

SELEKSI PRIORITAS KONFIGURASI PADA RETROFIT PENCAHAYAAN BUATAN DALAM BANGUNAN

(Priority Selection of Artificial Lighting Configuration for Building Lighting Retrofit)

Leonardo¹; Nathalia Sugiharto²; Tantri Oktavia³; Erwin Ardianto Halim⁴

^{1,2,3} Program Studi Desain Arsitektur – ⁴Program Studi Desain Interior, Fakultas Humaniora dan Industri Kreatif, Universitas Kristen Maranatha, Drg. Surya Sumantri 65, Bandung, Indonesia

leonardo@maranatha.ac.id

Abstract

For practical reason, many higher education facilities in Indonesia continue to use luminaires with outdated technology, most of them have not paid attention to energy savings through lighting configuration. Retrofitting has the capacity to support the best visual performance, not only by replacing outdated luminaires, which will ultimately impact operating costs and the initial investment value. This article is to demonstrate the retrofitting potential through three different lighting scenarios in a lecture hall using Dialux Evo 13. The method involves comparing outputs from three simulations according to UGR formula to see the impact of luminaire layout, distancing, and luminaire types on lighting distribution uniformity, UGR value, and average illumination. Results show that each lighting configuration is unique with its advantages and disadvantages due to distance settings and luminaires specification which simultaneously influence the retrofit potential. As conclusion, a lighting retrofit potential is limited to a specified time span, which opens up opportunities between investment value and lighting performance to determine the best lighting retrofit. Prioritizing artificial lighting performance results in long-term investment. On the other side, if investment value is expected, then a few performances will be compromised.

Keywords: *Lighting configuration, Visual performance, Retrofitting potential, UGR value, Lighting retrofit*

Abstrak

Demi kepraktisan, masih banyak gedung pendidikan tinggi di Indonesia yang belum menerapkan penghematan energi, yang nampak pada penggunaan teknologi lumener lawas. Potensi retrofit tidak sekadar mengganti lumener berteknologi lawas, namun demi kinerja visual yang terbaik pada akhirnya memengaruhi nilai investasi awal dan biaya operasional. Tulisan ini bertujuan untuk menggambarkan potensi retrofit melalui simulasi dengan tiga skenario konfigurasi titik lampu dalam sebuah ruangan kuliah menggunakan Dialux Evo 13. Metode yang digunakan adalah membandingkan luaran ketiga simulasi menurut rumus UGR untuk melihat dampak konfigurasi pada intensitas merata pencahayaan, nilai UGR, dan tingkat pemerataan distribusi pencahayaan. Hasil menunjukkan keunikan tiap konfigurasi pencahayaan dengan kelebihan dan kekurangannya akibat pengaturan jarak dan spesifikasi lumener yang sekaligus memengaruhi potensi retrofit. Sebagai kesimpulan, potensi retrofit pencahayaan dibatasi oleh waktu, yang membuka peluang antara nilai investasi dan kinerja pencahayaan dalam menentukan retrofit pencahayaan terbaik. Jika kinerja pencahayaan buatan diutamakan, maka investasi mengarah ke jangka panjang. Di sisi lain, jika nilai investasi diantisipasi, maka kinerja pencahayaan buatan akan dikompromikan.

Kata kunci: Konfigurasi titik lampu, Kinerja visual, Potensi retrofit, Nilai UGR, Retrofit pencahayaan

Pendahuluan

Keberlanjutan dalam arsitektur telah menjadi isu penting karena sangat berkaitan dengan konsumsi energi. Isu ini tidak hanya memengaruhi bangunan baru, tetapi juga bangunan yang sudah ada dan beroperasi lama. Pada dasarnya, bangunan lama yang masih beroperasi mengindikasikan nilai tambahnya. Namun demikian, sebuah fenomena yang mengiringinya adalah penerangan dengan luminer berteknologi lawas yang masih banyak digunakan. Tipe luminer yang menyedot banyak listrik namun kinerjanya rendah dan berumur pendek. Ini tentu menghamburkan energi listrik dan tidak lagi tepat sasaran dengan kebutuhan masa kini. Ini patut disayangkan karena banyak aktivitas dalam bangunan dilakukan dalam waktu lama sehingga perlu dukungan pencahayaan buatan, dan menjadikannya tren tersendiri dan terkemuka.

Konsumsi energi listrik per kapita Indonesia sudah diantisipasi akan naik 13.9% menjadi 1336 kWh pada 2023 (sumber : kementerian ESDM di laman dataindonesia.id – diakses pada 14 April 2025). Sebelumnya, isu keberlanjutan dan hemat energi bahkan sudah gencar digaungkan, tertuang dalam Permen PUPR no.15 tahun 2015 tentang Bangunan Gedung Hijau dan Permen PUPR no.21 tahun 2021 tentang penilaian kinerja Bangunan Gedung Hijau. Kedua permen itu dengan jelas menunjukkan pentingnya pengelolaan energi, termasuk energi listrik. Disebutkan secara resmi dalam sebuah laporan nasional bahwa penggunaan energi listrik gedung komersial untuk penerangan dan stop kontak saja mampu menguras 25% daya listrik dari seluruh konsumsi energi bangunan (Laporan Akhir B2TKE-BBPT pada 2020 di tujuh kota besar Indonesia).

Gedung institusi pendidikan tinggi di Indonesia dikategorikan sebagai gedung sosial komersial (sumber : web.pln.co.id, diakses pada 14 April 2025). Di antara gedung sejenis lainnya, bangunan ini pun ditengarai belum menerapkan pengelolaan energi listrik untuk pencahayaan buatan dalam konteks hemat energi, masih aktif, dan sudah beroperasi lama (Angelaki, Besenecker, & Danielsson, 2022) (Çelik, 2022). Penggunaan luminer berteknologi lawas murah dan masih banyak dijual dan sulitnya menata ulang sistem penerangan

dalam mengadaptasi teknologi baru turut menunda perubahan walaupun sudah disadari tidak lagi hemat energi (Salim, Tolago, & R.P. Syafi'i, 2022). Berangkat dari fenomena tersebut, pendekatan retrofit pencahayaan buatan pada gedung pendidikan tinggi berpotensi mendukung arsitektur berkelanjutan dan diharapkan dapat menjembatani antara kebutuhan pencahayaan berkinerja tinggi dengan penghematan energi (Dubois, et al., 2015).

Retrofit pencahayaan buatan kini sudah semakin dilirik potensinya seiring isu penghematan energi, selain ditunjang oleh kemajuan teknologi luminer, sehingga tentunya mampu mendukung umur pakai bangunan karena memerlukan pengeluaran relatif lebih kecil ketimbang renovasi elemen lainnya dari bangunan untuk tujuan keberlanjutan. Keberhasilan retrofit terletak pada pengurangan konsumsi energi (Belany, Hrabovsky, & Kolkova, 2021). Skenario yang mampu optimal melibatkan gabungan pencahayaan alami dan pencahayaan buatan berteknologi LED akan menghasilkan pencahayaan bermutu tinggi sekaligus mengurangi konsumsi energi (Al Kailani & Al Dhaheri, 2024).

Peluang penghematan energi listrik yang besar telah banyak ditunjukkan untuk penerangan buatan, di antaranya (Supriyo, Adha, & Setyono, 2022), (Belany, Novak, Siranec, & Roch, 2019), (Ciugudeanu, Buzdugan, Beu, Campianu, & Galatanu, 2019), (Wijaya, 2019), dan (Bonomolo, 2017) melalui analisis biaya masa pakai (*Life Cycle Cost Analysis* - LCCA) untuk investasi. Evaluasi biaya listrik dengan BIM (Shah, Chovatiya, & Shah, 2017). (Minseok, Seung-Bok, Taeyeon, & Sooyoun, 2015) dengan simulasi sirip luar. (Gorgulu & Kocabey, 2020), dan (Gavioli, Tetri, Raj Baniya, & Halonen, 2015) membuat simulasi potensi penghematan listrik untuk penerangan dengan sistem peredupan, sementara (Lowcay, Gunay, & O'Brien, 2020), (Akrasakis & Tsikalakis, 2017) meneropong melalui sensor cahaya dan gerak. Juga ada (Cheng, et al., 2021) menyebutkan adanya peningkatan distribusi pencahayaan buatan yang lebih baik melalui teknik pelapisan nano pada reflektor armatur. Upaya penghematan energi jelas nampak dari ragam riset tadi, namun masih sedikit riset yang mengupas pengaturan konfigurasi

pencahayaan buatan dalam bangunan padahal juga berpeluang besar bagi penghematan energi dalam konteks arsitektur berkelanjutan, bagaimana melihat kinerja pencahayaan secara kuantitatif, tidak hanya dari segi teknologi, kinerja lumener ataupun sisi investasi secara terpisah.

Oleh sebab itu, bagaimana jika justru memberikan perhatian secara khusus pada 'kesalingterkaitan' antar sejumlah unsur yang dapat memengaruhi besarnya potensi retrofit sehingga menjadikannya sebagai pertanyaan penelitian ini dan sekaligus mengangkatnya sebagai sebuah kebaruan penelitian. Banyak riset yang dilakukan mengenai retrofit dan manfaatnya, namun bagaimana konfigurasi pencahayaan buatan dalam konteks retrofit yang diterapkan pada bangunan institusi pendidikan tinggi tergolong masih sedikit, dan karena itu terbuka luas potensinya untuk diteliti sehingga dapat pula diangkat sebagai sebuah kebaruan untuk melengkapi riset di bidang terkait.

Untuk melaksanakan kegiatan belajar agar hasilnya optimal di ruang kuliah, kinerja visual tidak cukup didukung tingkat intensitas pencahayaan sesuai standar. Nyatanya, ada banyak faktor yang ikut memengaruhi, misalnya ketidaknyamanan visual (Boyce & Wilkins, 2018) akibat gangguan silau dari pencahayaan alami ataupun buatan (Pierson, Wienold, & Bodart, 2018). Banyak upaya telah dilakukan untuk mengurangi dampak pencahayaan alami, misalnya pendekatan desain pasif melalui sirip bangunan (Minseok, Seung-Bok, Taeyeon, & Sooyoun, 2015). Solusi lainnya adalah melalui modifikasi bahan kaca untuk mengatur tingkat refleksi dan intensitas cahaya alami yang masuk melalui jendela (Casini, 2014). Ada pula penelitian (Pérez-Carramiñana, 2024) yang khusus menyoroti pentingnya pengkondisian pencahayaan alami bagi kenyamanan penghuni. Seluruh contoh di atas sejalan bahwa pencahayaan berdampak signifikan pada persepsi, suasana, dan respons manusia, dan pada akhirnya menjadi unsur penentu pula bagi keberhasilan retrofit.

Penghematan energi tercermin pada pengurangan konsumsi energi listrik, yang merupakan kunci utama keberhasilan retrofit pencahayaan, namun itu tidak berarti kinerja visual diabaikan akibat gangguan tadi. Oleh

sebab itu, konfigurasi pencahayaan menjadi indikator yang kentara untuk mengamati hubungan antara keduanya. Masih sedikit riset yang mengupas konfigurasi pencahayaan buatan dalam bangunan dan dampak visualnya. Ini sangat perlu direncanakan agar dapat mengundang respon pengguna secara positif dan bukan secara negatif terkait dengan estetika visual dan pemenuhan persyaratan teknis pencahayaan (Gemelli, Shiratuddin, & Kemp, 2012), (Rusli & Indrawan, 2022), (Yusuf, Razak, & Rizani, 2025). Walaupun kebanyakan kasus studi pada gedung publik telah menunjukkan kepuasan pengguna pada standar intensitas pencahayaan yang terpenuhi, namun untuk terus dapat meningkatkan kenyamanan beraktivitas dan produktivitas pengguna, pemahaman mendalam pada jenis gedung menurut aktivitas utama yang dilingkupinya tetap diperlukan karena setiap aktivitas pasti mencerminkan pencahayaan yang spesifik (Qingxuan, et al., 2023).

Tujuan tulisan ini adalah untuk menggambarkan potensi retrofit melalui karakter pencahayaan secara spasial dari tiga skenario konfigurasi pencahayaan pada ruangan perkuliahan. Karakter spasial tersebut juga diperkaya dengan perhitungan untuk memprediksi nilai investasi dan biaya operasionalnya. Sebagai tambahannya, kegunaan hasil temuan penelitian ini dapat dijadikan bahan pertimbangan, rujukan desain praktis terkait, dan juga rujukan riset di bidang desain tata cahaya.

Metode

Pendekatan retrofit dalam studi ini memprioritaskan perbaikan interior dengan dampak fisik minimal. Karena sifatnya untuk memberikan prediksi dan opsi dalam membuat keputusan akhir, mengurangi kemungkinan kesalahan dan dampak di lapangan, simulasi digital dipilih sebagai metode untuk mengkaji karakter distribusi pencahayaan ruang kuliah. Dialux Evo 13 (versi terbaru saat tulisan dibuat) dipilih karena kemampuannya dalam menampilkan hasil simulasi secara visual dan spasial, sebuah cara berkomunikasi yang dikenal fasih dalam bidang arsitektur. Dialux Evo (diciptakan perusahaan Jerman DIAL) adalah *software* untuk melakukan simulasi pencahayaan interior dan eksterior pada

model 3D digital. Perancangan, kalkulasi, dan visualisasi pencahayaan untuk menciptakan solusi pencahayaan didukung data koordinat geografis, dan data teknis lumener dari produsennya di seluruh dunia.

Parameter penentu yang dilibatkan adalah ketinggian plafon ruang kuliah (2.80 m), ketinggian bidang kerja (0.8 m), tipe material pada lantai, dinding, plafon, kusen dan kaca, dan tipe lampu. Selain itu, EN 12464-1:2021 dirujuk untuk target intensitas (500 lux), nilai UGR (maksimum 19), dan tingkat pemerataan distribusi cahaya (minimum 0.6) pada ruang kuliah. Ketiganya sebagai data masukan pada Dialux. Secara umum, tiap hasil simulasi secara *default* akan memberikan luaran dalam bentuk visualisasi 2D usulan tata letak titik lampu beserta jarak antar titiknya berdasarkan data input tadi sebagai prioritasnya.

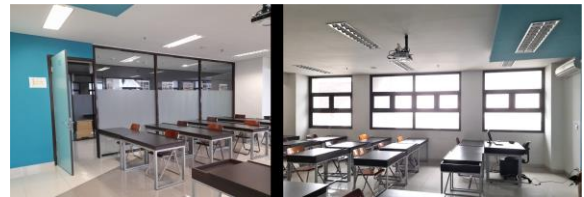
Karena riset ini menitikberatkan pada simulasi untuk prediksi potensi ke depan, validasi pengukuran di lapangan tidak digunakan (Sejati & Dewi, 2024). Selain itu, perubahan intensitas pencahayaan alami yang dinamis akibat lonjakan perubahan cuaca pun tidak disertakan andilnya dalam simulasi sebagai batasannya.

Simulasi dipakai untuk menggambarkan dan membandingkan karakteristik spasial dari tiga skenario konfigurasi pencahayaan berbeda untuk ditelaah hasilnya dengan desain : (1) merelokasi posisi lumener dari posisi semula tanpa mengubah jenis lumener yang digunakan, (2) mengganti lumener awal dengan lumener yang memiliki bentuk permukaan lingkaran dan luas kecil untuk melihat potensi pengurangan nilai UGR. Penggantian dengan lumener yang memiliki bentuk permukaan kotak dan lebar juga dilakukan untuk melihat potensi peningkatan pemerataan distribusi pencahayaan. Simulasi kedua ini juga diperkaya dengan perubahan jarak antar lumener, dan (3) penambahan *wallwash* yang mengelilingi semua sudut atas dinding, berfungsi sebagai pencahayaan latar belakang untuk kedua perlakuan dalam simulasi 2. Fokus dan alasan dari desain untuk ketiga simulasi ini terletak pada hubungan antara variabel dalam rumus UGR dan logika pencahayaan dasar, yaitu : (a) intensitas pencahayaan pada bidang kerja horizontal akan berkurang saat jaraknya dijauhkan dari lumener ; (b) permukaan lumener yang semakin luas akan

memperluas area pencahayaan sekaligus mengurangi jumlah lumener yang diperlukan dan menambah jarak antar lumener ; (c) serta mengurangi kontras pencahayaan antara area yang diterangi dan sekitarnya.

Karakter distribusi pencahayaan akan diperlihatkan melalui sejumlah kurva pada denah ruangan 2D dari hasil simulasi, yang secara visual akan membantu memahami pengaruh konfigurasi pencahayaan (tata letak lumener) secara spasial. Setiap kurva mewakili nilai intensitas pencahayaan (lux).

Objek penelitian yang digunakan adalah sebuah ruang kuliah aktual yang terletak di lantai delapan Gedung FSRD Universitas Kristen Maranatha, Bandung, Indonesia (6053'08"S, 107034'49"E). Ruang ini berukuran 7,8x6,7m² dengan tinggi plafon 2,8m. Terdapat jendela di sepanjang dinding ruangan yang berbatasan dengan eksterior ke arah timur, dan juga pada dinding seberangnya, bersebelahan dengan koridor internal. Studio ini selalu digunakan untuk aktivitas desain interior oleh mahasiswa dari pukul 07.00 hingga 12.00 (Senin - Jumat).(Gambar 1)



Gambar 1. Suasana aktual studio desain (sumber : penulis, 2024)

Semua dinding dan plafon dicat warna putih *matte* (tidak mengilap) dengan minor biru. Lantai dilapisi keramik krem cerah dengan permukaan mengilap, seluruh kusen menggunakan bahan aluminium dengan pelapis bernuansa metal coklat gelap semi-kilap, dan kaca bening diterapkan pada seluruh jendela. Penerangan buatan tersusun atas sembilan armatur (konfigurasi *grid*) yang berisikan dua neon LED Phillips Ecofit 1200 mm (16w 1600 lumen/neon), total 18 lumener dan rekomendasi umur pakai 15000 jam (L70). (gambar 2, 3)



Gambar 2. Jenis lumener (kiri) yang terpasang dalam armatur (kanan) ruang kuliah. (sumber : penulis, 2024)



Gambar 3. Tata letak dan konfigurasi titik lumener ruang kuliah kondisi aktual (sumber : penulis, 2024)

Kajian Teori
Implikasi *Inverse Square Law* pada Kemerataan Pencahayaan

Hukum ini memberikan penekanan bahwa jika jarak sebuah sumber cahaya terhadap area yang diteranginya bertambah jauh, maka intensitas pencahayaan yang terlihat pada area tersebut akan berkurang. Tingkat intensitas pencahayaan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak area tadi dari sumber cahaya. Seiring menjauhnya jarak tadi, area yang diterangi semakin luas pula. (Gambar 4)

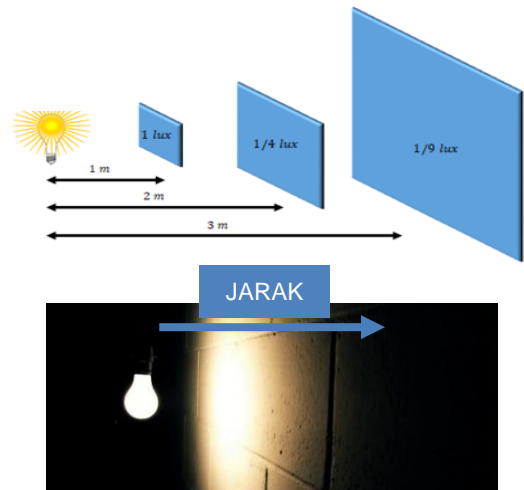
$$E = \frac{I}{r^2}$$

Di mana :

I (intensitas) = tingkat terang suatu permukaan yang diterangi sumber cahaya dengan jarak tertentu (lux)

E (iluminansi) = kekuatan daya pancar sebuah sumber cahaya (candela)

r = jarak antara sebuah sumber cahaya dan bidang permukaan yang diteranginya (Illuminating Engineering Society, nd)



Gambar 4. Ilustrasi inverse square law (Lee, A., (n.d.))

Berdasarkan hukum tersebut, area permukaan yang diterangi oleh sebuah sumber cahaya dengan kuat terang tertentu dan jarak tertentu akan memiliki tingkat intensitas pencahayaan yang sama. Hukum itu pun secara langsung memengaruhi pemerataan distribusi pencahayaan pada suatu area, yang berubah saat jarak permukaan terhadap sumber cahaya tadi berbeda pula. Implikasi dari rumus tersebut adalah munculnya kontras pencahayaan. Kontras didefinisikan sebagai perbedaan intensitas pencahayaan antara objek yang diterangi dan bayangan yang terbentuk di sekitarnya. Bertambahnya jarak antara keduanya akan mengurangi tingkat kontras dan ketajaman bayangan. Berkaitan dengan silau, potensinya membesar saat sumber cahaya menjadi lebih kuat dan/atau jarak dengan objek yang diterangi berkurang.

Implikasi UGR (*Unified Glare Rating*) pada Kenyamanan Visual

Banyak penelitian menunjukkan bahwa silau adalah gangguan pada kenyamanan visual yang selalu berpotensi muncul dalam pencahayaan bangunan (Boyce & Wilkins, 2018). Upaya yang dilakukan untuk menguranginya menunjukkan adanya sejumlah unsur dalam kinerja pencahayaan yang berperan bersamaan dan saling terkait untuk menghasilkan pencahayaan terbaik. Potensi silau dalam rumus UGR menggambarkan hubungan yang saling memengaruhi antara kelima variabel yaitu :

$$UGR = 8 \log_{10} \left(\frac{0.25\pi}{E_b} \right) \sum_{i=1}^n \frac{(L_i^2 \times \omega_i)}{p_i^2}$$

Di mana :

E_b = tingkat terang pada area latar belakang

L_i = tingkat terang pada area yang teramati

ω_i = besar sudut dari sumber silau terhadap posisi pengamat

p_i = jarak antara pengamat dan sumber cahaya

(IESNA, 2000)

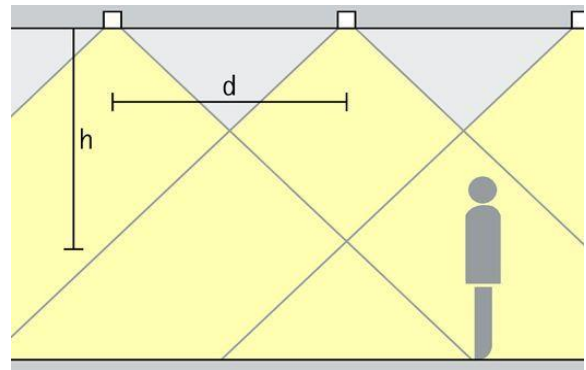
Rumus di atas memperlihatkan bahwa semakin tinggi intensitas pencahayaan dan semakin lebar bidang pandang pengamat, semakin bertambah pula potensi silau yang masuk ke dalam penglihatannya. Seiring dengan itu, nilai UGR pun akan naik jika intensitas pencahayaan di bagian latar belakang berkurang dan/atau jarak pengamat dari lumener menjauh. Jika semua unsur di atas mengarah pada nilai sebaliknya, maka potensi silau akan berkurang karena nilai UGR yang menurun. Untuk mencapai kenyamanan visual ruang kuliah, standar Eropa (European Committee for Standardization, 2021) memberikan batas maksimum nilai UGR (19) dan nilai minimum intensitas pencahayaan rerata (500 lux). Berdasarkan rumus UGR tadi implikasi pada kombinasi variabel yang masih dapat dimodifikasi dalam simulasi pada riset ini akan ditentukan oleh jumlah lumener yang digunakan dan tata letaknya, intensitas pencahayaan di bagian latar belakang, dan besar bidang pandang pengamat yang diakibatkan oleh pengaturan jarak antar lumener.

Implikasi *Spacing to Height Ratio (SHR)* dan *Spacing Criterion (SC)* pada Kemerataan Distribusi Pencahayaan

IES (*Illuminating Engineering Society*) memberikan nilai anjuran untuk mencapai pemerataan distribusi pencahayaan pada bidang kerja secara umum menurut perbandingan maksimum antara jarak pasang antar lumener (d) dan ketinggian lumener terhadap bidang kerja (h) yang didefinisikan sebagai *spacing criterion* (sumber : ies.org, diakses pada Oktober 2025). Sayangnya, tidak seluruh produsen lumener menyediakan pemutakhiran rujukan nilai sc pada produknya karena banyaknya ragam produk, selain itu rujukan IES hanya

berlaku di negara yang bersangkutan. Secara umum nilai sc yang dianjurkan tidak lebih dari 1.5 (IES Lighting Handbook vol. 9)

Logika *SHR* menggunakan rasio jarak antara dua pusat armatur yang bersebelahan (d) dengan ketinggian pasang armatur terhadap bidang kerja (h) sebagai panduan umum untuk perkiraan pemerataan distribusi pencahayaan dalam bangunan (Gambar 5). Dalam studi ini, ketinggian h akan selalu sama yaitu sebesar 2m (2.8m – 0.8m). Maka, jarak maksimum antara dua lumener bersebelahan adalah 3m (2m x 1.5).



Gambar 5. Ilustrasi pemerataan distribusi pencahayaan menurut *SHR* (ERCO, nd)

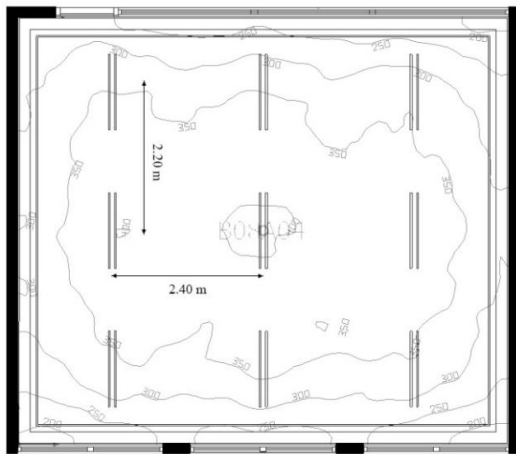
Peraturan resmi di Indonesia mengenai pencahayaan dalam bangunan maupun energi seperti SNI 03 6575 tahun 2001 (tata cara perancangan sistem pencahayaan buatan pada bangunan gedung), SNI 6197 tahun 2020 (konservasi energi pada sistem pencahayaan bangunan), Permen PUPR No.21 tahun 2021 (*Green Building* untuk Bangunan Gedung), dan Permen PUPR No.10 tahun 2023 tentang bangunan gedung cerdas, belum ada yang mencantumkan secara jelas nilai rujukan pengaturan jarak armatur, baru pada tataran konseptual untuk kinerja atau kenyamanan visual menurut fungsi ruangan. Maka itu, konfigurasi titik lampu dijadikan celah potensial yang akan ditelaah dalam studi ini dalam konteks retrofit.

Hasil Penelitian dan Pembahasan

Setiap simulasi dengan menggunakan Dialux Evo 13 menunjukkan karakter unik distribusi pencahayaan secara spasial. Setiap perlakuan memberikan dampak distribusi pencahayaan berbeda yang tergambarkan melalui sejumlah garis kurva pada denah plafon ruangan. Nilai UGR tiap simulasi dihitung pada ketinggian yang sama, yaitu ketinggian mata saat duduk (1,2 m di atas lantai), sedangkan intensitas pencahayaan rerata dihitung pada ketinggian yang sama untuk bidang kerja (0,8 m di atas lantai).

Tabel 1. Karakter spasial distribusi pencahayaan untuk konfigurasi titik lumener aktual

Simulasi (perlakuan)	Hasil kalkulasi			
	UGR	ai (lux)	Idu	Lpd (w/m ²)
	20.5	318	0.58	4.53



(sumber : penulis, 2024)

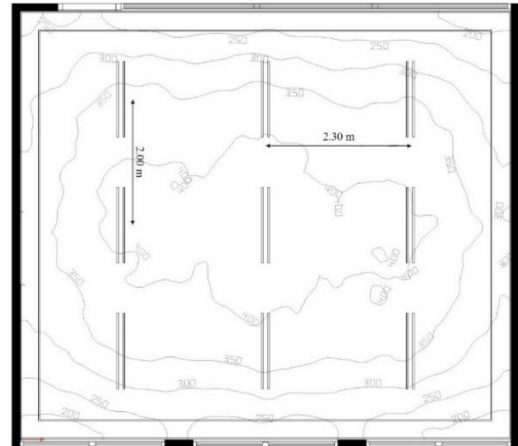
Catatan :

- ai = *average illumination* (intensitas pencahayaan rerata)
- Idu = *lighting distribution uniformity* (kemerataan distribusi pencahayaan)
- lpd = *lighting power density* (kepadatan pencahayaan)

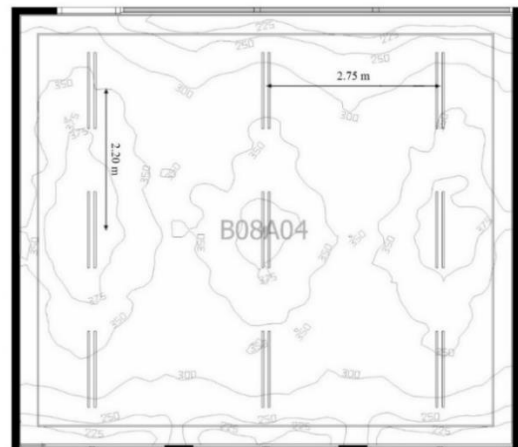
Kondisi pencahayaan aktual ruangan kuliah melalui hasil simulasi 1 menunjukkan nilai UGR melebihi batas silau (20.5), intensitas pencahayaan rerata di bawah standar (318 lux), dan tingkat pemerataan distribusi pencahayaan kurang dari standar (0.58) dengan ciri garis kurva distribusi pencahayaan secara spasial yang memusat di tengah ruangan.

Tabel 2. Karakter spasial distribusi pencahayaan dari dua perlakuan dengan mengubah jarak armatur (jenis lumener yang sama)

Simulasi (perlakuan)	Hasil kalkulasi			
	UGR	ai (lux)	Idu	Lpd (w/m ²)
2a	20.5	336	0.47	4.53
2b	20.1	322	0.62	4.53



2a : memperpendek jarak armatur pada konfigurasi aktual



2b : Memperpanjang jarak armatur pada konfigurasi aktual



(sumber : penulis, 2024)

Tabel 2 menunjukkan karakter unik kedua simulasi akibat perlakuan berbeda yang paling sederhana yaitu dengan hanya mengubah jarak antar lumener. Simulasi 2a memperpendek jarak antar lumener (dari aktual 2,40m menjadi 2,30m antar kolom, dan aktual 2,40m menjadi 2,00m antar baris) memberikan nilai UGR yang masih sama seperti dalam simulasi 1. Konfigurasi ini menghasilkan distribusi pencahayaan yang terkonsentrasi di tengah ruangan dan menurunkan kemerataannya menjadi 0,47. Sebaliknya, simulasi 2b memperpanjang

jarak antar lumener (dari aktual 2,40m menjadi 2,75m antar kolom, namun jarak antar baris aktual 2,40m tetap dipertahankan agar tidak terlalu rapat ke dinding terdekat) mampu menurunkan nilai UGR mendekati batas (20.1), dan melampaui standar pemerataan distribusi pencahayaan (0.62). Sayangnya, kedua simulasi ini (2a dan 2b) belum dapat memenuhi syarat intensitas pencahayaan merata minimum, hanya menunjukkan perubahan kecil dari kondisi semula (aktual). Hal ini diakibatkan oleh penggunaan tipe, jumlah lumener, dan konfigurasi yang sama seperti dalam simulasi 1 (18 lumener dalam 9 armatur). Situasi ini juga disebabkan oleh terbatasnya area plafon ruangan untuk mengubah jarak antar lumener secara leluasa di dalamnya. Kepadatan pencahayaan pada simulasi 2a dan 2b pun tercatat tetap sama seperti pada simulasi 1 (4,53w/m²) karena tipe dan jumlah lumener yang tidak diubah.

Simulasi 3a dan 3c mempertimbangkan implikasi *inverse square law* dan rumus UGR melalui pengubahan luas permukaan lumener. Dua lumener pengganti yang akan dievaluasi berasal dari jenis LED yang umum di pasaran, yang memiliki karakter penampang : (1) luas permukaan kecil untuk mengantisipasi potensi silau, dan (2) luas permukaan lebar untuk mengantisipasi jumlah lumener yang lebih sedikit. (tabel 3)

Tabel 3. Spesifikasi lumener pengganti pada simulasi 3

Lumener	Inisial	Spesifikasi	Ilustrasi
1 Philips DN145 B PSU D218	Tipe-a	diameter : 215 mm 22.5w/2100 lumens	
Umur pakai rekomendasi : 50000 jam (L70)			
2 Philips RC461 B W60L 60	Tipe-b	kotak : 600x600 mm 44.5w/6001 lumens	
Umur pakai rekomendasi : 100000 jam (L80)			

Sumber: (Philips, n.d)

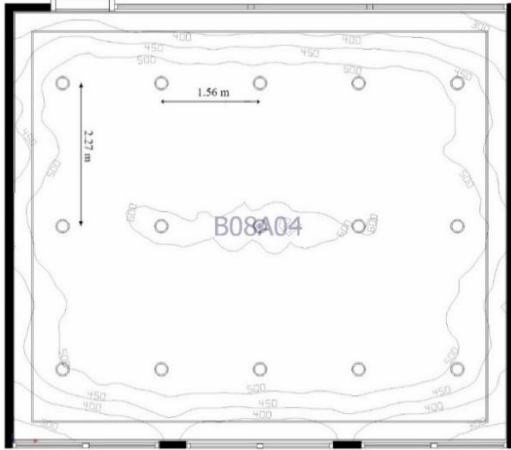
Untuk mencapai standar intensitas pencahayaan merata 500 lux, simulasi 3a menghasilkan konfigurasi 15 armatur secara *default* yang terdiri dari lima kolom dan tiga baris. Konfigurasi ini ternyata memperburuk nilai UGR daripada kondisi semula (21,8) dan juga tingkat pemerataan distribusi pencahayaan di bawah standar (0,51). Simulasi 3b menjauhkan jarak antar armatur dari konfigurasi *default* pada simulasi 3a (dari 2,27 m menjadi 2,58 m antar kolom, namun dengan jarak antar baris 1,56 m tetap dipertahankan agar tidak terlalu rapat ke dinding terdekat) justru makin merusak nilai UGR naik menjadi 24 dan intensitas pencahayaan merata menurun (484 lux). Walaupun demikian, konfigurasi ini mampu menaikkan tingkat pemerataan distribusi pencahayaan melampaui standar (0,62). Simulasi dengan memperpendek jarak antar lumener tipe-a tidak dilakukan karena akan memperburuk distribusi pencahayaan akibat pengkonsentrasian pencahayaan setelah melihat hasil simulasi 3a. (tabel 4)

Jika simulasi 3a menggunakan lumener pengganti dengan luas permukaan kecil, maka simulasi 3c menggunakan lumener pengganti dengan luas permukaan lebar. Simulasi ini menghasilkan konfigurasi lima armatur secara *default* (dua kolom, dua baris, dan satu di tengah), dan mampu mencapai nilai UGR di bawah ambang batas (18), intensitas pencahayaan merata 535 lux, tetapi tingkat pemerataan distribusi pencahayaan malah turun di bawah standar (0,33). Simulasi 3d memperpanjang jarak antar lumener dari konfigurasi *default* pada simulasi 3c (dari 3,90 m menjadi 4,20 m antar baris, dan 3,40 m menjadi 3,60 m antar kolom) mengoreksi nilai UGR turun menjadi 19,1 dan tingkat pemerataan distribusi pencahayaan hanya naik sedikit ke 0,37. Sementara itu, intensitas pencahayaan merata mampu dipertahankan di atas standar (528 lux) meskipun turun sedikit. (tabel 5)

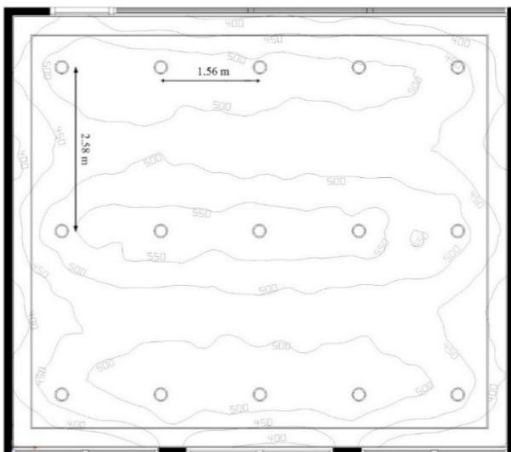
Pencitraan spasial pada simulasi 3a ke 3b menggambarkan pola perubahan serupa pada garis kurva distribusi pencahayaan seperti pada 2a ke 2b, yaitu bertambahnya jumlah garis kurva yang muncul dan terdesentralisasinya pusat kurva. Khusus simulasi 3c ke 3d, perubahan pencitraan spasialnya tidak kentara karena jumlah armatur yang lebih sedikit namun dengan lumen lebih besar. (tipe-a ke tipe-b)

Tabel 4. Karakter spasial distribusi pencahayaan pada dua perlakuan (tipe-a)

Simulasi (perlakuan)	Hasil kalkulasi			
	UGR	ai (lux)	Idu	Lpd (w/m ²)
3a	21.8	504	0.51	6.36
3b	24	484	0.62	6.36



3a : luminer tipe-a dengan konfigurasi jarak default



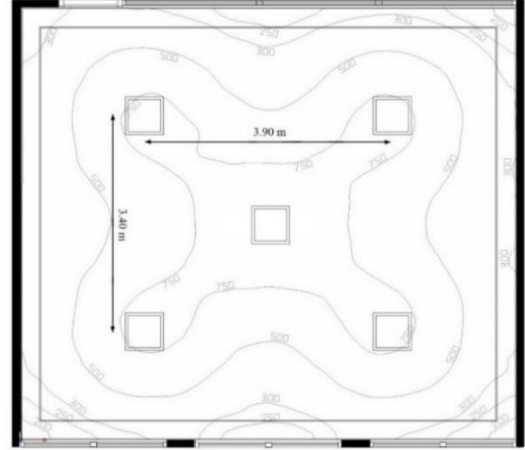
3b : luminer tipe-a dengan memperbesar jarak antar armatur

(sumber : penulis, 2024)

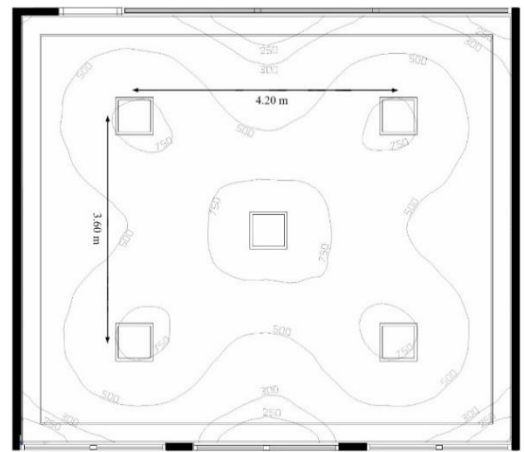
Relokasi armatur (simulasi 3b dan 3d) dengan menjauhkan jarak antar armatur pun dilakukan untuk mempertimbangkan adanya kemungkinan peningkatan pada nilai UGR dan pemerataan distribusi pencahayaan secara khusus karena hasil simulasi secara default (simulasi 3a dan 3c) memiliki kekurangannya tersendiri yang prioritasnya adalah untuk mencapai standar intensitas pencahayaan merata yang diinginkan. Setelah perubahan jarak antar armatur dalam konfigurasinya dilakukan (simulasi 3b dan 3d), perubahan pada hasil simulasi baru makin berdampak.

Tabel 5. Karakter spasial distribusi pencahayaan pada dua perlakuan (tipe-b)

Simulasi (perlakuan)	Hasil kalkulasi			
	UGR	ai (lux)	Idu	Lpd (w/m ²)
3c	18	535	0.33	4.19
3d	19.1	528	0.37	4.19



3c : luminer tipe-b dengan konfigurasi jarak default




3d : luminer tipe-b dengan memperbesar jarak antar armatur

(sumber : penulis, 2024)

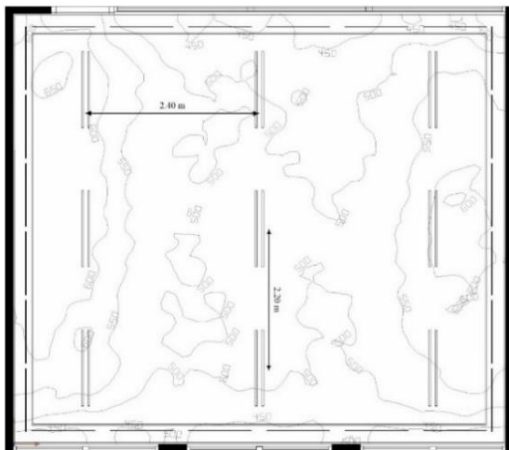
Skenario simulasi dengan mengecilkan luas permukaan luminer (dari aktual ke 3a) justru menunjukkan nilai kepadatan pencahayaan yang lebih boros walaupun jumlah luminernya berkurang dan dengan daya lumen yang lebih besar. Sebaliknya, skenario simulasi dengan memperluas permukaan luminer dan mengurangi jumlah armatur (dari 3a ke 3c) berdampak positif pada turunnya nilai kepadatan pencahayaan sebagai nilai tambahnya tetapi dengan konsekuensi daya lumen yang lebih besar. Perbedaan lain yang kentara antara simulasi 3a dan 3c ditunjukkan melalui jumlah dan amplitudo lengkungan garis kurva.

Tabel 6. Spesifikasi lumener yang ditambahkan pada pencahayaan untuk latar belakang (simulasi 4a hingga 4d)

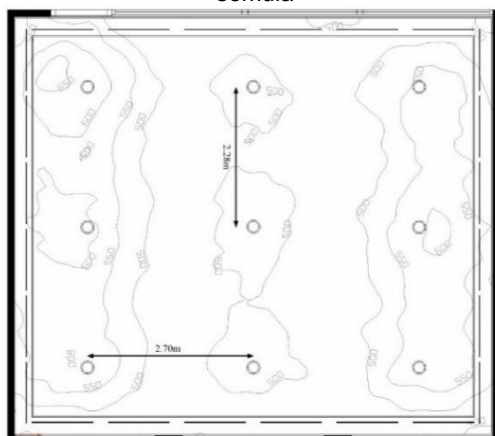
Lumener tambahan	Inisial	Spesifikasi	Ilustrasi
RZB less is more flex pro LED stripe	Tipe-c	14w, 2000 lumens/m	
Umur pakai rekomendasi : 60000 jam (L80)			
(DIAL GmbH, nd)			

Tabel 7. Penambahan lumener tipe-c untuk pencahayaan pada latar belakang

Simulasi (perlakuan)	Hasil kalkulasi			
	UGR	ai (lux)	Idu	Lpd (w/m ²)
4a	17.8	532	0.78	11.76
4b	19	515	0.75	10.15



4a : Tipe-c ditambahkan pada konfigurasi semula



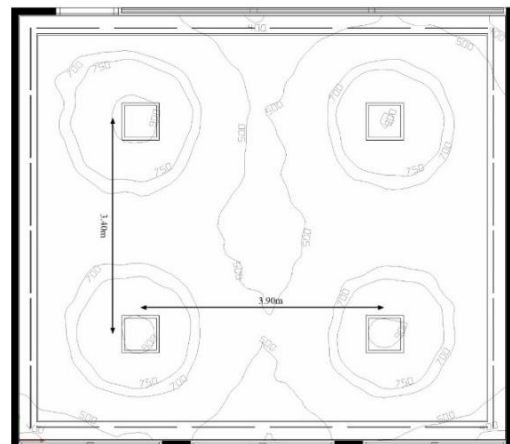
4b : Tipe-c ditambahkan pada konfigurasi dengan lumener tipe-a yang dijauhkan jarak antar luminernya (simulasi 3b)

(sumber : penulis, 2024)

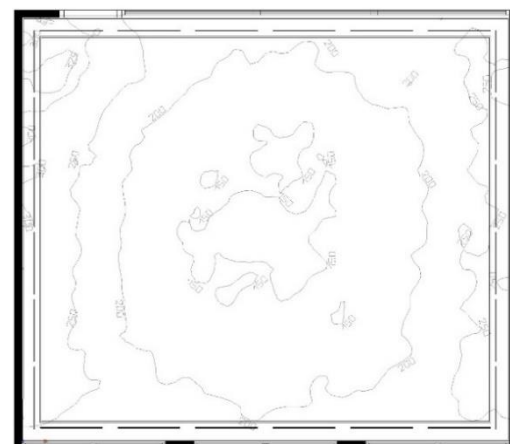
Sebelum menambahkan pencahayaan latar belakang pada tiap konfigurasi, penting untuk mempertimbangkan dampaknya pada nilai intensitas pencahayaan merata dari simulasi secara *default*. Hanya konfigurasi awal yang menghasilkan intensitas merata di bawah 500 lux (simulasi 1), namun hasil simulasi 3a dan 3c (tabel 4 dan 5) telah melampaui 500 lux secara *default* tanpa menjauhkan jarak antar lumener. Oleh sebab itu, jumlah lumener khusus pada simulasi 4b dan 4c harus dikurangi dahulu dari jumlah *default* sebelum ditambahi lumener tipe-c agar intensitas pencahayaan merata yang dihasilkan tidak melampaui standar.

Tabel 8. Lanjutan tabel 7 (penambahan lumener tipe-c untuk pencahayaan pada latar belakang)

Simulasi (perlakuan)	Hasil kalkulasi			
	UGR	ai (lux)	Idu	Lpd (w/m ²)
4c	17.5	632	0.61	9.69
4d	<10	211	0.65	6.33



4c : Tipe-c ditambahkan pada konfigurasi tipe-b



4d : hanya menggunakan Tipe-c sebagai pencahayaan latar belakang

(sumber : penulis, 2024)

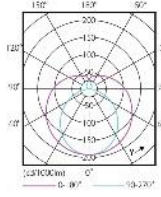
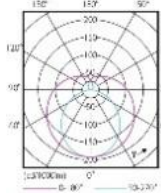
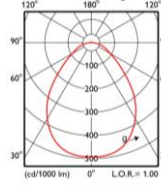
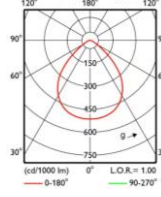
Jadi simulasi 4b mengurangi jumlah luminer tipe-a dari 15 (*default*) menjadi 9, dan simulasi 4c mengurangi jumlah luminer tipe-b dari lima (*default*) menjadi empat saat masing-masing ditambahi luminer tipe-c. Di antara jenis luminer umum lainnya yang tersedia di pasaran, luminer tipe-c dipilih untuk mencapai standar nilai UGR dan pemerataan distribusi pencahayaan karena karakter fisiknya berupa rangkaian mata LED yang dapat memancarkan cahaya tanpa terputus dan merata saat diterapkan di sepanjang semua sudut dinding atas (disebut *wallwashing*) sebagai pencahayaan latar belakang. Tujuan penambahan luminer tipe-c sebagai pendukung pencahayaan utama (simulasi 4a, 4b, dan 4c) adalah untuk mengurangi kontras akibat pencahayaan utama menurut rumus UGR agar hasil ketiga simulasi tersebut mampu memenuhi standar nilai UGR secara signifikan, dan juga tetap mampu mencapai standar pemerataan distribusi pencahayaan yang diperlukan.

Setiap konfigurasi pada simulasi 2a, 2b, 3a, 3b, 3c, 3d, 4a, 4b, dan 4c menampilkan keunikan karakternya dengan kelebihan sekaligus kekurangannya saat dibandingkan dengan konfigurasi pencahayaan semula (simulasi 1 : aktual). Hasil tiap simulasi perlu diperhatikan, khususnya pada pemerataan distribusi pencahayaan dan nilai UGR.

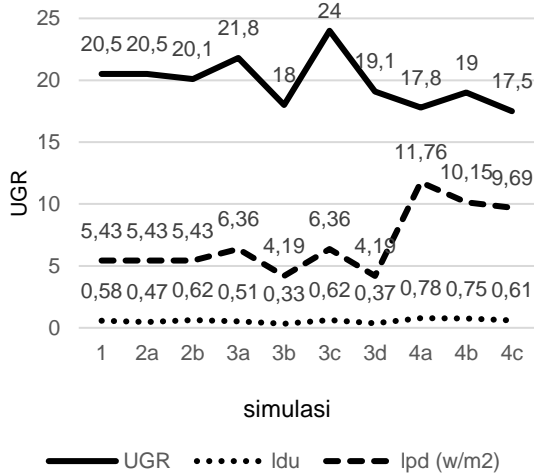
Wallwash memperbaiki nilai UGR, pemerataan distribusi pencahayaan dan tetap mampu mempertahankan intensitas pencahayaan rerata. Sayangnya, *wallwash* menaikkan drastis kepadatan pencahayaan (4a = 11,76 w/m², 4b = 10,15 w/m², dan 4c = 9,69 w/m²) sehingga menonjolkan total daya. Seluruh simulasi menunjukkan bahwa tidak dapat hanya mengandalkan tata letak armatur utama untuk mampu mencapai semua standar dan batasan sekaligus (nilai UGR, pemerataan distribusi pencahayaan, selain pencahayaan rerata) meskipun pengubahan jarak antar luminer dan penggantian tipe luminer telah dilakukan.

Luminer berdaya kecil (tipe-a) berimplikasi pada jumlah luminer yang lebih banyak dalam suatu konfigurasi daripada luminer berdaya besar (tipe-b) untuk mencapai standar 500 lux. Semakin besar daya, semakin sedikit jumlah luminer yang dibutuhkan, sehingga dapat semakin luwes pula jarak antar luminernya. (Bandingkan tabel 7 dengan tabel 2, 4, dan 5).

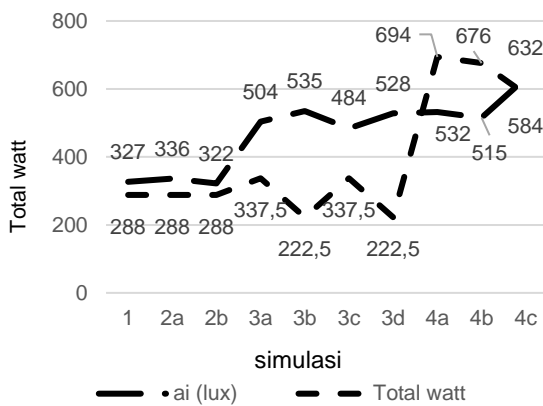
Tabel 9. Perbandingan untuk seluruh perlakuan pada tiap simulasi yang diubah tipe luminernya

watt/ Luminer	Total daya (watt)	Lumen /luminer	Lebar sudut pancaran cahaya
Simulasi 1			
16	288	1600	
Simulasi 2			
16	288	1600	
Simulasi 3a			
22.5	337.5	2100	
Simulasi 3c			
44.5	222.5	6001	
Simulasi 4a (aktual + tipe-c)			
(16+14)	288+406	1600 dan 2000	
Simulasi 4b (tipe-a + tipe-c)			
(22.5+14)	270+406	2100 dan 2000	
Simulasi 4c (tipe-b + tipe-c)			
(44.5+14)	178+406	6001 dan 2000	

(sumber : penulis, 2024)



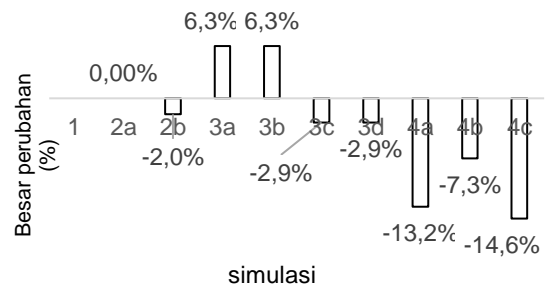
Gambar 6. Perbandingan nilai UGR, pemerataan distribusi, dan kepadatan pencahayaan pada tiap simulasi (sumber : penulis, 2024)



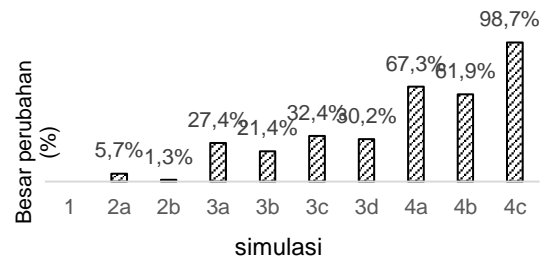
Gambar 7. Perbandingan total daya pada tiap simulasi (sumber : penulis, 2024)

Lumener berkinerja tinggi (tipe-b : lumen besar) mampu mencapai standar intensitas pencahayaan rerata dengan mudah dan dengan jumlah lumener yang lebih sedikit daripada jumlah lumener aktual atau tipe-a. Walaupun tipe-b berkontribusi memberikan kepadatan pencahayaan yang lebih rendah namun memiliki kapasitas yang lebih rendah pada pemerataan distribusi pencahayaan karena spesifikasi bawaannya (daya dan lumen). Spesifikasi itu berdampak negatif dengan memunculkan situasi kontras antara area tengah ruangan (intensitas kuat) dan area dekat dinding (intensitas lemah) seperti yang ditunjukkan oleh karakter spasial dari setiap konfigurasi pencahayaan default (simulasi 3a, 3c, selain 1). Akhirnya, kontras itu sendiri memengaruhi nilai pemerataan distribusi pencahayaan sehingga menjadi lebih rendah. (Gambar 6)

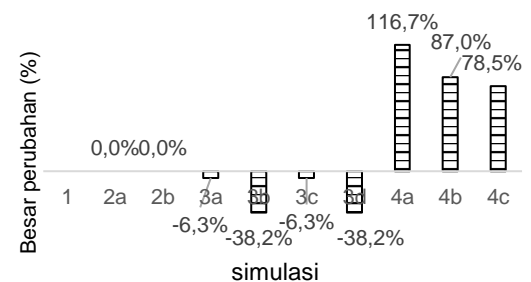
Disebutkan sebelumnya bahwa saat pencahayaan latar belakang ditambahkan melalui wallwash pada simulasi 4a, 4b, 4c, standar pemerataan distribusi pencahayaan dapat tercapai. Hal ini sejalan dengan rumus UGR yang melibatkan pencahayaan latar belakang sebagai salah satu variabel penentu. Nilai UGR terkoreksi karena naiknya intensitas pencahayaan pada latar belakang yang nampak dari nilainya pada visualisasi kurva. Pencahayaan utama saja tidak akan mampu mengurangi nilai UGR akibat kontras yang kentara yaitu perbedaan tingkat intensitas antara area kerja dan area latar belakang (dekat dinding). Ketika pencahayaan latar belakang dapat ditingkatkan, kontras dan nilai UGR juga menurun bersamaan. (Gambar 7,8,9).



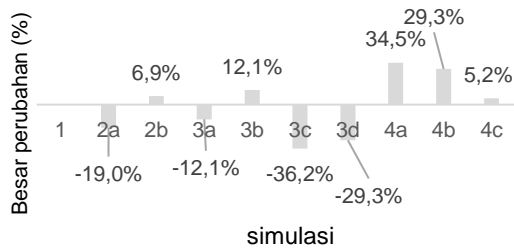
Gambar 8. Dinamika nilai UGR terhadap nilai UGR awal (aktual) (sumber : penulis, 2024)



Gambar 9. Dinamika nilai rerata intensitas terhadap nilai rerata intensitas awal (aktual) (sumber : penulis, 2024)



Gambar 10. Perbedaan total daya terhadap total daya awal (aktual) (sumber : penulis, 2024)

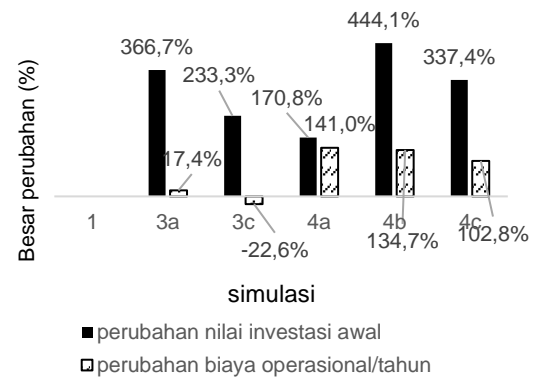


Gambar 11. Perbedaan pemerataan distribusi pencahayaan (sumber : penulis, 2024)

Gambar 10, 11 menjelaskan bagaimana penggantian lumener yang ada dalam simulasi 3a, 3c, memberikan dampak positif pada pengurangan total daya di samping tetap meningkatkan intensitas pencahayaan merata, tetapi tidak mampu memperbaiki sekaligus nilai UGR dan pemerataan distribusi pencahayaan. Dalam studi ini, menambahkan pencahayaan latar belakang jelas mampu memperbaiki nilai UGR dan pemerataan distribusi pencahayaan, dan juga intensitas pencahayaan merata, tetapi dengan konsekuensi tingginya total daya.

Tabel 10 menunjukkan konsekuensi pada nilai investasi awal dan biaya operasi tahunan dari ketiga skenario konfigurasi pencahayaan yang disimulasikan tadi. Daya lumen dan jumlah lumener dalam tiap konfigurasi berimplikasi pada nilai investasi awal, dan akhirnya pada biaya operasional tahunan, terlebih ketika masa pakai ikut dilibatkan. Hanya skenario penggantian dan penambahan lumener pada latar belakang yang memengaruhi nilai investasi awal dan biaya operasional tahunan. Oleh sebab itu, pengubahan jarak antar lumener tidak berdampak pada estimasi ini. Simulasi 3a memerlukan nilai investasi awal lebih besar 366,7% dari nilai investasi awal untuk konfigurasi semula, dan biaya operasional 17,4% lebih tinggi. Simulasi 3c memerlukan nilai investasi awal 333,3% lebih besar namun dapat menghemat 22,6% biaya operasional tahunan. Sedangkan skenario *wallwash* tentu menaikkan nilai investasi awal sebesar 170,8% (4a), 444,1% (4b), dan 337,4% (4c) lebih tinggi dari kondisi aktual. Pada biaya operasional tahunan, simulasi 4a lebih besar 141%, 4b 134,7%, dan 4c 102,8% dari kondisi aktual. (Gambar 12).

Simulasi 4c dengan jumlah lumener paling sedikit dan menggunakan lumen besar tetap memberikan biaya operasional lebih rendah dari simulasi 4b. Konfigurasi ini mampu memberikan kenyamanan visual lainnya sesuai standar secara bersamaan (nilai UGR, intensitas merata, total daya, dan pemerataan distribusi pencahayaan). Namun demikian, karena lumener tipe-b berkinerja tinggi dan harganya mahal, perlu pertimbangan tersendiri pada penyediaan biaya cadangan jika terjadi kerusakan atau saat umur pakainya habis dan perlu diganti.



Gambar 12. Perubahan pada nilai investasi awal dan biaya operasional tahunan untuk setiap simulasi terhadap kondisi awal (aktual) (sumber : penulis, 2024)

Tabel 10. Perbandingan nilai investasi awal dan biaya operasional tahunan untuk setiap simulasi

simulasi	Jumlah total lumener	Total daya (kw)	harga/ Lumener (ribuan Rupiah)	Total investasi (ribuan Rupiah)	Biaya operasional/tahun (ribuan Rupiah)
1	18	0.288	50	900	357.74
3a	15	0.338	280	4200	419.85
3c	5	0.223	600	3000	277
4a	18 + 6 modul	0.694	50 + 265/5m	2437	862.05
4b	12 + 6 modul	0.676	280 + 265/5m	4897	839.69
4c	4 + 6 modul	0.584	600 + 265/5m	3937	725.42

(sumber : penulis, 2024)

Catatan :

- Harga luminer menurut harga pasar lokal saat artikel ini dibuat.
- Tarif listrik untuk gedung swasta pendidikan adalah Rp955,50/kwh mulai pukul 22.00 hingga pukul 18.00.
- Ruang kuliah dipakai mulai pukul 07.00 hingga 12.00 (Senin hingga Jumat)
- Total daya = jumlah luminer x harga/lumener (ribuan rupiah)
- Biaya operasional/tahun = total daya x tarif listrik x 5 jam/hari x 5 hari x 52 minggu (ribuan rupiah)
- Simulasi 4 membutuhkan enam modul LED *stripe* untuk mengelilingi semua dinding (harga: Rp. 265.000/5m/modul)

Penutup Kesimpulan

Ketiga simulasi (selain simulasi kondisi aktual) telah menunjukkan karakter unik tiap desain skenario konfigurasi pencahayaan (penggantian tipe luminer, modifikasi jarak luminer, dan penambahan *wallwash*) beserta kelebihan dan kekurangannya akibat pengaruh sejumlah variabel yang saling terkait dalam rumus UGR. Sebagai tambahan studi ini pun memberikan besar nilai investasi awal, dan perkiraan biaya operasional tahunan untuk tiap skenario.

Konfigurasi pencahayaan adalah keputusan yang dibuat desainer (arsitek) dengan mengatur tingkat kepentingan untuk setiap variabel tersebut mulai dari yang tertinggi (Leonardo, 2020), sehingga setiap desain interior memerlukan sistem pencahayaan unik.

Hasil penelitian ini telah menunjukkan wawasan kinerja pencahayaan secara arsitektural untuk mendukung aktivitas akademik melalui dua opsi skenario prioritas retrofit ruangan kuliah yang bersangkutan sebagai berikut :

- a. Untuk kinerja, simulasi 4c dengan pola konfigurasi grid empat luminer tipe-b yang diperkuat *wallwashing* (tipe-c) pada sekeliling dinding di latar belakang adalah opsi terbaik karena mampu mendukung kinerja visual terbaik yang memudahkan penglihatan melalui pemerataan distribusi pencahayaan, intensitas pencahayaan yang tepat, dan sekaligus sangat memperkecil potensi silau. (secara berturut-turut $l_{du} = 0,61$;

intensitas pencahayaan rerata terbaik = 632 lux ; dan nilai UGR = 17,5). Sebagai konsekuensinya, diperlukan investasi awal sebesar Rp.3,937 juta dan pengeluaran biaya operasional tahunan sebesar Rp.725.420.

- b. Untuk kepraktisan dengan nilai terkecil, simulasi 2b memberikan manfaat melalui modifikasi paling sedikit pada konfigurasi semula (18 luminer dalam sembilan armatur) dengan hanya menjauhkan jarak antar luminer dan tanpa mengganti tipe luminer semula. Simulasi ini hanya berhasil memberikan pemerataan distribusi pencahayaan (0,62) tapi dengan mengkompromikan intensitas pencahayaan rerata (322 lux) dan nilai UGR masih di (20,1). Kompromi ini memang tidak mengubah besar nilai investasi awal (Rp.900.000) ataupun pengeluaran biaya operasional tahunan (Rp.357.740).

Kedua skenario tersebut bukannya tanpa konsekuensi dan kelemahan. Jika kinerja adalah hal yang paling diprioritaskan, maka besarnya investasi awal dan biaya operasional tahunan juga akan sangat perlu dipertimbangkan. Di sisi lain, jika nilai ekonomi investasi adalah prioritasnya, maka sejumlah kinerja pencahayaan akan perlu dikompromikan.

Dari sisi investasi, luminer berkinerja tinggi, dengan spesifikasi umur pakai panjang dan daya lumen besar yang membuatnya digunakan dalam jumlah relatif lebih sedikit dalam suatu konfigurasi, bisa menjadi opsi investasi jangka panjang yang akan jarang memerlukan penggantian luminer atau pemeliharaan rutin.

Dari logika di atas, semakin panjang umur investasi, semakin banyak pula opsi penggunaan luminer berkinerja tinggi. Sebaliknya, umur investasi yang pendek mengarah pada opsi penggunaan luminer yang bernilai ekonomis namun dengan konsekuensi mempertimbangkan unsur pemeliharaan rutin dan penggantian luminer pada biaya operasionalnya.

Penelitian ini telah menyajikan wawasan pilihan retrofit untuk menolong membuat keputusan desain, kendatipun

bersifat multi kriteria (Fernandes, Santos, & Castro, 2021), melalui pemilihan tingkat prioritas dalam kinerja pencahayaan ruangan kuliah yang diperkaya dengan nilai investasi awal, dan biaya operasional. Desainer akan selalu melakukan kompromi pada ketiga aspek tersebut untuk mendapatkan potensi retrofit pencahayaan terbaik. Peran desain menjadi penting guna meningkatkan mutu spasial melalui konfigurasi (1) jumlah, (2) jenis, (3) pengaturan jarak, dan (4) posisi luminer.

Keterbatasan penelitian ini sendiri terletak pada jenis ruangan kuliah yang dipilih sebagai objek studi sehingga memiliki data fisik unik (volume, permukaan interior) dan berimplikasi pada simulasi yang dilakukan. Hanya sebagian kecil tipe luminer yang dimanfaatkan dalam penelitian ini, sedangkan dalam kenyataannya, ada terlalu banyak tipe luminer dengan berbagai spesifikasi teknis dari banyak merek sudah tersedia di pasaran.

Setelah melihat keterbatasan tersebut, penelitian ini membuka peluang eksplorasi di masa mendatang, seperti misalnya (1) memperluas ukuran objek studi yang sama dan mencari pola, (2) memperluas objek kasus ke tipe ruangan interior yang berbeda, dan (3) memperluas lebih banyak variabel yang dilibatkan dalam konteks retrofit.

Ucapan Terima Kasih

Penulis ingin mengucapkan banyak terima kasih kepada seluruh tim peneliti dan kepada semua pihak di Universitas Kristen Maranatha yang telah berkenan mendukung penyediaan data untuk penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Akrasakis, S., & Tsikalakis, A. G. (2017). *Corridor Lighting Retrofit Based on Occupancy and Daylight Sensors : Implementation and Energy Savings Compared to LED Lighting*. *Advances in Building Energy Research*, 274-288. doi:https://doi.org/10.1080/17512549.2017.1325399
- Al Kailani, M., & Al Dhaheri, A. (2024). *Hybrid lighting approach to improve interior workspace environments : a case study in the UAE*. *Frontiers in Engineering and Built Environment*, 169-183. doi:https://doi.org/10.1108/FEBE-11-2023-0052
- Angelaki, S., Besenecker, U., & Danielsson, C. (2022). *A review of lighting research in educational spaces*. *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science*. doi:doi:10.1088/1755-1315/1099/1/012032
- Belany, P., Hrabovsky, P., & Kolkova, Z. (2021). *Combination of lighting retrofit and life cycle cost analysis for energy efficiency improvement in buildings*. *Energy Reports*, 2470-2483. doi:https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.04.044
- Belany, P., Novak, M., Siranec, M., & Roch, M. (2019). *Retrofit of the Lighting System in Common Spaces of Buildings*. *IEEE Xplore*. doi:https://doi.org/10.1109/IYCE45807.2019.8991580
- Bonomolo, M. (2017). *Cost Optimal Analysis of Lighting Retrofit Scenarios in Educational Buildings in Italy*. *Energy Procedia*, 171-178.
- Boyce, P., & Wilkins, A. (2018). *Visual Discomfort Indoors*. Sage, 98-114. doi:https://doi.org/10.1177/1477153517736467
- Casini, M. (2014). *Smart windows for energy efficiency of buildings*. *Elettronico*, 273-281. doi:doi: 10.15224/ 978-1-63248-030-9-56
- Çelik, K. (2022). *Retrofit suggestions from resilient design perspective in educational buildings lighting systems*. *Journal of Design for Resilience in Architecture & Planning*, 127-139. doi:https://doi.org/10.47818/DRArch.2022.v3i1048
- Cheng, J., C Y Wong, N., W L Ho, T., Fai Kwong, H., T H Ng, R., & Cheung, H. (2021). *A Case Study of Lighting Retrofit to Improve Building Energy Efficiency and Lighting Quality by Using Luminaires with Nano Optical Coating*. *HKIE*. doi:https://doi.org/10.33430/V27N4THI E-2020-0008
- Ciugudeanu, C., Buzdugan, M., Beu, D., Campianu, A., & Galatanu, C. D. (2019). *Sustainable Lighting-Retrofit Versus Dedicated Luminaires-Light Versus Power Quality*. *Sustainability*. doi:https://doi.org/10.3390/su11247125

- DIAL GmbH. (nd). *Product data sheet: Less is more Flex PRO*. Diakses pada April 2025 dari <https://luminaires.dialux.com/en/article/2hFPB9NIT3SKeOkgLtwEwg>
- Dubois, M.-C., Bisegna, F., Gentile, N., Knoop, M., Matusiak, B., Osterhaus, W., & Tetri, E. (2015). *Retrofitting the Electric Lighting and Daylighting Systems to Reduce Energy Use in Buildings: A Literature Review*. *Energy Research Journal*, 25-41. doi:DOI: 10.3844/erjsp.2015.25.41
- ERCO. (nd). *Efficient LED architectural lighting*. Diakses pada 11 November 2025 dari <https://www.ercos.com/en/>
- European Committee for Standardization. (2021). EN 12464-1:2021 – *Light and lighting – Lighting of work places – Part 1: Indoor work places*. Brussels, Belgium: CEN
- Fernandes, J., Santos, C. M., & Castro, R. (2021). *Introductory Review of Energy Efficiency in Buildings Retrofits*. *Energies*, 1-18. doi:<https://doi.org/10.3390/en14238100>
- Gavioli, M., Tetri, E., Raj Baniya, R., & Halonen, L. (2015). *Lighting Retrofitting : Improving Energy Efficiency and Lighting Quality*.
- Gemelli, A., Shiratuddin, M. F., & Kemp, D. (2012). *The Impact of Lighting on Impressions of Interior Space*. *International Journal of Designed Objects*, 19-41. doi:<https://doi.org/10.18848/2325-1379/CGP/v06i02/38653>
- Gorgulu, S., & Kocabey, S. (2020). *An Energy Saving Potential Analysis of Lighting Retrofit Scenarios in Outdoor Lighting Systems : A Case Study for A University Campus*. *Journal of Cleaner Production*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121060>
- Hye-Jin, K. (2022). *An Economic Analysis of The Luminaire-Level Control of LED Lighting in Small Office*. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 2155-2171. doi:<https://doi.org/10.1080/13467581.2022.2097244>
- Illuminating Engineering Society. (nd). *Inverse-square law*. Diakses pada 11 November 2025 dari <https://www.ies.org/definitions/inverse-square-law/>
- Illuminating Engineering Society. (2000). *The Lighting Handbook: Reference and Application* (9th ed.). New York, NY: Illuminating Engineering Society of North America (IESNA).
- Leonardo. (2020). *Preferensi Mahasiswa terhadap Pencahayaan Buatan Ideal untuk Ruang Kelas Studio Gambar*. Serat Rupa, 51-56. doi:<https://doi.org/10.28932/srjd.v4i1.1965>
- Lee, A. (n.d.). *Inverse Square Law*. In *Basic Lighting for Electricians : Level 1* (Chap. 10). BCcampus Press. Diakses pada 11 November 2025 dari <https://pressbooks.bccampus.ca/lightingforelectricians/chapter/inverse-square-law/>
- Lowcay, D., Gunay, H., & O'Brien, W. (2020). *Simulating Energy Savings Potential with High-Resolution Daylight and Occupancy Sensing in Open-Plan Offices*. *Journal of Building Performance Simulation*, 606-619. doi:<https://doi.org/10.1080/19401493.2020.1807604>
- Minseok, K., Seung-Bok, L., Taeyeon, K., & Sooyoun, C. (2015). *A Study on External Shading Devices for Reducing Cooling Loads and Improving Daylighting in Office Buildings*. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 687-694. doi:DOI: 10.3130/jaabe.14.687
- Ola, F. B., & Michelle, B. (2021). *Digital Simulation as a Design Method of Artificial Lighting for Prayer Rooms*. *Indonesian Journal of Information Systems (IJIS)*, 43-54. doi:<https://doi.org/10.24002/ijis.v4i1.4392>
- Pérez-Carramiñana, C. (2024). *Influence of Sun Shading Devices on Energy Efficiency, Thermal Comfort and Lighting Comfort in a Warm Semi-Arid Dry Mediterranean Climate*. *Buildings*. doi:<https://doi.org/10.3390/buildings14020556>
- Philips Lighting. (nd). *Philips lighting : Sustainable LED lighting solutions*. Diakses pada 11 November 2025 dari <https://www.lighting.philips.com/>

- Pierson, C., Wienold, J., & Bodart, M. (2018). *Review of Factors Influencing Discomfort Glare Perception from Daylight*. *Leukos*, 111-148. doi:<https://doi.org/10.1080/15502724.2018.1428617>
- Qingxuan, L., Ling, J., Tao, L., Jiabin, S., Peng, X., Jiaping, L., . . . Xuan, J. (2023). *Status of Typical Artificial Lighting Environments in Different Public Buildings in China, and Requirements for Their Improvement*. *Buildings*. doi:<https://doi.org/10.3390/buildings13092283>
- Rusli, S. A., & Indrawan, H. (2022). *The Implementation of Artificial Lighting on Residential Interior Design in Green Village Cluster, Tangerang*. Atlantis Press, 1064-1069. doi:<https://doi.org/10.2991/assehr.k.220404.168>
- Salim, S., Tolago, A. I., & R.P. Syafi'i, M. (2022). *Analisis Intensitas Konsumsi Energi Listrik untuk Penghematan Listrik di Fakultas Teknik UNG*. *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi*, 1-7. doi:<https://doi.org/10.22146/jnteti.v11i3.3836>
- Sejati, N. W., & Dewi, O. C. (2024). *Sustainable Lighting through Design and Energy Efficiency Consumption of Artificial Lighting in Educational Building. Case Study: S Building, FTUI, Depok, Indonesia*. *Emara*, 30-45. doi:<https://doi.org/10.29080/eija.v9i1.1724>
- Shah, A., Chovatiya, P., & Shah, N. (2017). *A BIM Based Lighting Analysis for Evaluating Saving Potential in Lighting Cost During Project Cycle*. *Kalpa*, 45-50. doi:[doi:10.29007/l6vs](https://doi.org/10.29007/l6vs)
- Supriyo, Adha, M. F., & Setyono, K. J. (2022). *Analisis Retrofit Lampu Konvensional ke Lampu LED pada Gedung Gramedia Matraman dengan Cara Zero Investment*. *Bangun Rekaprima*, 1-8. doi:[doi:10.32497/bangunrekaprima.v8i1.3522](https://doi.org/10.32497/bangunrekaprima.v8i1.3522)
- Wijaya, M. H. (2019). *Analisis Retrofit Lampu Di Kantor Wilayah BRI Denpasar*. *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, 293-298. doi:<https://doi.org/10.24843/MITE>
- Yusuf, M., Razak, H., & Rizani, M. A. (2025). *Identifikasi pencahayaan alami pada terminal penumpang bandara udara Syamsudin Noor*. *Tesa Arsitektur*, 49-60. doi:<https://doi.org/10.24167/tesa.v23i1.13536>