

OPTIMASI GEOMETRI BUKAAN BERBASIS DESAIN GENERATIF UNTUK PERFORMA PENCAHAYAAN ALAMI RUANG KULIAH

***Rodrigo N. Kaunang¹, Jefrey I. Kindangen², Pingkan P. Egam³**

Universitas Sam Ratulangi, Indonesia

*rodrigokaunang022@student.unsra.ac.id

Abstrak: Optimasi Geometri Bukaan Berbasis Desain Generatif untuk Performa Pencahayaan Alami Ruang Kuliah.

Penelitian ini bertujuan merumuskan draf algoritma komputasional berbasis desain generatif untuk mereduksi nilai Rasio Keseragaman (Uo) pencahayaan alami ruang kuliah. Metode yang digunakan adalah kuantitatif dengan pendekatan eksperimental berbasis simulasi komputasi dan optimasi parametrik menggunakan perangkat lunak Rhinoceros, Grasshopper, Honeybee-Radiance, dan DIALux Evo. Hasil penelitian menunjukkan dari 48.905 kombinasi unik hasil perkalian Kartesian, satu konfigurasi optimal mampu mereduksi nilai (Uo) dari 10,41:1 menjadi 9,51:1, meningkatkan rata-rata Daylight Factor (DFavg) menjadi 1,35%, serta meningkatkan titik nyaman pencahayaan sebesar 37,8%. Kesimpulannya, pendekatan parametrik terbukti efektif mengidentifikasi konfigurasi geometri bukaan paling optimal untuk meningkatkan kualitas sebaran cahaya. Penelitian ini menyarankan penggunaan alur logika komputasional ini sebagai dasar bagi pengembangan Daylight-Opening Generative Engine di masa depan. Implikasi penelitian ini memberikan solusi pasif yang praktis untuk meningkatkan kenyamanan visual murni melalui rekayasa permutasi otomatis koordinat bukaan satu sisi.

Kata kunci: **Pencahayaan Alami; Optimasi Parametrik; Rasio Keseragaman ; Algoritma Komputasional; Ruang Kuliah**

Abstract: Openings Geometry Optimization Based on Generative Design for Lecture Room Daylighting Performance.

This study aims to formulate a draft computational algorithm based on generative design to reduce the Uniformity Ratio (Uo) of natural lighting in lecture halls. The method used is quantitative, employing an experimental approach based on computational simulation and parametric optimization using the software Rhinoceros, Grasshopper, Honeybee-Radiance, and DIALux Evo. The results show that out of 48,905 unique combinations resulting from Cartesian multiplication, one optimal configuration was able to reduce the Uo value from 10,41:1 to 9,51:1, increase the average Daylight Factor (DFavg) to 1,35%, and improve the lighting comfort level by 37,8%. In conclusion, the parametric approach proved effective in identifying the most optimal opening geometry configuration to improve light distribution quality. This study suggests using this computational logic as a basis for the future development of a Daylight-Opening Generative Engine. The implications of this research provide a practical passive solution for enhancing pure visual comfort through the automatic permutation engineering of single-opening coordinates.

Keyword: **Daylighting; Parametric Optimization; Uniformity Ratio; Computational Algorithm; Lecture Room**

History & License of Article Publication:

Received: 10/05/2026 **Revision:** 06/06/2026 **Published:** 30/06/2026

DOI: <https://doi.org/10.37971/radial.vXXiXX.XXX>



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

PENDAHULUAN

Kualitas pencahayaan pada fasilitas pendidikan tinggi memegang peranan yang sangat penting dalam menjamin tingkat kenyamanan visual pengguna ruang selama aktivitas akademik berlangsung (Mohammed, 2026). Komponen lingkungan fisik ini terbukti memiliki kontribusi besar dalam mengurangi kelelahan mata sekaligus mempertahankan tingkat konsentrasi belajar mahasiswa di dalam kelas (Aghajari & Chen, 2025). Pada ruangan yang digunakan untuk kegiatan belajar intensif, kombinasi parameter iluminasi horizontal dan vertikal secara nyata berhubungan erat dengan pembentukan persepsi kenyamanan penglihatan (G. Liu et al., 2022). Namun, sistem bukaan samping konvensional yang umum diterapkan pada selubung bangunan sekolah sering kali menghasilkan distribusi terang-gelap yang tidak seimbang di dalam ruangan (Y. Liu, Chen, Ni, & Deng, 2023).

Kondisi sebaran yang belum seimbang ini juga terjadi pada ruang kuliah Gedung Arsitektur Universitas Sam Ratulangi (Unsrat) Manado, di mana sistem bukaan sisi tunggal eksisting secara statuter sebenarnya telah lolos uji standar minimal nasional (40 : 1) SNI 03-2396-2001 (Badan Standardisasi Nasional, 2001), namun dinilai belum mencapai tingkat pemerataan yang sepenuhnya optimal. Distribusi cahaya yang konstan dan merata sangat krusial untuk mengeliminasi risiko kelelahan visual (Mutmainnah, Saputra, & Musa, 2026). Peningkatan kualitas sebaran hingga melampaui batas minimal tersebut sangat krusial karena distribusi yang timpang khususnya saat rasio perbandingan kecerahan ruang melebihi ambang batas 1,67 : 1 secara alami memicu pembentukan distorsi bayangan yang mengganggu kejelasan objek pada bidang kerja (Yunitsyna & Toska, 2023). Melalui pencapaian distribusi cahaya yang lebih rapat hingga memenuhi target konfigurasi perbandingan sebesar 1,43 : 1, ketegangan visual akibat kerja adaptasi dinamis pupil mata dapat direduksi secara efektif (Mohammed, 2026). Keseragaman pencahayaan yang tinggi ini juga berfungsi mengeliminasi pemusatan cahaya berlebih yang menjadi pemicu utama melonjaknya indeks silau ke ambang batas tidak nyaman (Aghajari & Chen, 2025). Ketika konfigurasi perbandingan kecerahan ruang berhasil ditekan hingga berada pada rentang ideal 1,67 : 1 sampai 1,25 : 1, stabilitas konsentrasi dan kenyamanan visual pengguna akan berada pada kondisi terbaiknya (Mohammed, 2026). Namun, batasan metode perancangan fasad konvensional secara manual menyulitkan arsitek dalam memprediksi konfigurasi dimensi jendela yang mampu menghasilkan tingkat keseragaman terbaik. Oleh karena itu, fokus utama penelitian ini adalah merumuskan sebuah algoritma komputasional yang bertindak sebagai mesin pencari otomatis untuk mengoptimalkan geometri bukaan selubung bangunan secara dinamis, dengan target utama menekan nilai rasio keseragaman (U_o) hingga ke titik terkecil demi mencapai pemerataan cahaya yang lebih homogen.

Urgensi penelitian ini didasarkan pada kebutuhan optimasi strategi pasif dan ketidakpastian dalam menentukan tingkat optimalitas suatu rancangan bukaan. Pada umumnya, penentuan dimensi dan posisi jendela dihentikan segera setelah hasil desain memenuhi kriteria atau ambang batas minimal yang disyaratkan aturan nasional. Keterbatasan metode konvensional mengakibatkan berbagai variasi konfigurasi geometri bukaan lain yang berpotensi menghasilkan sebaran cahaya lebih merata menjadi tidak ditemukan. Oleh karena itu, pengembangan algoritma komputasional sebagai mesin pencari otomatis menjadi sangat penting untuk mengeksplorasi seluruh kemungkinan kombinasi

bukaan secara menyeluruh, guna memastikan diperolehnya draf desain jendela yang terbukti paling efektif dalam mereduksi nilai rasio keseragaman (U_o).

Tahap awal penelitian ini berfokus pada evaluasi terhadap karakteristik ketidakseragaman distribusi pencahayaan alami, khususnya nilai rasio keseragaman (U_o), pada denah ruang kuliah eksisting Gedung Arsitektur Unsrat. Selanjutnya, pendekatan parametrik generatif diterapkan guna memanipulasi variabel dimensi serta posisi bukaan jendela untuk menghasilkan matriks alternatif ruang solusi yang logis. Melalui proses tersebut, dirumuskan sebuah algoritma komputasional yang bertindak sebagai mesin pencari otomatis untuk mengidentifikasi konfigurasi desain bukaan jendela yang paling optimal dalam meminimalkan nilai rasio keseragaman (U_o) demi mencapai pemerataan cahaya yang homogen di dalam ruangan.

Meskipun beberapa penelitian terdahulu telah berupaya mengoptimalkan keseragaman pencahayaan alami pada ruang pendidikan, solusi yang ditawarkan umumnya membawa konsekuensi fisik atau beban konstruksi tambahan yang signifikan bagi bangunan. Sebagai contoh, intervensi komponen atap berupa kombinasi skylight dan light shelf oleh (Szentesi-Nejur, de Luca, & Flamand, 2022) menuntut perubahan struktur plafon yang meningkatkan biaya konstruksi serta risiko teknis kebocoran. Sementara itu, integrasi sistem optik pipa cahaya horizontal (Horizontal Light Pipe) oleh (Noor & Rahman Joarder, 2026) untuk ruang berkedalaman tinggi (deep-plan) membutuhkan ruang plenum plafon yang longgar dengan instalasi teknis yang rumit. Di sisi lain, optimasi multi-objektif oleh (Lakhdari, Sriti, & Painter, 2021) mengharuskan kompensasi masif pada material dinding bermassa termal tinggi, dan eksplorasi dinamis oleh (Xue & Liu, 2022) masih terbatas pada tipologi ruang publik makro seperti atrium komersial. Di ranah rekayasa bukaan samping, studi oleh (Maurya, Kumar, & Kumar, 2023) baru sebatas mengevaluasi variasi bentuk jendela persegi panjang secara statis dan manual.

Guna mengisi kesenjangan tersebut, penelitian ini secara umum bertujuan untuk merumuskan draf algoritma komputasional berbasis desain generatif sebagai mesin pencari otomatis yang berfokus pada reduksi rasio keseragaman (U_o) secara pasif. Secara lebih spesifik, tujuan penelitian ini diarahkan untuk memetakan karakteristik distribusi pencahayaan alami pada denah ruang kuliah eksisting Gedung Arsitektur Unsrat, serta memanipulasi variabel dimensi dan posisi empat koordinat bingkai jendela tunggal secara parametrik guna mengidentifikasi konfigurasi bukaan yang paling optimal demi mencapai pemerataan cahaya yang homogen. Pendekatan komputasional generatif ini menawarkan kebaruan (novelty) berupa solusi pasif yang jauh lebih praktis karena mampu meningkatkan kenyamanan visual secara signifikan murni melalui rekayasa permutasi otomatis koordinat empat dimensi bingkai jendela satu sisi, tanpa mengubah bentuk denah fungsional, tanpa elemen pelengkap luar fasad, dan tanpa mengganti material bawaan gedung.

Landasan berpikir penelitian ini didasarkan pada prinsip bahwa parameter geometri dan posisi bukaan dinding samping secara signifikan memengaruhi tingkat keseragaman pencahayaan alami serta nilai rasio keseragaman (U_o) di dalam ruangan, di mana rekayasa bukaan tetap menjadi faktor pasif paling krusial meskipun secara fisika optik fenomena distribusinya bersifat dinamis (Maurya et al., 2023). Kajian teori tersebut sangat relevan untuk mengatasi masalah ketimpangan visual yang tinggi pada ruang kuliah eksisting berkedalaman tinggi akibat distribusi cahaya yang belum seimbang. Guna

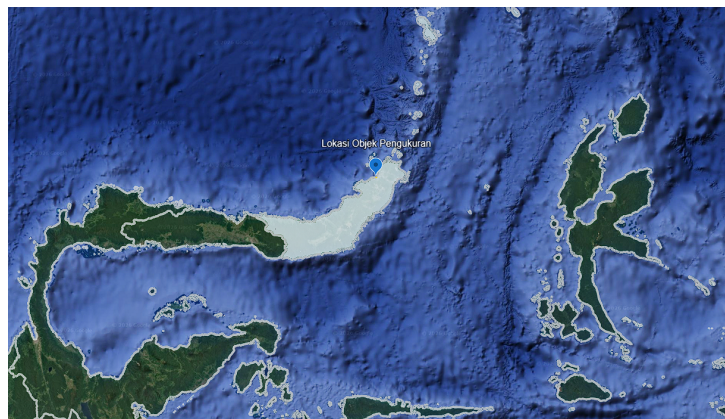
Optimasi Geometri Bukaan untuk Performa Pencahayaan Alami Ruang Kuliah (Kaunang)

<https://radial.e-journal.unbitago.ac.id/radial/index>

menyelesaikannya, pendekatan parametrik diterapkan sebagai instrumen komputasional untuk mengiterasi seluruh kemungkinan geometri bukaan secara masif berdasarkan pergeseran koordinat batas bingkai jendela tunggal dengan batasan interval tertentu. Kekuatan teoretis metode ini terletak pada kapasitas eksplorasi ruang solusi (design space) secara luas sejak fase awal perancangan (Lakhdari et al., 2021), yang terbukti mampu mengoptimalkan kinerja fisik serta fungsi kontrol lingkungan selubung bangunan secara signifikan (Xue & Liu, 2022). Melalui integrasi loop simulasi tersebut, sistem parametrik ini tidak hanya mengidentifikasi kombinasi desain berkinerja tinggi, melainkan juga menyediakan sebuah kerangka kerja rasional yang objektif bagi pengambilan keputusan desain yang kompleks (Noor & Rahman Joarder, 2026) yang mendasari pengembangan draf algoritma komputasional sebagai mesin pencari otomatis untuk menemukan konfigurasi bukaan paling optimal demi memaksimalkan homogenitas cahaya secara pasif tanpa mengubah struktur denah fungsional ruangan.

METODOLOGI

Penelitian ini merupakan jenis penelitian kuantitatif dengan pendekatan eksperimental berbasis simulasi komputasi (computational simulation) dan optimasi parametrik. Metode eksperimen berbasis simulasi digital ini dipilih karena seluruh rangkaian proses pencarian solusi dijalankan secara komputasional melalui pemodelan matematis (Lakhdari et al., 2021), sehingga memungkinkan pengujian berbagai kombinasi geometri secara masif tanpa harus melakukan modifikasi fisik di lapangan atau merombak struktur bangunan riil yang sudah ada. Secara operasional, metodologi ini mengintegrasikan sistem pemodelan parametrik menggunakan perangkat lunak Rhinoceros dan Grasshopper guna mentransformasikan dimensi serta posisi koordinat geometri bukaan menjadi variabel dinamis yang membentuk ruang solusi (design space). Evaluasi terhadap performa distribusi cahaya alami dilakukan melalui simulasi pencahayaan statis (static daylight simulation) menggunakan metrik Faktor Pencahayaan Alami (Daylight Factor / DF) di bawah kondisi langit mendung standar (CIE Overcast Sky). Sirkuit simulasi tersebut kemudian dikoneksikan dengan algoritma optimasi komputasional yang mengeksplorasi ruang solusi guna mengidentifikasi kombinasi desain terbaik (Pareto front) yang paling efektif dalam mengoptimalkan nilai keseragaman sebaran cahaya atau rasio keseragaman (U_o) demi mencapai distribusi pencahayaan yang homogen di dalam ruangan.



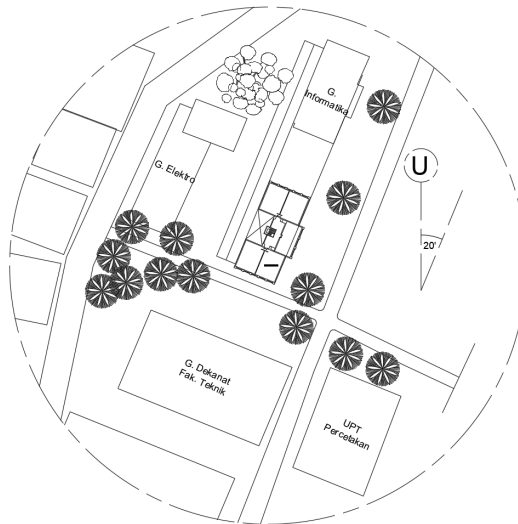
Sumber: Google Earth

Gambar 2.1 Lokasi Objek pengukuran

Optimasi Geometri Bukaan untuk Performa Pencahayaan Alami Ruang Kuliah (Kaunang)

<https://radial.e-journal.unbitago.ac.id/radial/index>

Ruang kuliah yang terletak di Lantai 3 Gedung Arsitektur Universitas Sam Ratulangi (Unsrat), Manado, yang secara geografis berada pada koordinat $1,45950^{\circ}$ Lintang Utara (Latitude) dan $124,82586^{\circ}$ Bujur Timur (Longitude), ditetapkan sebagai subjek dalam penelitian ini. Karakteristik fisik spasial dari ruang kuliah ini dirancang dengan tipologi denah berkedalaman tinggi (*deep-plan*), di mana pemanfaatan sistem pencahayaan pasif satu sisinya mengandalkan dinding yang menghadap ke arah Selatan bangunan. Secara spesifik, orientasi bangunan memiliki sudut deviasi (*north alignment*) sebesar $+20^{\circ}$ dari sumbu utara murni. Modul ruang kelas ini memiliki kapasitas fungsional untuk 38 orang mahasiswa dengan konfigurasi geometri pembatas bangunan yang dikunci secara konstan sepanjang eksperimen.



Sumber: Penulis

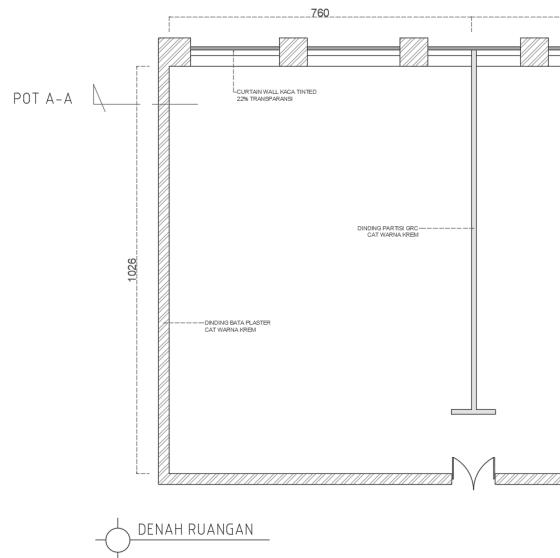
Gambar 2.2 Peta Situasi Kawasan di sekitar Objek Pengukuran

Dengan Kondisi Batas (Boundary condition)

Tabel 2.1. Kondisi Batas Geometri Objek Pengukuran

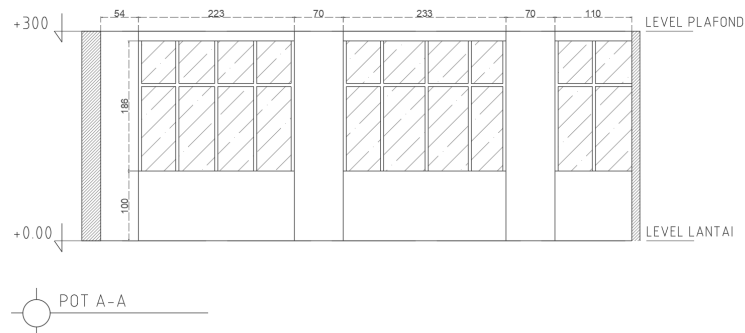
No	Parameter Geometri	Komponen Fisik Eksisting	Nilai Dimensi Terukur
1	Spasial Ruangan	Panjang Ruangan	10,26 Meter
		Lebar Ruangan	7,60 Meter
		Tinggi Ruangan	3,00 Meter
		Luas Denah	77,97M ²
2	Bukaan	Modul 1 (Sisi Kiri)	Lebar 2,23 M / Tinggi 1,86 M
		Modul 2 (Sisi Tengah)	Lebar 2,33 M / Tinggi 1,86 M
		Modul 3 (Sisi kanan)	Lebar 1,10 M / Tinggi 1,86 M
		Tinggi Ambang Bawah (Sill)	1,00 M

Sumber: Hasil Pengukuran Penulis



Sumber: Penulis

Gambar 2.3 Denah Ruang Pengukuran



Sumber: penulis

Gambar 2.4 Tampak Bukaannya

Teknik pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan dengan memasukkan seluruh parameter kondisi batas (*boundary conditions*) eksisting secara langsung ke dalam perangkat lunak simulasi DIALux Evo guna mentransformasikan karakteristik fisik objek nyata ke dalam model digital secara terukur. Jenis data yang diinput ke dalam software simulasi tersebut meliputi data geometri spasial yang terdiri dari dimensi panjang, lebar, dan tinggi bersih ruangan, serta konfigurasi dimensi fisik dari modul bukaan dinding eksisting. Selanjutnya, data posisi spasial yang mencakup koordinat lokasi geografis tapak proyek dan sudut deviasi orientasi bangunan terhadap sumbu utara murni juga turut diintegrasikan ke dalam sistem. Untuk properti material interior, data yang dikumpulkan adalah karakteristik warna dan nilai koefisien reflektansi dari permukaan dinding, plafon, serta bidang lantai kerja, yang dikombinasikan dengan data properti optik bukaan berupa nilai transmisi cahaya (*Visible Light Transmittance / VLT*) pada komponen kaca bukaan. Rangkaian data ini dilengkapi dengan memasukkan data hambatan lingkungan luar yang mengacu pada jarak posisi massa bangunan sekitar secara tegak lurus dari fasad serta nilai reflektansi material selubung luarnya, di mana seluruh pemrosesan data atmosferik simulasi ini dikunci di bawah karakteristik kondisi langit mendung standar (*CIE Overcast Sky*).

Tabel 2.2. Kondisi Batas Reflektansi dan Transmisi Material

Elemen Ruang	Material Eksisting	Warna Permukaan	R/VLT
Dinding Interior	Plesteran + Cat Tembok Doff	Krem ((Light Beige)	0,70
Langit-langit (Plafon)	Gypsum Board + Cat	Putih Bersih (Standar white)	0,75
Lantai Kerja	Finishing Keramik Polished	Dominan Putih (Glossy White)	0,40
Material Kaca Jendela	Kaca tinted Tunggal (5 mm)	Tinted / <i>Ribben</i>	22%

Sumber: Hasil Pengukuran Penulis

Validitas mesin simulasi pencahayaan DIALux Evo dan Honeybee-Radiance terbukti memiliki tingkat presisi yang sangat tinggi berdasarkan kecocokan performa komputasinya terhadap standar referensi fisik dan analitis internasional. Hasil penelitian (Mangkuto, 2016) menemukan bahwa nilai kesalahan iluminansi maksimum DIALux Evo untuk skenario pencahayaan langsung dengan sumber titik hanya sebesar -0.1%, skenario tidak langsung sebesar 9%, serta galat skenario langsung dari sumber area sebesar 0.2% terhadap kasus uji analitis CIE 171:2006, sebuah pencapaian galat minimal yang membuktikan akurasi dalam memodelkan distribusi dan karakter pemantulan intensitas cahaya interior. Hal ini didukung oleh temuan (Zhao et al., 2025) bahwa nilai deviasi kalkulasi algoritma *photon shooting* pada ruang uji terkontrol berada di bawah 1% untuk DIALux Evo, dan nilai kesalahan komputasi maksimum secara konsisten berada di bawah 1% pada mesin *backward ray tracing* Radiance di Honeybee, yang mengonfirmasi keandalan instrumen dalam mensimulasikan pemodelan medan cahaya dinamis terintegrasi serta kenyamanan visual secara presisi. Penguatan ini dilengkapi oleh hasil penelitian (Hemmerling, Seegers, & Witzel, 2023) yang menemukan bahwa nilai rata-rata deviasi metode 3-fase (*three-phase method*) untuk analisis tahunan hanya berada di angka 0.52% dengan deviasi maksimum sebesar 2.3% terhadap kalkulasi pencahayaan alami klasik, yang menegaskan kelayakan kedua perangkat lunak ini dalam memprediksi performa pencahayaan alami dan elektrik secara akurat, efisien, serta andal mendekati parameter kondisi fisik di lapangan.

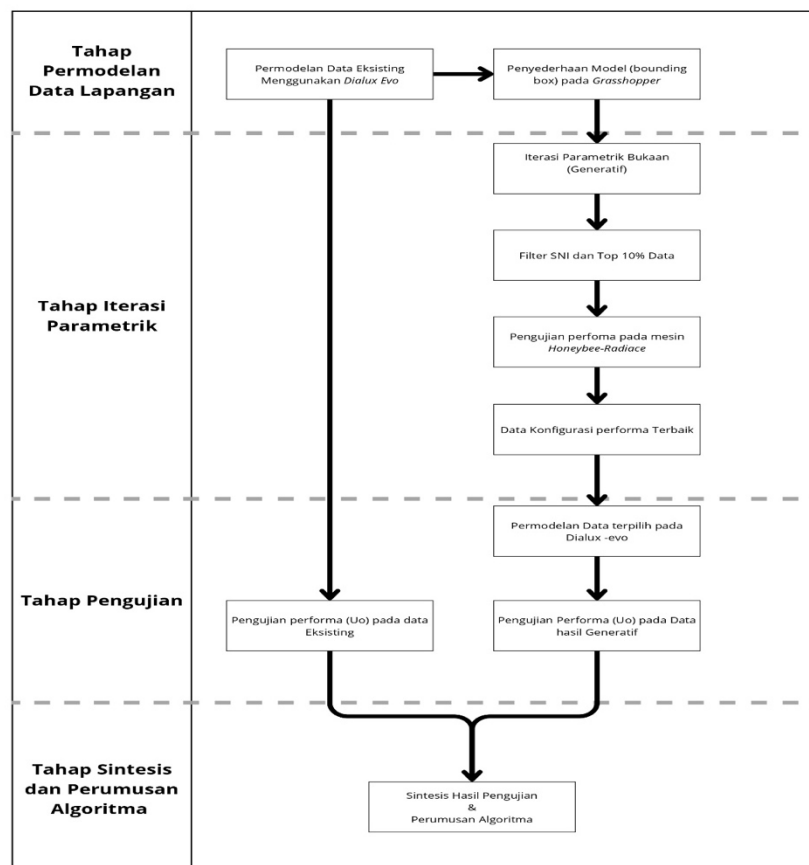
Prosedur pelaksanaan penelitian ini diawali dengan Tahap Pemodelan Data Lapangan, di mana data eksisting ruang kuliah dimodelkan menggunakan perangkat lunak DIALux Evo untuk menghasilkan analisis awal rasio keseragaman (U_o) eksisting, kemudian disederhanakan menjadi model objek (bounding box) di platform Grasshopper. Memasuki Tahap Iterasi Parametrik, proses dijalankan secara generatif menggunakan Grasshopper untuk menghasilkan berbagai kombinasi bentuk bukaan, yang kemudian disaring melalui filter standardisasi SNI 03-2396-2001 (Badan Standardisasi Nasional, 2001) dan diambil top 10% data terbaik untuk diuji kinerjanya menggunakan mesin Honeybee-Radiance hingga diperoleh konfigurasi performa terbaik. Selanjutnya, pada Tahap Pengujian, data konfigurasi

Optimasi Geometri Bukaan untuk Performa Pencahayaan Alami Ruang Kuliah (Kaunang)

<https://radial.e-journal.unbitago.ac.id/radial/index>

terbaik tersebut dimodelkan kembali ke dalam DIALux Evo untuk menguji nilai rasio keseragaman Uo hasil generatif secara komparatif dengan performa eksisting. Akhirnya, Tahap Sintesis dan Perumusan Algoritma mengevaluasi perbandingan kedua skenario tersebut untuk merumuskan logika algoritma mesin pencari otomatis yang preskriptif dalam mengoptimalkan kenyamanan visual ruang kuliah

Metode analisis data dalam penelitian ini difokuskan murni pada evaluasi performa hasil simulasi komputasional yang dibagi ke dalam dua parameter analisis utama, yaitu analisis penyaringan data (filtering) ruang solusi dan analisis komparatif kualitas sebaran cahaya. Analisis penyaringan data diterapkan pada fase iterasi parametrik menggunakan fungsi pembatasan regulasi SNI 03-2396-2001 (Badan Standardisasi Nasional, 2001) untuk mengeliminasi variasi geometri bukaan yang tidak memenuhi batas minimum Faktor Langit (FL). Data yang berhasil lolos seleksi awal tersebut kemudian dianalisis tingkat homogenitas distribusinya menggunakan metrik Total Absolute Deviation (TAD) berdasarkan ekstraksi data numerik dari 234 titik sensor grid pada mesin Honeybee-Radiance. Untuk mesin radiance menggunakan komponen *HB Daylight Factor V.1.10.0* dengan default setting ($ab=2$, $ad=2048$, $as=512$, $ar=0,4$ dan $aa=0,1$). Nilai akumulasi deviasi TAD yang paling minimum atau mendekati nol diisolasi secara digital untuk mengidentifikasi satu model konfigurasi dengan performa sebaran cahaya terbaik.



Sumber: Analisis Penulis

Gambar 2.5 Skema tahapan penelitian

Selanjutnya, analisis komparatif performa diterapkan pada tahap pengujian untuk mengevaluasi peningkatan kualitas kenyamanan visual melalui metrik rasio keseragaman (U_o) Dengan rumus

$$U_o = \frac{DF_{max}}{DF_{min}} \quad (1)$$

Analisis ini dilakukan secara linear dengan membandingkan nilai rasio keseragaman (U_o) yang dihasilkan pada data eksisting dengan nilai rasio keseragaman yang diperoleh dari pemodelan data hasil generatif optimal di dalam perangkat lunak DIALux Evo. Hasil perbandingan kuantitatif dari kedua skenario tersebut kemudian disintesis untuk membuktikan efektivitas rekayasa geometri bukaan dalam memotong tingkat ketimpangan pencahayaan di dalam ruang kuliah

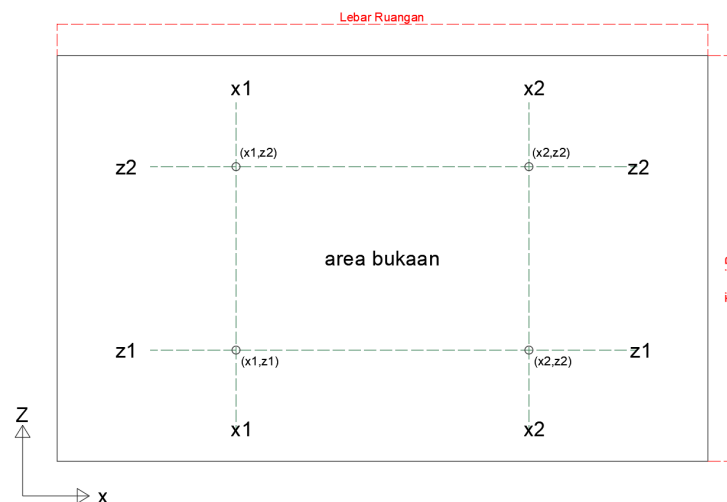
HASIL PENELITIAN

Hasil Proses Iterasi

Dari Hasil Proses iterasi generatif di Grasshopper menggunakan metode grid search dengan interval 0,2 m pada empat sumbu koordinat (x_1, x_2, z_1, z_2). Batas bawah z_1 0,75 m diselaraskan dengan tinggi minimal bidang kerja SNI 03-2396-2001 karena luasan jendela di bawah meja dinilai tidak efektif untuk pencahayaan alami. Melalui perkalian Kartesian dengan penerapan batasan logika

$$S = \{(x_1, x_2, z_1, z_2) \in X_1 \times X_2 \times Z_1 \times Z_2 \mid x_1 < x_2 \text{ dan } z_1 < z_2\} \quad (2)$$

Koordinat geometris yang mustahil otomatis dieliminasi sehingga menghasilkan total 48.905 kombinasi konfigurasi bukaan yang unik dan logis.



Sumber: Analisis Penulis

Gambar 3.1 Empat sumbu koordinat bukaan

Hasil Filtrasi SNI 03-2396-2001

Ekspansi Rumus (Superposisi 2D). Untuk mengatasi kelemahan rumus SNI 03-2396-2001 (Badan Standardisasi Nasional, 2001) yang kaku dan rentan memicu galat spasial, dikembangkan model ekspansi Superposisi Dua Dimensi di *Grasshopper*. Geometri jendela didekonstruksi menjadi 4 kuadran batas ($f(a1, h1)$ hingga $f(a2, h2)$) yang dihitung secara

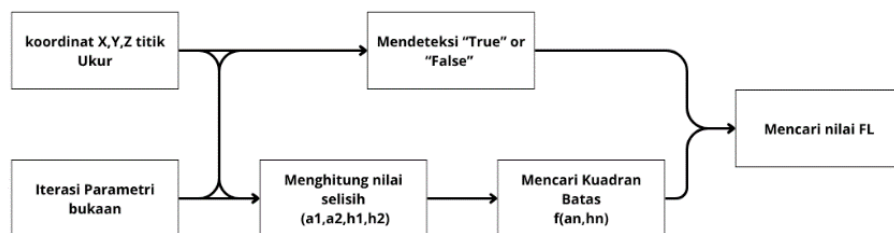
adaptif menggunakan logika kondisi *True* atau *False* berdasarkan posisi koordinat 4 titik ukur yang diatur di dalam SNI 03-2396-2001 (Badan Standardisasi Nasional, 2001).

Pasca-kalkulasi, seluruh data konfigurasi bukaan disaring berdasarkan ambang batas nilai FL standar SNI 03-2396-2001 (Badan Standardisasi Nasional, 2001). Selain kuantitas tersebut, proses filtrasi ini juga mengevaluasi aspek kualitas visual dengan membatasi rasio keseragaman antar-titik ukur maksimal 40:1 guna mencegah terjadinya risiko kesalahan di dalam ruangan.

Tabel 3.1 Standar Nilai FL pada titik Ukur

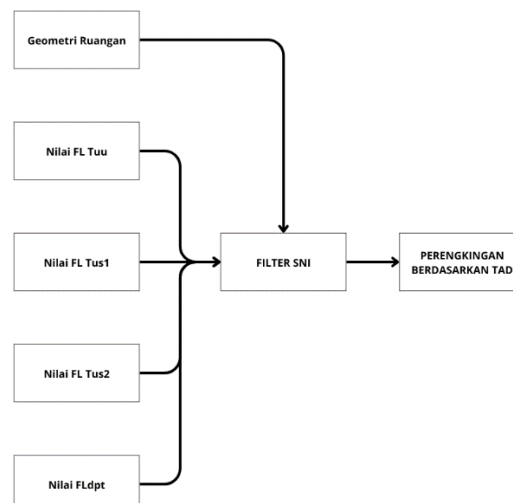
No	Titik Ukur	Standar (SNI 03-2396-2001)	Nilai (%)
1	TUU	0,35 d	3,57
2	TUS1	0,20 d	2,04
3	TUS2	0,20 d	2,04
4	Tdpt	0,5TUU	1,79

Sumber: Analisis Penulis



Sumber: Analisis Penulis

Gambar 3.2 Skema Ekspansi Rumus (Superposisi)



Sumber: Analisis Penulis

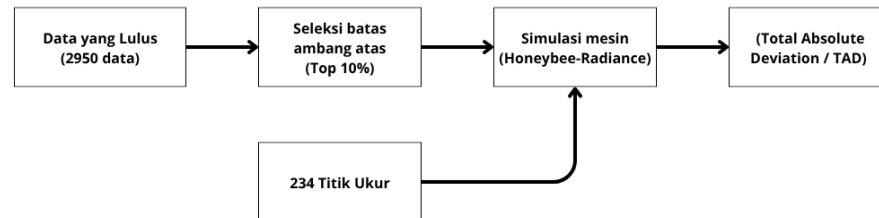
Gambar 3.3 Skema Filtrasi SNI 03-2396-2001

Hasil Filtrasi & Perankingan TAD. Proses seleksi awal ini meloloskan 2.950 data konfigurasi bukaan. Seluruh data yang lolos kemudian diurutkan berdasarkan nilai Total

Absolute Deviation (TAD). Nilai akumulasi TAD yang semakin kecil (mendekati nol) mengonfirmasi sebaran pencahayaan alami yang semakin homogen di dalam ruang kuliah.

$$TAD = |FL_{TUU} - FL_{avg}| + |FL_{TUS1} - FL_{avg}| + |FL_{TUS2} - FL_{avg}| + |FL_{TDPT} - FL_{avg}| \quad (3)$$

Hasil Kalkulasi Menggunakan Mesin *Honeybee-Radiance*



Sumber: Analisis Penulis

Gambar 3.4 Skema simulasi mesin *Honeybee-Radiance*

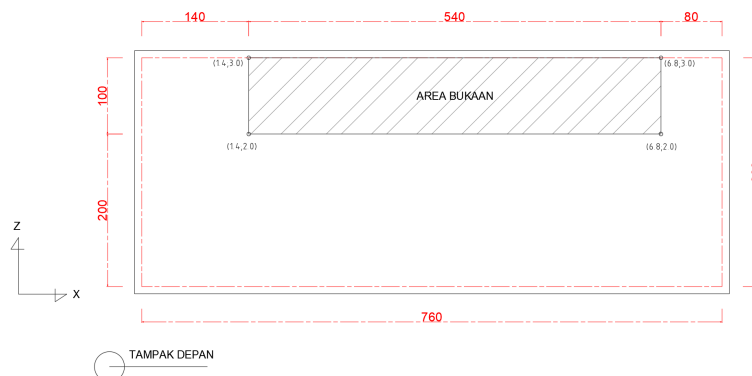
Akibat keterbatasan komputasi, 2.950 data diurutkan berdasarkan TAD terendah lalu disaring (*cutoff threshold*) untuk meloloskan 10% data terbaik (295 konfigurasi). Data terpilih ini kemudian disimulasikan menggunakan mesin *Honeybee-Radiance* tanpa melibatkan variabel kontrol untuk mengevaluasi komponen langit murni pada grid yang terdiri atas 234 titik ukur spasial.

Hasil akhir berupa nilai FL dari seluruh titik grid dianalisis kembali menggunakan metode *Total Absolute Deviation* (TAD) dan diurutkan untuk mengidentifikasi satu konfigurasi desain bukaan yang paling optimal.

$$TAD = \sum_{i=1}^{234} |FL_i - FL_{avg}| \quad (4)$$

Hasil Desain

Desain terbaik berada pada baris ke-2431 dengan koordinat bukaan (1.4; 6.8; 2.0; 3.0). Spesifikasi fisiknya memiliki panjang 5,4 meter, tinggi 1 meter, *sill height* 2 meter, serta nilai WWR sebesar 23,68%.

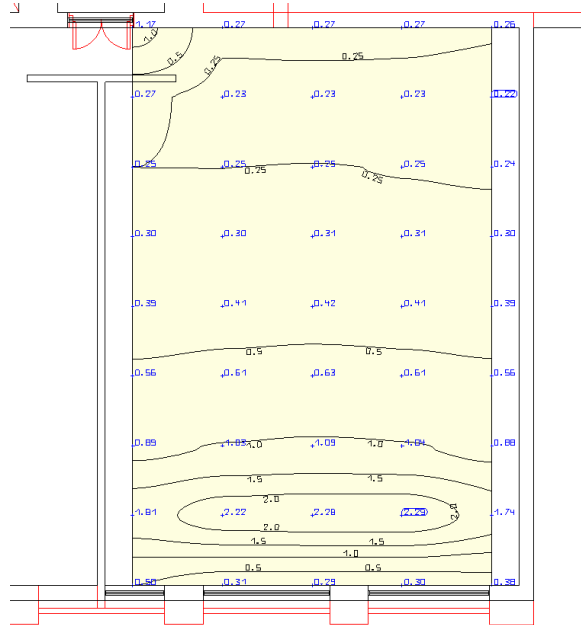


Sumber: Analisis Penulis

Gambar 3.5 Tampak Depan hasil desain bukaan

Komparasi hasil Simulasi Kondisi Eksisting dan Hasil Simulasi Desain

Dari hasil simulasi eksisting pada 45 titik ukur yang disebarakan pada bidang ukur didapatkan nilai DF Tertinggi sebesar 2.29% dan nilai DF terendah sebesar 0.22% yang kemudian dimasukan ke dalam *persamaan (1)* Sehingga di dapatkan hasil *Uniformity Ratio (Uo)* sebesar 10,41:1.



Sumber: Analisis Penulis

Gambar 3.6 Hasil analisis bukaan eksisting menggunakan dialux evo

Tabel 3.2 Hasil Simulasi kondisi eksisting

No	DF	Value (%)
1	DF Max	2,29
2	DF min	0,22
3	DF average	0,63

Sumber: Analisis Penulis

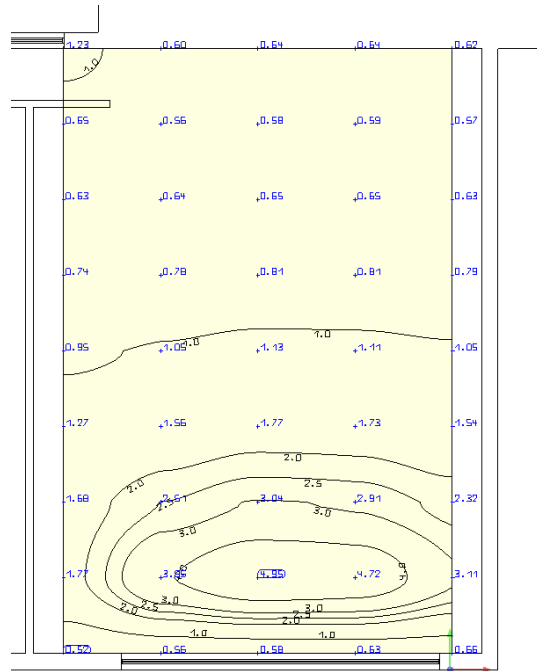
Geometri bukaan hasil optimasi desain parametrik (**Gambar 3.1**) dimasukkan kembali ke dalam perangkat lunak DIALux Evo, dengan tetap mempertahankan seluruh parameter kondisi batas (boundary condition) eksisting lainnya secara konstan.

Tabel 3.3 Hasil Simulasi optimasi desain parametrik

No	DF	Value (%)
1	DF Max	4,95
2	DF Min	0,52
3	DF Avg	1,35

Sumber: Analisis Penulis

Setelah dimasukan kedalam *persamaan (1)* hasil U_o yang didapat adalah 9,51 : 1



Sumber: Analisis Penulis

Gambar 3.7 Hasil analisis bukaan hasil iterasi menggunakan dialux evo

PEMBAHASAN

Rasio Keseragaman

Simulasi menunjukkan bahwa geometri bukaan hasil iterasi memberikan performa pemerataan pencahayaan alami yang lebih baik dalam ruang berkedalaman tinggi (*deep-plan*) melalui konfigurasi pada baris ke-2431 dengan posisi tinggi ambang bawah jendela (*sill height*) 2,00 meter dan tinggi bukaan 1,00 meter. Pergeseran posisi bukaan ke arah atas dinding (*clerestory window*) ini menjadi faktor kunci dalam mereduksi rasio keseragaman (U_o) dari 10,41 : 1 pada kondisi eksisting menjadi 9,51 : 1 pada desain generatif. Perbaikan ini terjadi karena pada kondisi eksisting, jendela konvensional dengan *sill height* rendah (1,00 meter) menyebabkan penetrasi komponen langit murni terkonsentrasi secara masif hanya pada area dekat fasad, sehingga memicu lonjakan nilai *Daylight Factor* maksimum (DFmax) sebesar 2,29 di baris depan, namun jatuh drastis menyisakan hanya 0,22 (DFmin) di area terdalam. Sebaliknya, rekayasa geometri yang menggeser bukaan menjadi horizontal memanjang dengan panjang 5,40 meter tepat di bawah plafon mampu membuat sudut datang cahaya menjangkau zona tengah hingga paling belakang secara lebih tegak lurus melonjakkan nilai (DFmax) menjadi 4,95 sekaligus memanfaatkan refleksi sekunder permukaan plafon (*light-redirecting effect* secara pasif) untuk mendistribusikan DF cahaya secara lebih tinggi dengan nilai rata-rata (DFavg) = 1,35 dan nilai (DFmin) sebesar 0,52.

Performa Cahaya, potensi Silau dan Kenyamanan Termal

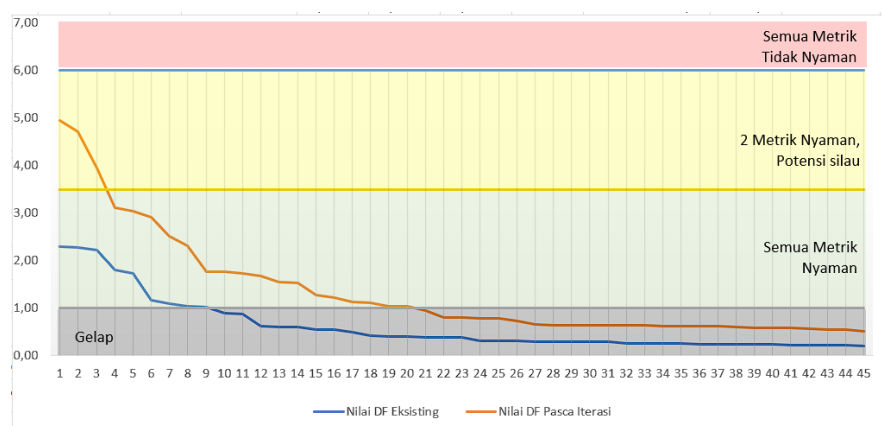
Evaluasi performa pencahayaan, potensi silau, dan kenyamanan termal dalam penelitian ini mengacu pada *Malaysian Standard code MS 1525:2014* (Department of Standards Malaysia, 2014) sebagai acuan penilaian awal (*preliminary assessment*). Berdasarkan klasifikasi rentang nilai *Daylight Factor* (DF) pada 45 titik ukur yang

disimulasikan menggunakan DIALUx Evo, hasil menunjukkan bahwa nilai DF pasca-iterasi mengalami kenaikan yang signifikan dibandingkan dengan kondisi eksisting. Nilai DF yang berhasil ditingkatkan ke rentang titik nyaman (1,0%–3,5%) mencapai 37,8% (17 titik) dari yang sebelumnya hanya 20% (9 titik). Sejalan dengan itu, luas area pada rentang gelap (<1,0%) berhasil ditekan dari 80% (36 titik) menjadi 55,6% (25 titik). Namun, peningkatan kuantitas cahaya ini juga berdampak pada munculnya area potensi silau pada rentang 3,6%–6,0% sebesar 6,7% (3 titik), dari yang sebelumnya 0%.

Tabel 3.4 Klasifikasi rentang nilai DF berdasarkan standar (MS 1525:2014)

No	Rentang Nilai DF (%)	Jumlah Titik Ukur		Keterangan (MS 1525:2014)		
		DF Eksisting	DF Pasca-Iterasi	Pencahaya-an	Silau	Kenyamanan Termal
1	< 1,0	36	25	Perceptible	Imperceptible	Acceptable
2	1,0-3,5	9	17	Acceptable	Acceptable	Acceptable
3	3,6-6,0	0	3	Tolerable	Uncomfortable	Tolerable
4	> 6,0	0	0	Intolerable	Intolerable	Uncomfortable

Sumber: Analisis Penulis



Sumber: Analisis Penulis

Gambar 3.8 Hasil analisis bukaan hasil iterasi menggunakan dialux evo

Secara keseluruhan, desain pasca-iterasi terbukti menunjukkan performa yang lebih baik dalam mengoptimalkan distribusi cahaya di dalam ruang. Sebanyak 44,4% dari total titik ukur (20 titik) kini telah berhasil keluar dari zona gelap dan masuk ke dalam metrik pencahayaan serta kenyamanan termal yang memenuhi standar minimum MS 1525:2014 (Department of Standards Malaysia, 2014). Meskipun intervensi geometri ini memunculkan potensi silau pada 3 titik ukur, parameter DF yang bersifat statis belum dapat menyimpulkan terjadinya gangguan visual yang mutlak. Oleh karena itu, evaluasi probabilistik yang lebih presisi menggunakan metrik silau dinamis seperti *Daylight Glare Probability* (DGP) atau *Unified Glare Rating* (UGR) direkomendasikan secara khusus sebagai agenda untuk penelitian lanjutan.

Kontribusi terhadap riset Terdahulu

Pola temuan berupa penurunan rasio keseragaman (U_o) dari 10,41:1 menjadi 9,51:1 serta peningkatan (DF_{avg}) ke 1,35% melalui peninggian elevasi jendela (sill 2,00 m dan

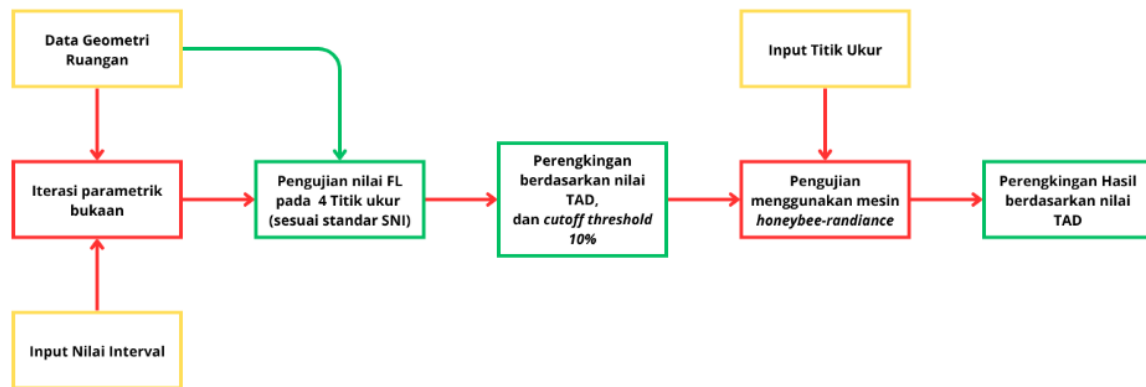
panjang 5,40 m) secara langsung mendukung hasil eksperimen (Maurya et al., 2023) yang membuktikan bahwa penaikan ketinggian ambang bawah bukaan vertikal efektif memperdalam penetrasi fluks cahaya sekaligus memperbaiki indeks uniformitas bidang kerja. Namun, rentang penurunan nilai (U_o) yang relatif terbatas serta masih bertahannya zona gelap ($<1,0\%$) sebesar 55,6% pada ruang berkedalaman 10,26 meter ini secara fisis mengonfirmasi pola temuan (Szentesi-Nejur et al., 2022) dan (Noor & Rahman Joarder, 2026). Pola data tersebut memvalidasi kesimpulan mereka bahwa rekayasa bukaan samping sisi tunggal (side-lit) pada denah mendalam (deep-plan) memiliki batasan cakupan, sehingga pencapaian distribusi cahaya yang sepenuhnya homogen hingga ke zona inti terdalam tetap membutuhkan intervensi penetrasi atas seperti sistem skylight atau pipa cahaya horizontal (horizontal light pipe). Di sisi lain, peningkatan kuantitas fluks cahaya yang mendongkrak (D_{fmax}) menjadi 4,95% tetapi memicu area potensi silau baru sebesar 6,7% (3 titik) di dekat fasad secara tepat mereplikasi pola dilema kompromi (trade-off) (Lakhdari et al., 2021), di mana pemenuhan kuantitas otonomi pencahayaan alami berisiko mengorbankan kenyamanan visual pengguna pada zona yang terlalu dekat dengan jendela. Fenomena pergeseran performa lingkungan visual yang digerakkan oleh permutasi koordinat geometri ini pun sejalan dengan kerangka analisis (Xue & Liu, 2022) yang menempatkan variabel bukaan dinding selubung luar sebagai faktor paling sensitif dalam mengendalikan kualitas medan cahaya interior bangunan. Melalui perbandingan pola-pola tersebut, gap penelitian yang ditemukan dalam studi ini adalah adanya batas ambang kinerja (performance ceiling) inheren dari optimasi geometri bukaan tunggal pasif satu sisi, di mana pendekatan mandiri ini terbukti belum mampu mengeliminasi ketimpangan kontras ekstrem serta zona bayangan secara menyeluruh tanpa adanya integrasi sistem multi-perangkat seperti pembayangan adaptif, light shelf, atau bukaan atap terintegrasi seperti yang diterapkan pada studi-studi terdahulu.

Sintesis Algoritma Desain

Perumusan algoritma ini dirancang sebagai alur logika komputasional yang berfungsi sebagai mesin pencari otomatis untuk menghasilkan model desain bukaan paling optimal berbasis performa pencahayaan alami, dengan struktur berpikir yang dibagi ke dalam tiga kelompok warna fungsional (**Gambar 3.7**). Komponen berwarna merah merepresentasikan jalur kritis (critical path) serta pondasi fundamental yang bersifat absolut sebagai core architecture utama untuk mengendalikan seluruh proses komputasi dari awal hingga akhir. Komponen berwarna kuning menetapkan parameter input langsung oleh pengguna (user inputs) sebagai batas minimum operasional (boundary minimum) yang tidak dapat dikurangi agar mesin simulasi tetap berjalan, namun memiliki sifat skalabilitas sehingga jenis dan jumlah variabelnya dapat ditambah atau dikembangkan di masa mendatang. Sementara itu, komponen berwarna hijau merupakan elemen modular fleksibel yang saat ini diwujudkan dalam bentuk filter regulasi SNI 03-2396-2001 (Badan Standardisasi Nasional, 2001) dan fungsi pemotongan jumlah data kuantitatif (data cutoff threshold) untuk mereduksi volume data guna meringankan beban kerja perangkat keras komputasi dan mencegah hambatan pemrosesan data (hardware lag). Komponen hijau ini dapat diubah, ditambah, diganti total, atau bahkan dihilangkan sepenuhnya seiring perkembangan kapasitas mesin komputasi di masa depan agar seluruh kombinasi konfigurasi geometri yang tercipta dapat langsung diuji secara utuh tanpa penyaringan awal.

Optimasi Geometri Bukaan untuk Performa Pencahayaan Alami Ruang Kuliah (Kaunang)

<https://radial.e-journal.unbitago.ac.id/radial/index>



Sumber: Analisis Penulis

Gambar 3.9 Algoritma Desain

KESIMPULAN

Analisis menunjukkan pendekatan parametrik efektif mengoptimalkan geometri bukaan untuk meningkatkan kualitas sebaran cahaya. Penerapan metode ini mereduksi nilai (U_o) dari 10,41:1 menjadi 9,51:1, serta mendongkrak proporsi zona nyaman (MS 1525:2014) (Department of Standards Malaysia, 2014) sebesar 37,8% dari kondisi awal yang hanya 20%. Meskipun demikian, terdapat peningkatan potensi silau sebesar 6,7% yang memerlukan kajian lanjutan dengan parameter lebih presisi. Secara metodologis, alur komputasi yang dirumuskan pada studi kasus tunggal ini memerlukan validasi lebih lanjut pada variasi tipologi ruang lain agar dapat digeneralisasi menjadi model komputasi generik.

Hasil konfigurasi desain ini dapat menjadi dasar aplikatif untuk ruang berkarakteristik serupa, dengan tetap mempertimbangkan variabel teknis di luar lingkup penelitian. Replikasi metode pada karakteristik ruang yang berbeda tetap dapat dilakukan melalui penyesuaian alur komputasi yang ada. Temuan akhir membuktikan bahwa optimasi pada konfigurasi bukaan tunggal (single-opening) secara mandiri belum mampu mencapai target rasio keseragaman ideal antara 1,67:1 hingga 1,25:1 (Mohammed, 2026; Yunitsyna & Toska, 2023). Oleh karena itu, diperlukan integrasi dengan strategi pencahayaan tambahan untuk memenuhi target performa tersebut.

Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki keterbatasan metodologis karena alur logika komputasi baru diterapkan pada satu model ruangan spesifik menggunakan data simulasi DIALux-evo, bukan pengukuran empiris di lapangan. Selain itu, keterbatasan spesifikasi perangkat keras membatasi presisi pemrosesan data, sehingga peneliti harus menggunakan interval 0,2 meter dan ambang batas (threshold) filtrasi 10% demi efisiensi waktu. Sebagai ilustrasi, memperkecil interval menjadi 0,1 meter akan melonjakkan volume data secara eksponensial sebesar 16 kali lipat (menjadi 782.480 data) dengan durasi pemrosesan mencapai 8 jam; pembatasan ini berisiko mengeliminasi konfigurasi bukaan optimal lainnya. Kendala komputasi ini juga membatasi simulasi pada kondisi langit statis (CIE Overcast Sky) karena kalkulasi dinamis tahunan (UDI) tidak memungkinkan (feasible) dilakukan dengan perangkat saat ini. Terakhir, evaluasi silau baru menggunakan pendekatan standar MS 1525:2014 akibat adanya keterbatasan metodologis metrik DGP pada kondisi langit statis

Optimasi Geometri Bukaan untuk Performa Pencahayaan Alami Ruang Kuliah (Kaunang)

<https://radial.e-journal.unbitago.ac.id/radial/index>

(Mcneil & Burrell, 2016), dengan fokus optimasi yang murni diarahkan untuk mencari nilai Rasio Kecerlangan (Uo) tanpa mempertimbangkan variabel non-fotometrik seperti kenyamanan psikologis, kualitas akses pandang, dan kelayakan konstruksi fisik.

DAFTAR PUSTAKA

- Aghajari, S., & Chen, C. C. (2025). Optimizing Classroom Lighting for Enhanced Visual Comfort and Reduced Energy Consumption. *Buildings*, 15(8). <https://doi.org/10.3390/buildings15081233>
- Badan Standarisasi Nasional. (2001). *SNI 03-2396-2001 : Tata Cara Perancangan Sistem Pencahayaan Alami pada Bangunan Gedung*.
- Department of Standards Malaysia. (2014). *MS 1525:2014: Energy Efficiency and Use of Renewable Energy for Non-Residential Buildings - Code of Practice*. Retrieved from <http://www.standardsmalaysia.gov.my>
- Hemmerling, M., Seegers, M., & Witzel, D. (2023). Calculation of energy saving potential for lighting with DIALux evo. *Energy and Buildings*, 278. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112475>
- Lakhdari, K., Sriti, L., & Painter, B. (2021, October 15). Parametric optimization of daylight, thermal and energy performance of middle school classrooms, case of hot and dry regions. *Building and Environment*, Vol. 204. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108173>
- Liu, G., Qu, G., Ren, L., Zhang, Y., Zang, X., & Dang, R. (2022). The influence mechanism of daylight visual evaluation in college classrooms under visual field physiological characteristics of student group: Case study. *Building and Environment*, 209. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108655>
- Liu, Y., Chen, K., Ni, E., & Deng, Q. (2023). Optimizing classroom modularity and combinations to enhance daylighting performance and outdoor platform through ANN acceleration in the post-epidemic era. *Heliyon*, 9(11). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21598>
- Mangkuto, R. A. (2016). Validation of DIALux 4.12 and DIALux evo 4.1 against the Analytical Test Cases of CIE 171:2006. *LEUKOS*, 12(3), 139–150. <https://doi.org/10.1080/15502724.2015.1061438>
- Maurya, A. K., Kumar, R., & Kumar, A. (2023). Assessing Window Design's Impact on Daylight Uniformity in Classrooms in Patna, India. *Engineering, Technology and Applied Science Research*, 13(5), 11898–11903. <https://doi.org/10.48084/etasr.6212>
- Mcneil, A., & Burrell, G. (2016). APPLICABILITY OF DGP AND DGI FOR EVALUATING GLARE IN A BRIGHTLY DAYLIT SPACE. *SimBuild 2016*, 57–64. IBPSA-USA. Retrieved from www.ashrae.org
- Mohammed, M. A. (2026). Harnessing daylight strategies for maximizing visual comfort in architectural design studios. *Frontiers in Built Environment*, 11. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2025.1741763>
- Mutmainnah, N., Saputra, W., & Musa, H. (2026). EVALUASI PENCAHAYAAN ALAMI RUANG STUDIO DASAR 2 MELALUI ILUMINANSI DAN DAYLIGHT FACTOR. *Radial*, 14(1), 38–50. <https://doi.org/10.37971/radial.vXXiXX.XXX>

- Noor, R., & Rahman Joarder, M. A. (2026). Horizontal Light Pipe System for Daylight Optimization in Deep-Plan Library Spaces in a Tropical Climate. *Journal of Daylighting*, 13(1), 227–252. <https://doi.org/10.15627/jd.2026.13>
- Szentesi-Nejur, S., de Luca, F., & Flamand, K. (2022, September 13). *Simulation Based Daylight Uniformity Optimizations for Elementary School Projects in Quebec Province*. 639–648. Ghent. <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2022.1.639>
- Xue, Y., & Liu, W. (2022). A Study on Parametric Design Method for Optimization of Daylight in Commercial Building's Atrium in Cold Regions. *Sustainability (Switzerland)*, 14(13). <https://doi.org/10.3390/su14137667>
- Yunitsyna, A., & Toska, A. (2023). Evaluation of the Visual Comfort and Daylight Performance of the Visual Art Classrooms. *Journal of Daylighting*, 10(1), 117–135. <https://doi.org/10.15627/jd.2023.9>
- Zhao, Z., Gao, Z., Wang, H., Meng, F., Zhu, X., & Xu, F. (2025, November 1). DIALux evo and Ladybug + Honeybee: A review of performance and application in electric lighting environment. *Building and Environment*, Vol. 285. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.113570>