



Optimalisasi Pencahayaan Alami dan Buatan pada Laboratorium Komputer Menggunakan Simulasi Dialux

Nur Mutmainnah^{1*}, Rahmayanti², Harun Musa³

¹Teknik Arsitektur, Universitas Negeri Gorontalo, Jl. Prof. BJ. Habibie, Indonesia

²Teknik Arsitektur, Universitas Negeri Gorontalo, Jl. Prof. BJ. Habibie, Indonesia

³Teknik Multimedia dan Jaringan, Politeknik Negeri Ujung Pandang, Jl. Tamalanrea Raya, Indonesia

Article Info:

Submitted: Oktober 2025

Reviewed: November 2025

Accepted: Desember, 2025

Keywords:

Kata kunci 1; Pencahayaan Alami
 Kata Kunci 2; Pencahayaan Buatan
 Kata Kunci 3; Simulasi Dialux
 Kata Kunci 4; kenyamanan visual
 Kata Kunci 5: pencahayaan hybrid

Koresponden Penulis:

Nur Mutmainnah

Teknik Arsitektur, Universitas Negeri
 Gorontalo

Jl. Prof. BJ. Habibie, Indonesia

Email: nur_mutmainnah@ung.ac.id

Abstract

This research examines the optimization of natural and artificial lighting in the ABG Computer Laboratory using Dialux simulation. The study aims to evaluate daylight performance based on window configuration, investigate the causes of deviation between simulation results and on-site illuminance measurements, and develop an artificial lighting layout that fulfills visual comfort standards for computer-based learning spaces. The initial daylight simulation revealed that 59.8% of the total floor area achieved illumination levels of ≥ 300 lux; however, field measurements showed substantially lower illuminance due to shading from dense vegetation in front of the façade, leading to uneven light distribution across the room. The artificial lighting simulation using 50W 6500K LED luminaires successfully provided uniform illuminance of ≥ 500 lux throughout the working plane. These findings confirm that a hybrid lighting system integrating optimized daylight and artificial lighting is the most reliable and energy-efficient solution for computer-oriented educational environments.

Abstrak

Penelitian ini mengkaji optimalisasi pencahayaan alami dan pencahayaan buatan pada Laboratorium Komputer Arsitektur Bangunan Gedung UNG melalui simulasi Dialux. Tujuan penelitian adalah mengevaluasi kinerja daylight berdasarkan konfigurasi bukaan jendela, mengidentifikasi penyebab deviasi antara hasil simulasi dan pengukuran iluminansi di lapangan, serta merancang tata cahaya buatan yang memenuhi standar kenyamanan visual pada ruang pembelajaran berbasis komputer. Hasil simulasi daylight menunjukkan bahwa 59,8% luas ruang mencapai iluminansi ≥ 300 lux, namun pengukuran aktual di lapangan memperlihatkan nilai jauh lebih rendah akibat shading vegetasi pada fasad, sehingga distribusi cahaya di dalam ruangan menjadi tidak merata. Simulasi pencahayaan buatan dengan lampu LED 50W 6500K menghasilkan iluminansi seragam ≥ 500 lux pada seluruh bidang kerja. Temuan ini menegaskan bahwa sistem pencahayaan hybrid memadukan daylight yang dioptimalkan dengan pencahayaan buatan merupakan pendekatan paling stabil dan efisien untuk memenuhi kebutuhan kenyamanan visual pada ruang laboratorium komputer.

*This is an open access article under the **CC BY** license.*



PENDAHULUAN

Kualitas pencahayaan merupakan aspek krusial dalam perancangan ruang pendidikan, terutama pada laboratorium komputer yang menuntut aktivitas visual intensif serta interaksi dengan layar digital dalam durasi panjang. Kondisi pencahayaan yang tidak memadai terbukti meningkatkan tingkat kelelahan mata, stres visual, menurunkan konsentrasi, serta meningkatkan risiko kesalahan input ketika bekerja di depan komputer yang pada akhirnya berdampak terhadap kinerja dan produktivitas akademik pengguna ruang (Fang *et al.*, 2022). Temuan penelitian lainnya menunjukkan bahwa kenyamanan visual memiliki hubungan langsung dengan efektivitas pembelajaran; ruang dengan pencahayaan yang baik mendorong fokus, kestabilan mental, dan performa kognitif yang lebih tinggi pada peserta didik dibandingkan ruang yang tidak memenuhi standar pencahayaan (Yunitsyna & Toska, 2023). Penelitian lapangan pada ruang kelas dan laboratorium juga menegaskan bahwa distribusi cahaya yang merata, kontrol silau, dan iluminasi yang sesuai standar merupakan faktor utama dalam menciptakan lingkungan belajar yang sehat dan produktif (Hwang & Kim, 2011).

Upaya peningkatan kualitas pencahayaan pada bangunan pendidikan umumnya berfokus pada pemaksimalan pencahayaan alami (*daylighting*) karena lebih hemat energi dan memberikan pengalaman visual yang lebih nyaman. Green Building Council Indonesia (GBCI) bahkan mensyaratkan minimal 30% area kerja harus menerima iluminansi ≥ 300 lux untuk memenuhi standar efisiensi energi dan kesehatan pengguna (GBCI, 2023). Namun, pencahayaan alami memiliki keterbatasan yang sangat dipengaruhi oleh orientasi bukaan, ukuran jendela, material kaca, reflektansi interior, serta shading eksternal seperti bangunan atau vegetasi (Neufert, 2019; Mo *et al.*, 2024). Ketidaksesuaian antara desain *daylighting* dan kondisi aktual dapat menghasilkan distribusi cahaya yang tidak merata, termasuk zona terlalu terang atau terlalu gelap, sehingga memicu visual discomfort pada pengguna.

Kondisi tersebut ditemukan pada Laboratorium Komputer ABG Universitas Negeri Gorontalo. Simulasi desain awal menunjukkan bahwa bukaan jendela laboratorium secara teoritis mampu menghadirkan *daylight* yang memadai. Namun hasil pengukuran lapangan memberikan nilai iluminansi yang jauh lebih rendah akibat adanya shading vegetasi tepat di depan jendela. Fase ini mengindikasikan bahwa desain bukaan yang baik tidak selalu menjamin performa pencahayaan optimal apabila faktor eksternal tidak dianalisis secara menyeluruh. Untuk memenuhi kebutuhan visual ruang komputer, pencahayaan buatan tetap harus dikelola secara presisi dengan iluminansi minimum ≥ 500 lux, keseragaman distribusi cahaya yang baik, serta suhu warna yang nyaman bagi pengguna (Aghajari *et al.*, 2025). Dalam konteks tersebut, strategi *hybrid lighting* yakni penggabungan pencahayaan alami dan pencahayaan buatan secara terukur—diakui sebagai pendekatan paling efektif untuk mencapai kenyamanan visual sekaligus efisiensi energi pada ruang pendidikan berbasis komputer. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa penggunaan kombinasi *daylight* dan lampu LED dengan kontrol adaptif mampu meningkatkan pemerataan distribusi iluminansi, mengurangi tingkat kelelahan visual, serta menurunkan konsumsi energi dibandingkan penggunaan satu sumber cahaya saja (Aghajari *et al.*, 2025).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini dilakukan untuk memberikan solusi optimal pada performa pencahayaan Laboratorium Komputer ABG melalui pendekatan analisis *daylighting* berbasis simulasi. Secara khusus, penelitian ini bertujuan untuk: mengevaluasi performa *daylighting* berdasarkan kondisi desain asli laboratorium, mengidentifikasi penyebab deviasi intensitas pencahayaan antara hasil simulasi dan pengukuran lapangan, serta merancang konfigurasi pencahayaan buatan yang mampu memenuhi standar kenyamanan visual ruang komputer secara optimal.

TINJAUAN PUSTAKA

1. Pencahayaan dalam Ruang Pendidikan

Kualitas pencahayaan berperan penting dalam kenyamanan visual dan performa akademik pengguna ruang pendidikan. Pencahayaan yang kurang memadai menyebabkan visual fatigue, penurunan fokus, stres visual, dan

peningkatan kesalahan input pada aktivitas berbasis komputer (Abubakr Ali et al., 2024). Studi terbaru menegaskan bahwa distribusi cahaya yang merata dan iluminansi yang stabil memiliki korelasi langsung dengan peningkatan konsentrasi dan hasil belajar (Yunitsyna & Toska, 2023).

2. Daylighting dan Standar Kenyamanan Visual

Daylighting merupakan strategi penerangan alami untuk meningkatkan kenyamanan visual dan efisiensi energi bangunan pendidikan. Green Building Council Indonesia (GBCI, 2023) mensyaratkan minimal 30% area kerja memperoleh iluminansi ≥ 300 lux sebagai standar kesehatan visual dan produktivitas pengguna. Namun, performa daylight sangat dipengaruhi orientasi bangunan, ukuran dan jenis bukaan, reflektansi interior, serta shading vegetasi atau bangunan di luar, yang dapat menyebabkan ketidakmerataan cahaya dan area underlit atau overlit (Neufert, 2019; Mo et al., 2024).

3. Daylighting pada Ruang Komputer

Ruang komputer membutuhkan pencahayaan yang lebih terkendali dibanding ruang kelas biasa, karena interaksi langsung dengan layar digital memiliki sensitivitas tinggi terhadap glare dan kontras visual. Penelitian Kong, Z. & Jakubiec, J. A. (2021) menemukan bahwa pencahayaan alami yang tidak dikelola dapat mengganggu kenyamanan visual pengguna komputer, sedangkan pencahayaan terlalu rendah meningkatkan ketegangan mata. Hal ini mengindikasikan bahwa daylighting saja belum dapat menjamin kondisi visual optimal pada ruang komputer.

4. Peran Simulasi Digital dalam Evaluasi dan Perancangan Pencahayaan

Simulasi pencahayaan berbasis software telah menjadi metode efektif untuk menilai performa pencahayaan sebelum implementasi aktual. Dialux mampu memprediksi distribusi iluminansi, potensi glare, luminansi permukaan, hingga kebutuhan konfigurasi lampu buatan. Penelitian Al-Saeed et al. (2024) menunjukkan bahwa simulasi mampu mengurangi risiko desain pencahayaan gagal dan memastikan standar iluminansi sesuai kebutuhan ruang pendidikan. Rahmayanti, dkk. (2024) membuktikan bahwa desain pencahayaan ideal hanya dapat dicapai melalui integrasi daylighting dan lampu buatan yang dioptimalkan melalui simulasi. Temuan ini sangat relevan untuk ruang komputer yang membutuhkan intensitas cahaya stabil dan *glare* minimal.

5. Konsep Hybrid Lighting sebagai Solusi Optimal untuk Ruang Komputer

Untuk mengatasi keterbatasan daylighting, pendekatan *hybrid lighting* kombinasi pencahayaan alami dan buatan terbukti meningkatkan kenyamanan visual dan efisiensi energi secara bersamaan. Aghajari et al. (2025) menyatakan bahwa ruang komputer memerlukan iluminansi ≥ 500 lux, distribusi cahaya seragam, dan suhu warna netral (4000–5000K) untuk mendukung konsentrasi dan ketahanan visual. Schmidt & Kramer (2021) menambahkan bahwa penerapan kontrol otomatis hybrid lighting dapat mengurangi konsumsi energi hingga 35–60% tanpa mengorbankan kenyamanan visual.

METODOLOGI

Pendekatan penelitian ini adalah *simulated-validated lighting performance assessment* yang menggabungkan simulasi pencahayaan dan pengukuran lapangan untuk mengevaluasi performa visual ruang secara akurat.

1. Pengumpulan Data Ruang

Data fisik yang dikumpulkan meliputi dimensi laboratorium, ukuran dan posisi bukaan jendela, tinggi plafon, warna dan reflektansi dinding, serta tata letak meja komputer. Data dicatat untuk memastikan simulasi menyerupai kondisi aktual.

2. Simulasi *Daylighting*

Simulasi *daylighting* dilakukan menggunakan Dialux dengan penentuan waktu pukul 14.38 sesuai waktu pengukuran di lapangan. Parameter yang disimulasikan meliputi geometri ruang, intensitas cahaya matahari pada waktu tersebut, sifat pemantulan permukaan, dan karakteristik bukaan jendela. Tahap simulasi pertama dilakukan tanpa shading vegetasi, sedangkan tahap kedua dilakukan dengan pemodelan vegetasi untuk menilai pengaruh shading.

3. Pengukuran Lapangan

Pengukuran intensitas cahaya dilakukan menggunakan lux meter pada tiga titik representatif:

- titik A (dekat jendela),
- titik B (area tengah ruangan), dan
- titik C (area belakang ruangan).

Pengukuran dilakukan pada jam yang sama dengan simulasi untuk memastikan kesesuaian data validasi.

4. Simulasi Pencahayaan Buatan

Setelah diketahui bahwa daylighting tidak mampu memenuhi kebutuhan iluminansi, simulasi pencahayaan buatan dilakukan menggunakan variasi lampu LED. Jenis lampu dipilih berdasarkan efisiensi, indeks rendering warna, serta suhu warna yang relevan untuk ruang komputer, kemudian disimulasikan untuk mendapatkan konfigurasi yang menghasilkan iluminansi ≥ 500 lux secara merata.

5. Analisis dan Evaluasi

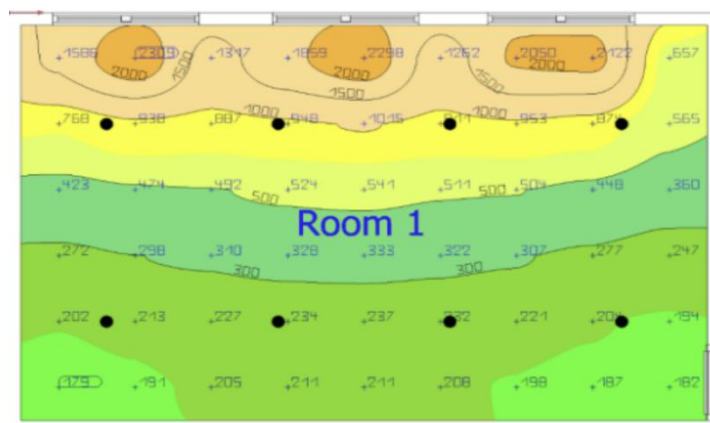
Evaluasi dilakukan dengan membandingkan pencahayaan alami dan buatan terhadap standar kenyamanan visual terkini serta temuan penelitian lima tahun terakhir. Hasil analisis digunakan untuk menentukan rekomendasi desain pencahayaan hybrid yang efektif untuk ruang komputer.

HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Hasil Simulasi Pencahayaan Alami

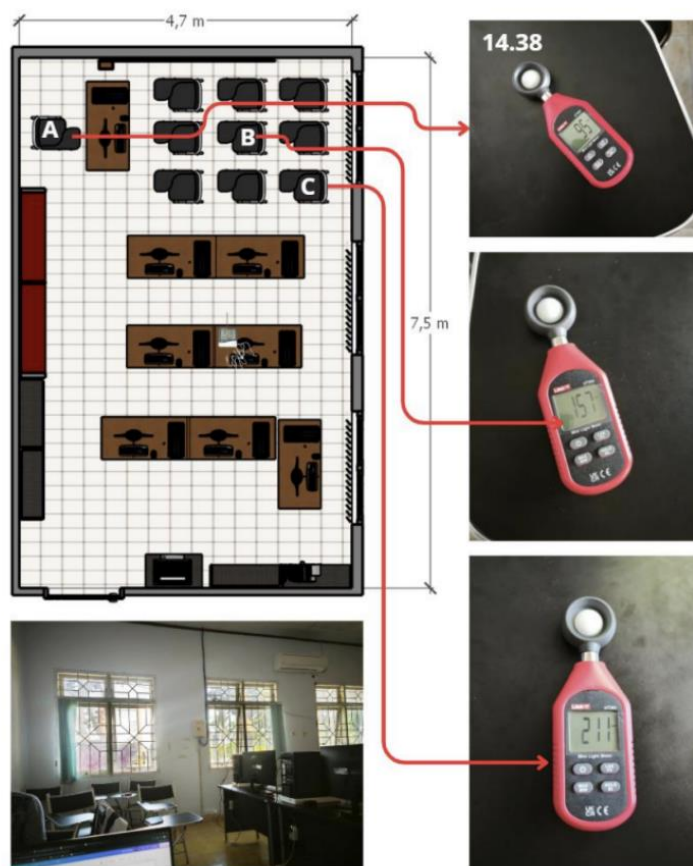


Gambar. 1. Permodelan pada Simulasi Pencahayaan Alami Tanpa Pohon



Gambar. 2. Hasil Simulasi Pencahayaan Alami Tanpa Pohon

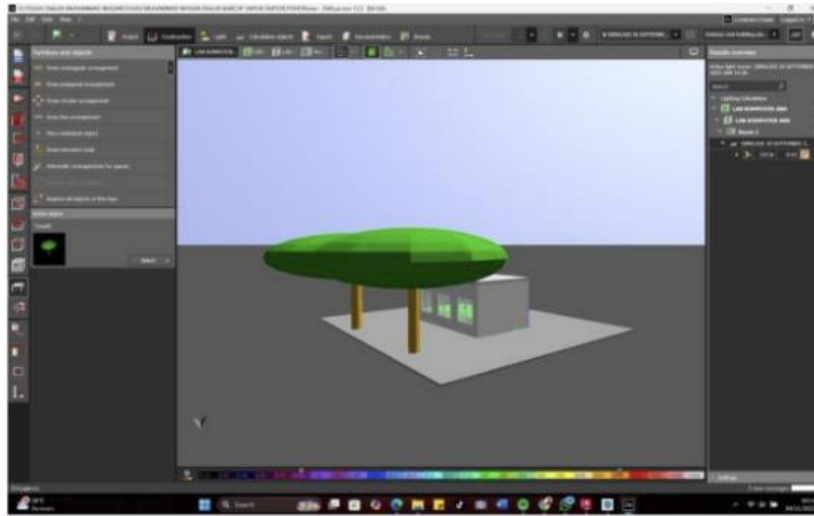
Ruang Laboratorium Komputer ABG Memiliki Ukuran 7.5 meter (panjang) x 4.7 meter (lebar) x 3,5 meter (tinggi). Serta terdapat 3 bukaan jendela dengan dimensi 1,6 meter (lebar jendela) x 1,7 meter (tinggi) x 0,05 meter (lebar kusen) seperti terlihat pada gambar 3. Hasil simulasi daylighting menunjukkan bahwa secara teoritis Laboratorium Komputer ABG memiliki potensi pencahayaan alami yang sangat baik, ditunjukkan oleh capaian iluminansi ≥ 300 lux pada 59,8% dari luas ruang kerja seperti yang ditunjukkan pada gambar 2. Persentase ini melampaui standar *daylighting* GBCI untuk ruang pendidikan. Namun, temuan ini tidak sepenuhnya terkonfirmasi pada pengukuran lapangan, di mana intensitas cahaya aktual hanya berkisar 110–210 lux, khususnya pada area tengah dan belakang ruangan. Deviasi antara hasil simulasi dan pengukuran lapangan menandakan bahwa persoalan daylighting bukan terletak pada desain bukaan atau orientasi fasad, melainkan pada faktor eksternal berupa shading vegetasi padat di depan bangunan. Kondisi ini sejalan dengan penelitian Mo et al. (2024) dan Yunitsyna & Toska (2023), yang menunjukkan bahwa shading eksternal memiliki dampak paling signifikan terhadap penurunan daylight effectiveness pada ruang pendidikan bahkan ketika bukaan memenuhi standar rasio luas jendela terhadap lantai.



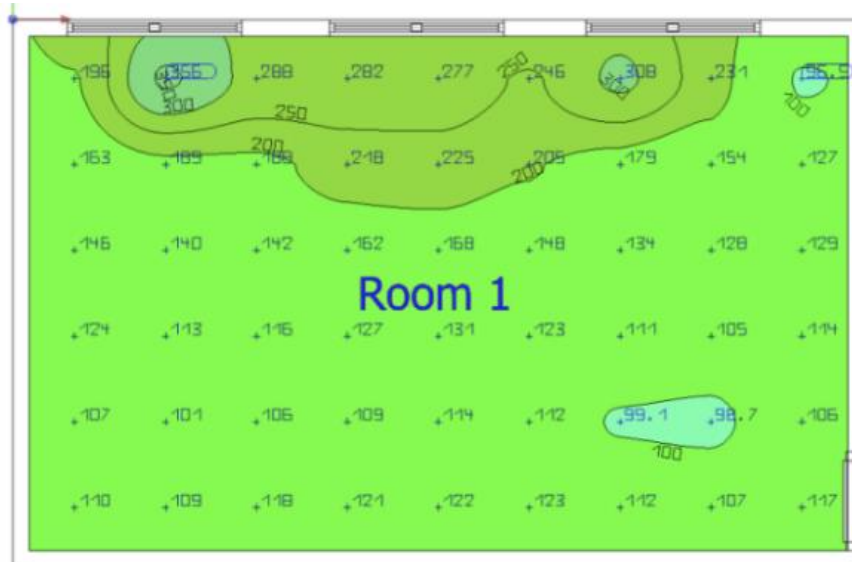
Gambar. 3. Denah dan Posisi Alat Ukur

Perbedaan ekstrem antara simulasi dan hasil lapangan juga memperkuat argumen bahwa daylighting bersifat sangat kontekstual terhadap karakteristik lingkungan. Ketika shading menghambat penetrasi cahaya matahari, distribusi cahaya menjadi tidak merata dan terbentuk gradien intensitas dari depan ke belakang ruangan. Studi Dang et al. (2023) menjelaskan bahwa distribusi cahaya yang timpang merupakan salah satu penyebab utama visual fatigue pada pengguna komputer akibat adanya perbedaan kontras terang-gelap yang signifikan pada bidang pandang. Temuan ini relevan dengan kondisi Laboratorium ABG yang menunjukkan zona terang hanya di dekat jendela, sementara area kerja lainnya mengalami defisit cahaya. Dengan demikian, preferensi memperbesar

bukaan untuk mengatasi permasalahan daylighting bukanlah solusi efektif, karena hambatan eksternal tetap akan menurunkan intensitas cahaya masuk.



Gambar. 3. Hasil Simulasi Pencahayaan Alami Tanpa Pohon

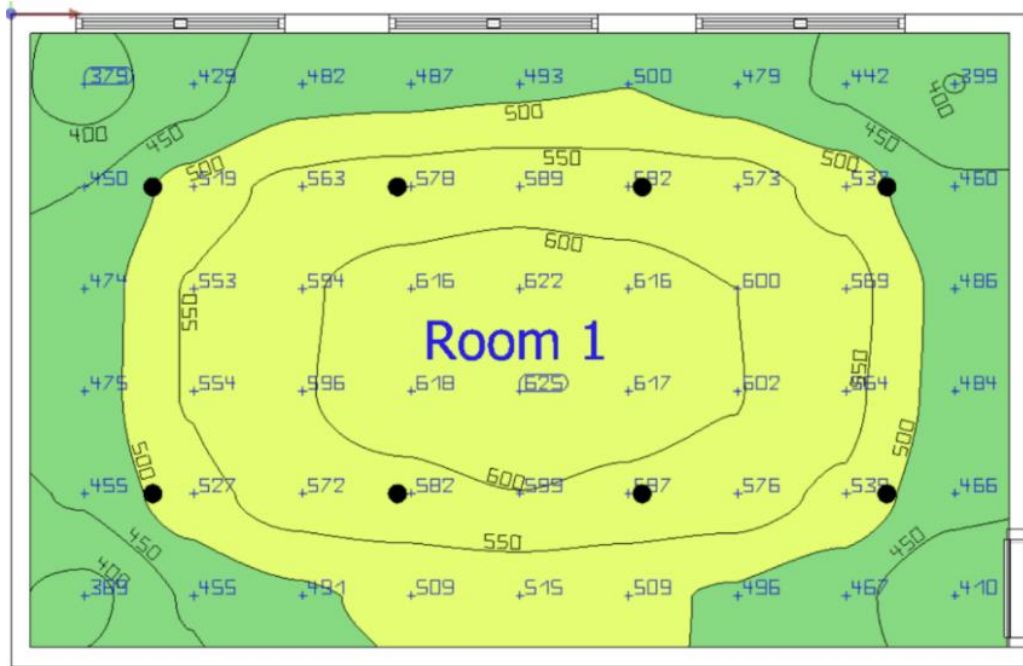


Gambar. 4. Hasil Simulasi Pencahayaan Alami dengan Pohon

b. Simulasi Pencahayaan Buatan

Simulasi pencahayaan buatan yang dilakukan selanjutnya menunjukkan hasil yang jauh lebih stabil, di mana penggunaan lampu LED 50W 6500K menghasilkan iluminansi >500 lux secara merata di seluruh ruang kerja. Hasil ini berkesesuaian dengan temuan Aghajari *et al.* (2025) yang menunjukkan bahwa ruang pendidikan berbasis komputer membutuhkan pencahayaan buatan yang stabil dengan tingkat keseragaman tinggi untuk mencegah beban visual berkepanjangan. Selain itu, suhu warna cahaya berkisar 5000–6500K terbukti meningkatkan fokus kognitif pada aktivitas digital learning, sebagaimana juga dilaporkan oleh Al-Mowallad *et al.* (2024). Dengan kata lain, pencahayaan buatan tidak hanya berfungsi sebagai pengganti daylight, namun sebagai sistem pendukung ergonomi visual pengguna.

Gambar. 4. Hasil Simulasi Pencahayaan Buatan



c. Hybrid Lighting System

Apabila hasil daylighting dan pencahayaan buatan dianalisis secara komplementer, temuan penelitian ini mendukung paradigma desain pencahayaan modern yang mengarah pada *hybrid lighting system*, yakni integrasi daylight dan pencahayaan buatan yang terkontrol. S. Aghajari (2025) menyatakan bahwa *hybrid lighting* merupakan strategi paling efisien untuk ruang pendidikan karena mampu mempertahankan kenyamanan visual sepanjang hari tanpa ketergantungan tunggal pada faktor eksternal seperti cuaca atau vegetasi. Temuan penelitian ini menguatkan pernyataan tersebut: meskipun bukaan ruang sudah ideal, shading vegetasi menyebabkan performa daylighting tidak dapat diandalkan secara konsisten sehingga keberadaan pencahayaan buatan menjadi prasyarat untuk mencapai standar kenyamanan visual.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa performa pencahayaan Laboratorium ABG tidak dapat dioptimalkan hanya dengan memaksimalkan daylight, karena adanya faktor eksternal yang tidak sepenuhnya dapat dikendalikan. Yang dapat dikendalikan adalah pengaturan pencahayaan buatan untuk memastikan iluminansi stabil sesuai standar ruang komputer dan pengalaman belajar digital. Dengan demikian, desain pencahayaan ideal untuk laboratorium komputer bukanlah *daylight-oriented*, tetapi *daylight-supported and artificially-reinforced*, sesuai tren penelitian terbaru dalam arsitektur pendidikan dan ergonomi visual.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa desain bukaan Laboratorium Komputer ABG secara teoritis telah mampu menyediakan daylight yang tinggi berdasarkan simulasi Dialux, ditandai dengan capaian iluminansi ≥ 300 lux pada 59,8% area ruang. Namun, performa pencahayaan alami tidak dapat diwujudkan sepenuhnya pada kondisi nyata karena adanya shading vegetasi yang menutupi fasad jendela, menyebabkan penurunan penetrasi cahaya dan ketidakmerataan intensitas iluminansi di dalam ruangan. Ketidaksesuaian ini menghasilkan gradien pencahayaan yang ekstrem, di mana area dekat jendela memperoleh intensitas sangat tinggi sementara area tengah dan belakang ruangan berada jauh di bawah standar kenyamanan visual.

Simulasi pencahayaan buatan memberikan hasil yang jauh lebih stabil, dengan penggunaan lampu LED 50W 6500K yang mampu menghasilkan iluminansi ≥ 500 lux secara merata di seluruh area kerja. Hal ini

membuktikan bahwa pencahayaan buatan menjadi elemen krusial untuk menjamin kenyamanan pengguna ruang komputer, terutama pada kondisi shading lingkungan yang tidak dapat dikendalikan.

Mengacu pada temuan tersebut, solusi desain pencahayaan yang paling tepat bagi Laboratorium Komputer ABG adalah penerapan sistem pencahayaan hybrid, yaitu pemanfaatan daylight sebagai pencahayaan pelengkap dan penerapan pencahayaan buatan yang terstandar sebagai pencahayaan utama. Optimalisasi dapat ditingkatkan melalui tiga rekomendasi desain:

1. Pengendalian shading vegetasi dengan pemangkasan selektif atau pengaturan jarak vegetasi terhadap fasad untuk meningkatkan kedalaman penetrasi cahaya alami tanpa menghilangkan manfaat keberadaan tanaman;
2. Penataan grid lampu LED merata pada area kerja belakang dan tengah ruangan, sehingga gradien pencahayaan tidak lagi terbentuk; dan
3. Penyesuaian suhu warna dan tingkat keseragaman cahaya agar sesuai dengan kebutuhan ergonomi visual ruang berbasis komputer.

Dengan penerapan desain tersebut, performa pencahayaan Laboratorium Komputer ABG dapat memenuhi standar kenyamanan visual sekaligus mendukung efisiensi energi secara berkelanjutan.

REFERENSI

Abubakr Ali, L., Ahmed, N., Abdulkareem, A., & Mohammed, A. (2024). Optimization of lighting and visual comfort for energy efficiency in classroom. *Journal of Daylighting and Visual Environment*, 5(2), 115–128.

https://www.researchgate.net/publication/380255013_Optimization_of_Lighting_and_Visual_Comfort_for_Energy_Efficiency_in_Classroom

AL-Mowallad, E. A. M. S., Huang, X., Lu, Z., Li, X., Wu, K., Zhu, Z., & Liu, G. (2024). *Assessment and Improvement of Daylighting Quality in Classrooms with Double-Side Windows*. *Buildings*, 14(11), 3501. doi:10.3390/buildings14113501

Al-Saeed, M., Fernández, M., & Torres, A. (2024). *Application of DIALux Evo software for lighting analysis and optimization in educational buildings: A case study*. *Journal of Building Engineering*, 86, 110–239. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110239>

Badan Standardisasi Nasional. (2001). *SNI 03-6575-2001: Tata cara perancangan sistem pencahayaan buatan pada bangunan gedung*. BSN. <https://sispk.bsn.go.id/>

Dang, R., Liu, Y., & Chang, S. (2023). *The impact patterns of classroom lighting parameters on visual fatigue and a mathematical model*. *Building and Environment*, 234, 110193. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110193>

Fang, Y. et al. (2022). *A Study of the Effects of Different Indoor Lighting Conditions on Visual Comfort and Eye Health*. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9180354>

Green Building Council Indonesia. (2023). *Green Building rating tools: Energy & environmental standards for educational buildings*. Green Building Council Indonesia. <https://gbcindonesia.org>

Hwang, T., & Kim, J. (2011). *Effects of Indoor Lighting on Occupants' Visual Comfort and Eye Health in a Green Building*. <https://www.researchgate.net/publication/254097869>

Kong, Z., & Jakubiec, J. A. (2021). *Instantaneous lighting quality within higher educational classrooms in Singapore*. *Frontiers of Architectural Research*, 10(4), 787–802. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2021.05.001>

Neufert, E. (2019). *Architects' data* (3rd ed.). Wiley-Blackwell. <https://archive.org/details/ErnstNeufertArchitectsData>

Mo, S., Chen, L., Zhang, Q., & Wang, T. (2024). Impact of window-to-wall ratio and shading strategies on daylighting quality in educational buildings. *Energy and Buildings*, 301, 113-221. <https://www.sciencedirect.com>

Rahmayanti, R., Pratiwi, N., & Mile, F. Z. R. (2024). *Simulasi pencahayaan alami dan buatan pada ruang kelas menggunakan DIALux Evo 12.0*. *Jambura Journal of Architecture*, 6(1), 102–107. <https://doi.org/10.37905/jjoa.v6i1.26534>

Schmidt, F., & Kramer, R. (2021). *Hybrid lighting strategies for educational spaces: Balancing daylight and electric light for visual comfort and energy efficiency*. *Energy and Buildings*, 243, 110993. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110993> .

S. Aghajari, V., & Chen, A. (2025). *Optimizing classroom lighting for enhanced visual comfort and reduced energy consumption*. *Buildings*, 15(8), 1233. <https://doi.org/10.3390/buildings15081233>

Yunitsyna, A. & Toska, A. (2023). *Evaluation of the Visual Comfort and Daylight Performance of Visual Art Classrooms*. <https://www.researchgate.net/publication/371937973>