utama untuk analisis pencahayaan alami. Pemodelan fisik (maket) digunakan sebagai bagian dari proses validasi terhadap model digital dengan skala 1:10.



Gambar 1. Pengukuran kalibrasi: (a) di atas rooftop (outdoor), (b) di dalam ruangan (indoor)



Gambar 2. Rangkaian Proses Simulasi Validasi Penelitian di Grasshopper



Gambar 3. Rangkaian Proses Simulasi Penelitian di Grasshopper

2. Lokasi dan Objek Penelitian

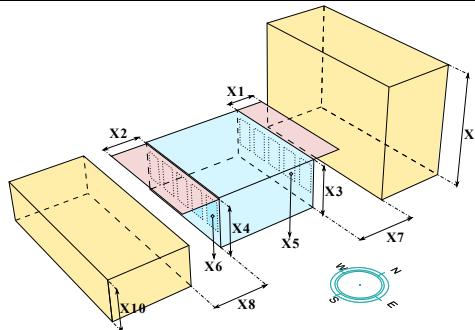
Penelitian dilaksanakan di Kota Lhokseumawe, khususnya Kecamatan Banda Sakti yang memiliki karakteristik kawasan urban padat. Objek penelitian adalah ruang kelas dengan dimensi standar $7 \times 8 \times 3,5$ m mengacu pada Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Nomor 24 Tahun 2007. Orientasi bangunan yang digunakan adalah utara-selatan, dimana fasad terpanjang ruang kelas menghadap ke arah utara dan selatan.

3. Variabel Penelitian

Penelitian ini melibatkan sepuluh variabel bebas (independen) dan enam variabel terikat (dependen). Variabel bebas meliputi:

Tabel 1. Variabel bebas penelitian

Variabel Input	Simbol	Unit	Rentang	Langkah	Jumlah data
Kedalaman peneduh utara	X ₁	m	1 m – 2,5 m	0,25	7
Kedalaman peneduh selatan	X ₂	m	1 m – 2,5 m	0,25	7
Ketinggian elevasi peneduh utara	X₃	m	2,7 m – 3,5 m	0,1	9
Ketinggian elevasi peneduh selatan	X ₄	m	2,7 m – 3,5 m	0,1	9
WWR utara	X ₅	%	10% - 50%	10%	5
WWR selatan	X ₆	%	10% - 50%	10%	5
Jarak konteks utara	X ₇	m	1 m – 4 m	0,5	7
Jarak konteks selatan	X ₈	m	1 m – 4 m	0,5	7
Tinggi konteks utara	X ₉	m	2 m – 8 m	0,5	14
Tinggi konteks selatan	X ₁₀	m	2 m – 8 m	0,5	14



Gambar 4. Visualisasi Variabel bebas untuk Simulasi Pencahayaan Alami pada Ruang Kelas

Variabel terikat meliputi metrik pencahayaan: Annual Sunlight Exposure (ASE), Spatial Daylight Autonomy (sDA), dan Average Useful Daylight Illuminance (aUDI) dalam berbagai rentang.

4. Pengambilan Sampel

Pengambilan sampel dilakukan menggunakan metode Latin Hypercube Sampling (LHS) dengan 1.000 sampel simulasi. Metode ini dipilih untuk menghasilkan distribusi data yang menyeluruh dalam ruang parameter yang diteliti dengan tetap menjaga efisiensi jumlah skenario yang disimulasikan.

5. Validasi Model

Validasi model dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi digital dengan hasil pengukuran pada model maket fisik menggunakan metode Root Mean Square Error (RMSE). Pengukuran dilakukan pada tiga titik sensor internal dengan menggunakan logger BH1750 Light Sensor selama 14 hari (5–18 Agustus 2025).

6. Analisis Data

Analisis sensitivitas menggunakan metode Standardized Regression Coefficient (SRC) melalui regresi linier berganda terstandardisasi. Metode ini dipilih karena mampu memberikan gambaran kuantitatif mengenai tingkat sensitivitas masing-masing variabel dalam skala yang seragam, sehingga dapat dibandingkan secara langsung meskipun setiap variabel memiliki rentang dan satuan yang berbeda.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Kalibrasi Dan Validasi Model

Proses kalibrasi dilakukan untuk memastikan akurasi alat ukur logger BH1750 dengan membandingkannya terhadap digital lux meter SW-582 yang telah tersertifikasi. Pengukuran dilakukan di ruang luar (rooftop) dan ruang dalam selama tujuh hari (23–29 Juli 2025) dengan interval 1 jam dari pukul 08.00 hingga 17.00 WIB. Hasil kalibrasi menunjukkan tingkat kesalahan (error) yang sangat rendah, berkisar antara 2,51% hingga 2,55%, jauh di bawah ambang batas toleransi 10% yang ditetapkan.

Validasi model dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi digital dengan pengukuran pada model maket fisik. Hasil validasi menunjukkan tingkat akurasi yang memadai dengan nilai RMSE berkisar antara 15,56% hingga 16,76%, yang masih berada dalam batas toleransi ASHRAE Guideline 14-2014 ($\text{RMSE} < 30\%$ untuk data harian). Perbandingan statistik deskriptif antara pengukuran lapangan dan simulasi digital disajikan pada Tabel 1.

Tabel 2. Statistik Deskriptif Hasil Pengukuran Lapangan

Parameter	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3
Rata-rata (lux)	213,79	243,99	223,71
Maksimum (lux)	373	455	398
Minimum (lux)	48	61	56
Standar Deviasi	77,24	81,96	73,50

Tabel 3. Statistik Deskriptif Hasil Simulasi Digital

Parameter	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3
Rata-rata (lux)	243,28	275,49	253,92
Maksimum (lux)	429,15	518,85	440,16
Minimum (lux)	53,77	66,98	60,90
Standar Deviasi	83,95	89,12	79,61

Tabel 4. Hasil Perhitungan Validasi Model

Parameter	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3
MBE (lux)	29,49	31,50	30,21
MBE (%)	13,79	12,91	13,50
RMSE (lux)	35,84	37,96	36,18
RMSE (%)	16,76	15,56	16,17

Karakteristik Sampel Penelitian

Proses LHS berhasil menghasilkan 1.000 sampel yang merepresentasikan kombinasi parameter desain bangunan secara merata. Analisis distribusi menunjukkan bahwa semua variabel memiliki sebaran yang relatif merata pada rentangnya masing-masing, tanpa adanya pemusatan nilai pada titik tertentu. Hal ini mengindikasikan bahwa metode LHS telah bekerja dengan baik dalam mendistribusikan sampel secara merata di seluruh rentang

nilai variabel.

Statistik deskriptif variabel input menunjukkan bahwa nilai rata-rata dan median dari seluruh variabel memiliki perbedaan yang sangat kecil, mengindikasikan distribusi data yang relatif simetris. Sebagai contoh, pada variabel X1 (Kedalaman Peneduh Utara), nilai rata-rata sebesar 1,757 dan median sebesar 1,75 menunjukkan distribusi yang baik tanpa kecondongan yang ekstrem.

Hasil Simulasi Pencahayaan Alami

Simulasi pencahayaan alami dilakukan terhadap 1.000 sampel kombinasi desain dengan menggunakan data cuaca Kota Lhokseumawe dalam format EPW. Hasil simulasi menunjukkan variasi yang cukup luas pada setiap metrik pencahayaan. Tabel 2 menyajikan statistik deskriptif dari hasil simulasi untuk keenam variabel output.

Tabel 5. Statistik Deskriptif Hasil Simulasi Pencahayaan Alami

Variabel	Rata-rata	Median	Std Dev	Min	Max	Rentang
ASE (Y1)	3.63687	2.68	3.185786	0	18.75	18.75
sDA (Y2)	99.96384	100	0.228814	98.21429	100	1.785714
aUDI ₁₀₀₋₃₀₀₀ (Y3)	96.1587	97.60781	3.659796	65.58094	98.84978	33.26884
aUDI _{<100} (Y4)	20.29806	13.51882	17.26379	5.056786	81.71268	76.65589
aUDI _{>3000} (Y5)	3.815977	2.826005	3.261329	0.41567	18.60446	18.18879
aUDI ₂₅₀₋₇₅₀ (Y6)	75.92039	83.75993	20.42881	1.153393	94.52781	93.37442

Nilai sDA yang sangat tinggi (rata-rata 99,96%) menunjukkan bahwa hampir seluruh area dalam ruang kelas mendapatkan pencahayaan alami yang mencukupi selama lebih dari 50% waktu aktif dalam setahun. Nilai ASE yang rendah (rata-rata 3,64%) mengindikasikan bahwa risiko silau akibat sinar matahari langsung tergolong minim dan masih berada di bawah ambang batas yang disarankan oleh LEED (tidak lebih dari 10%).

Analisis Sensitivitas Variabel Desain

Analisis sensitivitas dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh relatif dari sepuluh variabel desain terhadap enam metrik pencahayaan alami menggunakan metode SRC. Hasil analisis menunjukkan pola yang konsisten di mana WWR (X5 dan X6) muncul sebagai variabel paling berpengaruh terhadap seluruh metrik pencahayaan.

Sensitivitas terhadap ASE

Untuk metrik ASE, variabel X6 (WWR selatan) menunjukkan pengaruh paling signifikan dengan nilai SRC mendekati 0,75, mengindikasikan bahwa semakin besar bukaan jendela selatan, semakin tinggi potensi terjadinya paparan cahaya matahari langsung yang berlebihan. Variabel X2 (kedalaman peneduh selatan) menunjukkan pengaruh negatif yang signifikan, artinya peningkatan kedalaman peneduh dapat mengurangi nilai ASE secara efektif.

Sensitivitas terhadap sDA

Pada metrik sDA, variabel X5 (WWR utara) dan X6 (WWR selatan) kembali menjadi variabel dominan dengan nilai SRC tertinggi, mengindikasikan bahwa peningkatan luasan bukaan sangat berkontribusi dalam pencapaian distribusi pencahayaan alami yang memadai. Variabel lain seperti X4 (ketinggian peneduh selatan) dan X7 (jarak konteks selatan) menunjukkan nilai SRC yang hampir mendekati 0, mengindikasikan pengaruh yang lemah atau tidak signifikan terhadap sDA.

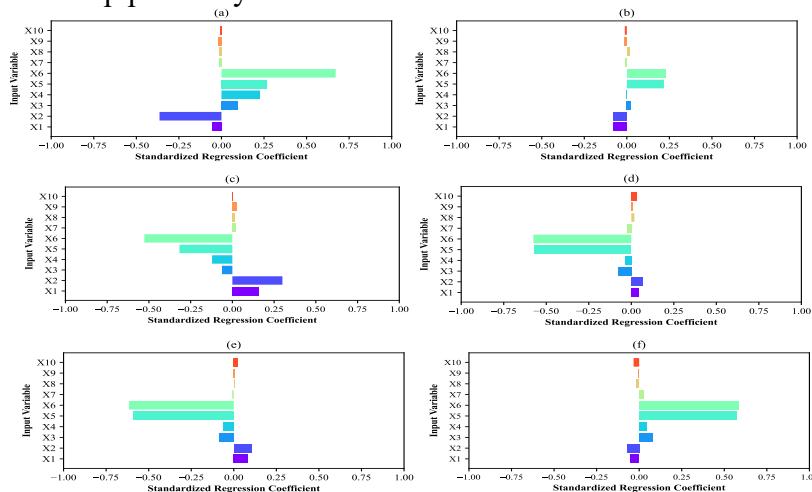
Sensitivitas terhadap aUDI

Untuk kisaran iluminansi optimal (aUDI₁₀₀₋₃₀₀₀), variabel X6 menunjukkan kontribusi negatif dengan nilai SRC mendekati -0,55, yang berarti peningkatan WWR selatan dapat menurunkan nilai aUDI₁₀₀₋₃₀₀₀. Hal ini disusul oleh X5 dengan pengaruh negatif dan X2 dengan pengaruh positif, dimana nilai SRC masing-masing mendekati -0,25 dan 0,25.

Pada metrik aUDI_{250–750} yang menyoroti zona nyaman visual, variabel X5 dan X6 tetap menjadi faktor dominan dengan nilai SRC mendekati -0,6. Hal ini menunjukkan bahwa semakin meningkat area bukaan, semakin menurun nilai aUDI_{250–750} atau dengan kata lain semakin berkurang area zona nyaman visual.

Pengaruh Variabel Konteks Bangunan

Temuan yang paling menarik dari penelitian ini adalah rendahnya pengaruh variabel konteks bangunan (X7–X10) terhadap seluruh metrik pencahayaan. Nilai SRC untuk keempat variabel konteks ini hampir mendekati 0 pada semua metrik, mengindikasikan bahwa jarak dan tinggi bangunan di sekitar ruang kelas tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap kualitas pencahayaan alami. Hal ini berbeda dengan asumsi umum yang menyatakan bahwa konteks bangunan di kawasan urban padat akan memberikan dampak besar terhadap pencahayaan alami.

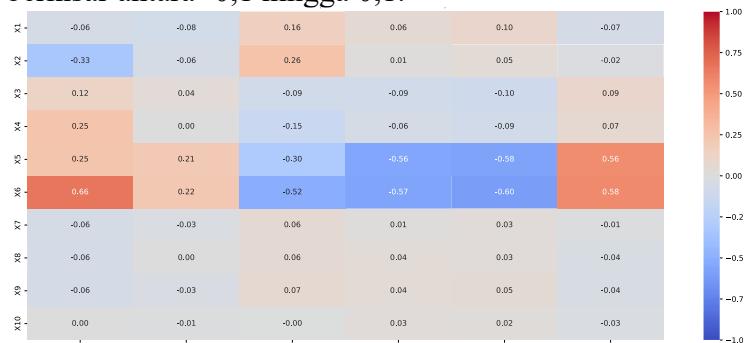


X1=Kedalaman peneduh utara, X2=Kedalaman peneduh selatan, X3=Ketinggian peneduh utara, X4=Ketinggian peneduh selatan, X5=WWR utara, X6=WWR selatan, X7=Jarak konteks utara, X8=Jarak konteks selatan, X9=Tinggi konteks utara, X10=Tinggi konteks selatan)

Gambar 5. Hasil Analisis SRC Seluruh Variabel terhadap (a) ASE, (b) sDA, (c) aUDI100-3000, (d) aUDI250-750, (e) aUDI<250, dan (f) aUDI>750

Matriks Korelasi Variabel

Analisis matriks korelasi antara variabel input dan output memperkuat temuan dari analisis SRC. Variabel X6 menunjukkan korelasi positif terkuat dengan Y1 ($r = 0,66$) dan korelasi negatif yang signifikan dengan Y4 dan Y5 ($r = -0,57$ dan $-0,60$). Sebaliknya, variabel konteks (X7–X10) menunjukkan nilai korelasi yang sangat rendah dengan seluruh variabel output, berkisar antara -0,1 hingga 0,1.



X1=Kedalaman peneduh utara, X2=Kedalaman peneduh selatan, X3=Ketinggian peneduh utara, X4=Ketinggian peneduh selatan, X5=WWR utara, X6=WWR selatan, X7=Jarak konteks utara, X8=Jarak konteks selatan, X9=Tinggi konteks utara, X10=Tinggi konteks selatan)

Gambar 6. Matriks korelasi variabel input dan output

Pembahasan

Hasil penelitian ini memberikan beberapa implikasi penting untuk praktik desain pencahayaan alami di kawasan urban padat beriklim tropis:

1. Dominasi WWR sebagai Parameter Kunci

WWR muncul sebagai variabel paling krusial dalam menentukan kualitas pencahayaan alami. Temuan ini mengkonfirmasi bahwa rasio bukaan jendela merupakan faktor utama yang harus dipertimbangkan dalam optimasi desain pencahayaan alami. Perancang perlu memberikan perhatian khusus pada penetapan nilai WWR yang optimal, dengan mempertimbangkan trade-off antara kecukupan pencahayaan dan risiko overlit.

2. Pentingnya Sistem Peneduh

Kedalaman peneduh, khususnya pada orientasi selatan, menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap pengendalian pencahayaan. Hal ini menekankan pentingnya desain sistem peneduh yang tepat untuk mengontrol intensitas cahaya yang masuk tanpa mengorbankan distribusi cahaya yang merata.

3. Minimnya Pengaruh Konteks Bangunan

Temuan bahwa variabel konteks bangunan memiliki pengaruh yang sangat rendah merupakan hasil yang tidak terduga dan berbeda dengan asumsi umum. Hal ini mungkin disebabkan oleh beberapa faktor:

- Orientasi utara-selatan yang dipilih dalam penelitian ini meminimalkan efek bayangan dari bangunan sekitar
- Intensitas radiasi matahari yang tinggi di daerah tropis memungkinkan penetrasi cahaya yang memadai meskipun ada obstruksi
- Variasi jarak dan tinggi konteks yang diuji mungkin belum mencapai kondisi ekstrem yang akan memberikan dampak signifikan

4. Implikasi untuk Desain di Kawasan Padat

Meskipun konteks bangunan menunjukkan pengaruh rendah dalam penelitian ini, perancang tetap perlu mempertimbangkan aspek-aspek lain seperti kenyamanan termal, privasi, dan pandangan keluar. Fokus optimasi dapat diarahkan pada pengaturan WWR dan sistem peneduh yang merupakan elemen yang dapat dikontrol oleh perancang dengan lebih baik.

Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu dipertimbangkan:

1. Orientasi bangunan hanya menguji arah utara-selatan. Hasil mungkin berbeda untuk orientasi lain
2. Model maket validasi menggunakan skala 1:10 yang mungkin tidak sepenuhnya merepresentasikan kondisi material dan reflektansi pada skala sebenarnya
3. Variabel yang diuji terbatas pada aspek geometri. Faktor lain seperti jenis kaca, sistem tirai, dan vegetasi tidak termasuk dalam penelitian ini
4. Simulasi menggunakan data cuaca EPW yang merupakan data tipikal tahunan, bukan kondisi cuaca actual

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis sensitivitas global terhadap enam metrik pencahayaan alami menggunakan SRC, dapat disimpulkan beberapa hal berikut:

1. WWR, khususnya pada orientasi selatan (X6) dan utara (X5), memiliki pengaruh paling signifikan dalam menentukan kualitas pencahayaan alami pada ruang kelas di kawasan urban padat beriklim tropis. Variabel ini secara konsisten menunjukkan korelasi tinggi terhadap semua metrik pencahayaan yang diuji.

2. Kedalaman peneduh selatan (X2) berperan penting dalam mengontrol paparan cahaya berlebih, terutama terhadap metrik ASE dan aUDI. Peningkatan kedalaman peneduh efektif dalam mengurangi tingkat iluminansi berlebih.
3. Variabel jarak dan tinggi konteks bangunan sekitar (X7–X10) menunjukkan nilai sensitivitas yang sangat rendah (mendekati 0), mengindikasikan bahwa dalam kondisi penelitian ini, keberadaan konteks bangunan di sekitar ruang kelas tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap pencahayaan alami.
4. Hasil validasi model menunjukkan tingkat akurasi yang memadai dengan nilai RMSE 15,56%–16,76%, mengindikasikan bahwa model simulasi dapat diandalkan untuk prediksi performa pencahayaan alami.
5. Optimasi desain pencahayaan alami di kawasan urban padat beriklim tropis sebaiknya difokuskan pada pengaturan WWR dan dimensi peneduh, sementara variabel konteks dapat menjadi pertimbangan sekunder dalam proses desain.

Saran

Berdasarkan temuan penelitian ini, disarankan beberapa hal berikut:

1. Perancang dan perencana ruang kelas di kawasan urban padat beriklim tropis perlu memberikan perhatian utama terhadap pengaturan WWR, terutama pada sisi selatan bangunan. Pengaturan proporsi WWR yang optimal dapat secara signifikan meningkatkan kualitas pencahayaan alami sekaligus meminimalkan risiko silau dan overlit.
2. Desain peneduh, khususnya kedalaman peneduh pada sisi selatan, sebaiknya dirancang secara presisi untuk mengendalikan tingkat pencahayaan yang masuk tanpa mengorbankan persebaran cahaya yang merata.
3. Pendekatan berbasis simulasi sangat dianjurkan untuk mengevaluasi secara kuantitatif efek perubahan WWR dan dimensi peneduh terhadap performa pencahayaan sebelum tahap konstruksi.
4. Penelitian lanjutan direkomendasikan untuk mengkaji pengaruh konteks yang lebih kompleks, seperti keberadaan vegetasi, permukaan reflektif, dan dinamika orientasi matahari sepanjang tahun pada orientasi bangunan yang berbeda.
5. Studi komparatif pada berbagai iklim tropis di Indonesia perlu dilakukan untuk menguji generalisasi temuan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Atthaillah, A., & Bintoro, A. (2019). Useful daylight illuminance (udi) pada ruang belajar sekolah dasar di kawasan urban padat tropis (Studi kasus: SD negeri 2 dan 6 Banda Sakti, Lhokseumawe, Aceh, Indonesia). Langkau Betang: Jurnal Arsitektur, 6(2), 72. <https://doi.org/10.26418/lantang.v6i2.33940>
- Atthaillah, A., Mangkuto, R. A., & Bintoro, A. (2025). Sensitivity Analysis and Optimization of Facade Design to Improve Daylight Performance of Tropical Classrooms with an Adjacent Building. Journal of Daylighting, 12, 235–251. <https://doi.org/10.15627/jd.2025.13>
- Atthaillah, A., Mangkuto, R. A., Koerniawan, M. D., Subramaniam, S., & Yuliarto, B. (2024). Formulation of climate-based daylighting design prediction model for high performance tropical school classrooms. Energy and Buildings, 304, 113849. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113849>
- Atthaillah, A., Mangkuto, R. A., Subramaniam, S., & Yuliarto, B. (2024). Daylighting design validation and optimisation of tropical school classrooms with asymmetrical bilateral opening typology. Indoor and Built Environment, 33(3), 551–570. <https://doi.org/10.1177/1420326X231204513>
- Badan Pusat Statistik. (2023). Statistik Indonesia 2023. BPS-Statistics Indonesia.
- BSN. (2001). Tata cara perancangan sistem pencahayaan alami pada bangunan gedung (SNI 03-2396-2001).

- BSN. (2020). SNI 6197:2020 Konservasi energi pada sistem pencahayaan (SNI 6197:2020). www.bs.n.go.id
- Ekasiwi, S. N., Dewi, S. P., & Meidiana, C. (2020). Optimalisasi Pencahayaan Alami Pada Ruang Kelas Sekolah Dasar Di Kawasan Padat Hunian Kota Surabaya. *Jurnal Sains dan Seni ITS*, 9(1).
- IES. (2023). Ten key daylight & electric light metrics. IES DiscoverIES. <https://www.iesve.com/discoveries/article/3813/ten-key-daylight-and-electric-metrics>
- Iskandar, I., Suparwoko, S., Sugini, S., & Zacky, Z. (2022). Desain ruang belajar sekolah dasar di lhokseumawe yang optimal terhadap pencahayaan alami. *Arsitekno*, 9(2), 82. <https://doi.org/10.29103/arj.v9i2.8447>
- Permendikbud. (2007). Standar Sarana dan Prasarana untuk Sekolah Dasar/Madrasah Ibtidaiyah (SD/MI), Sekolah Menengah Pertama/Madrasah Tsanawiyah (SMP/MTS), dan Sekolah Menengah Atas/Madrasah Aliyah (SMA/MA). <https://peraturan.bpk.go.id/Details/216118/permendikbud-no-24-tahun-2007>
- Volf, C., Bueno, B., Edwards, P., Hobday, R., Mäder, S., Matusiak, B. S., Wulff, K., Osterhaus, W., Manoli, G., Della Giustina, C., Joshi, J., Kämpf, J. H., Vega, K., & Kueffer, C. (2024). Why daylight should be a priority for urban planning. *Journal of Urban Management*, 13(2), 175–182. <https://doi.org/10.1016/j.jum.2024.02.002>.