

OPTIMISASI PERLETAKAN DAN PENJADWALAN SISTEM PENCAHAYAAN UNTUK MENINGKATKAN EKSITANSI RATA-RATA PERMUKAAN DALAM RUANG

Optimisation of Spacing and Scheduling of Lighting System to Improve Mean Room Surface Exitance

Rizki Armanto Mangkuto¹, Albertus Wida Wiratama², Karima Fadla², F.X. Nugroho Soelami¹

¹Kelompok Keahlian Fisika Bangunan, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung

²Program Studi Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung

Jalan Ganesha 10, Bandung 40132

Surel: armanto@tf.itb.ac.id, albertusww@gmail.com, mimafadla@gmail.com, nugroho@tf.itb.ac.id

Diterima : 4 Februari 2019 ; Disetujui : 23 April 2019

Abstrak

Penelitian ini dilakukan untuk mendemonstrasikan suatu metode optimisasi perletakan dan penjadwalan sistem pencahayaan dalam ruang, dalam rangka meningkatkan eksitansi rata-rata permukaan dalam ruang (MRSE) dan metrik otonomi cahaya alami (DA), serta menurunkan konsumsi energi pencahayaan tahunan. Dua ruang laboratorium uji beton yang berlokasi di Balai Besar Bahan dan Barang Teknik, Bandung, Indonesia, dipilih sebagai studi kasus. Optimisasi pencahayaan alami dilakukan dengan menghilangkan langit-langit gantung laboratorium, memenuhi target $MRSE_{200/50\%}$ dan $DA_{200/50\%}$ sepenuhnya di ruang timur, tetapi hanya sebagian di ruang barat. Optimisasi pencahayaan elektrik dilakukan untuk memenuhi target yang tersisa dengan menentukan posisi lumener menggunakan algoritme genetik (GA) dalam simulasi Grasshopper dan Octopus. Posisi yang dihasilkan memenuhi seluruh tujuan di sebagian besar zona. Penjadwalan kontrol pencahayaan kemudian diusulkan berdasarkan profil DA dan MRSE dalam ruang. Sistem terintegrasi yang diusulkan menghasilkan konsumsi energi pencahayaan tahunan sebesar 9,9 kWh/m²/tahun untuk ruang barat dan 1,0 kWh/m²/tahun untuk ruang timur.

Kata Kunci: Eksitansi rata-rata permukaan dalam ruang, otonomi cahaya alami, sistem pencahayaan, algoritme genetik, optimisasi

Abstract

This research was conducted to demonstrate an approach to optimise general lighting condition in indoor spaces, to improve mean room surface exitance (MRSE) and daylight autonomy (DA), while reducing annual lighting energy demand. Two concrete-testing laboratory rooms located in the Centre for Material and Technical Products in Bandung, Indonesia were taken as case study. Daylight optimisation was performed by removing the laboratories' false ceiling in simulation, satisfying $MRSE_{200/50\%}$ and $DA_{200/50\%}$ target entirely in the east room, but only partially in the west room. Electric lighting optimisation was performed to meet the remaining target by determining the luminaires' position using genetic algorithm in Grasshopper and Octopus simulation. The resulting positions meet the entire objectives in most of the zones. Scheduling of the lighting control is suggested based on the DA and MRSE profiles. The proposed integrated system yields annual lighting energy demand of 9.9 kWh/m²/yr for the west room and 1.0 kWh/m²/yr for the east room.

Keywords: Mean room surface exitance, daylight autonomy, lighting system, genetic algorithm, optimisation

PENDAHULUAN

Peran fisika bangunan, terutama dalam aspek lingkungan termal, pencahayaan dan akustik, dalam mempengaruhi kesehatan, kesejahteraan, dan produktivitas pekerja di lingkungan kerja telah lama diketahui. Dalam aspek pencahayaan, tersedianya cahaya yang memadai dalam suatu ruang kerja

diperlukan untuk menjamin tersedianya lingkungan kerja dengan kinerja dan kenyamanan visual yang optimum, yang diperlukan dalam mewujudkan keamanan, keselamatan, dan kenyamanan pekerja.

Dalam pendekatan desain pencahayaan tradisional, fokus perhatian biasanya pada penyediaan nilai yang memadai dari iluminansi bidang kerja, sebagaimana ditentukan dalam berbagai standar dan kode, misal

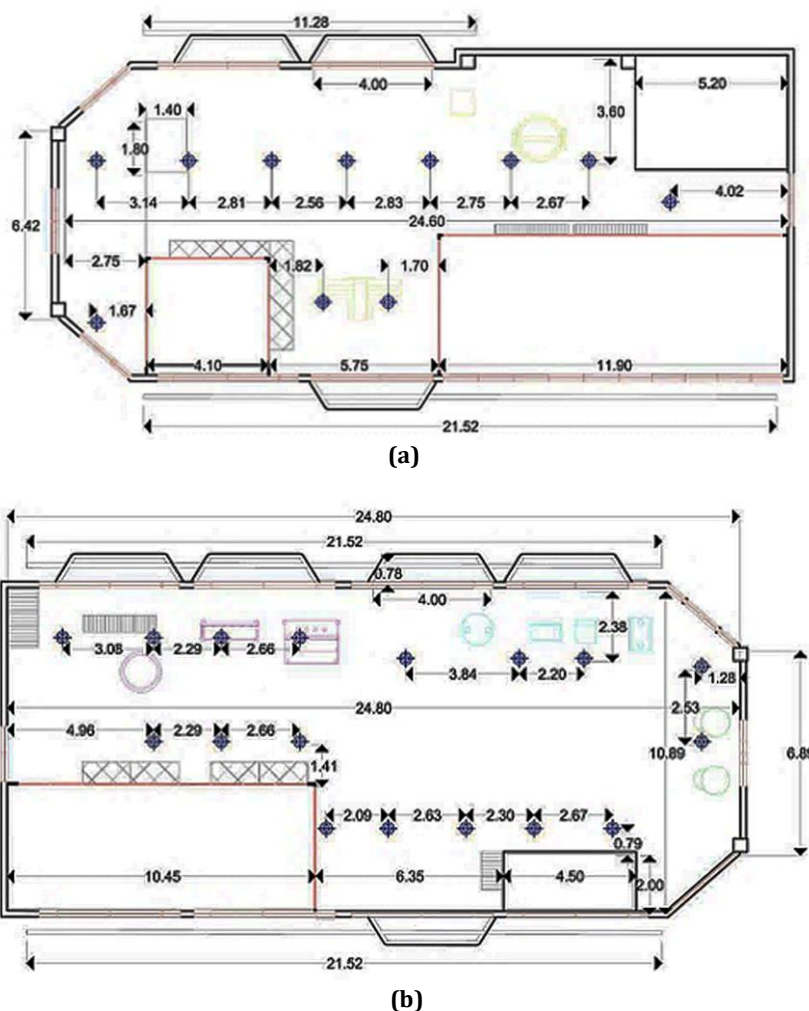
BSN (2000; 2001); ISO (2002); CEN (2011). Namun, pendekatan yang lebih mutakhir kini bergeser ke arah desain iluminansi tidak langsung rata-rata pada bidang mata, yang dapat didekati dengan metrik eksitasi rata-rata permukaan dalam ruang (MRSE), yang pertama kali didefinisikan oleh Cuttle (2008; 2010; 2013) sebagai rasio antara fluks pantulan pertama (FRF) dan luas absorpsi cahaya dalam ruang ($A\alpha$). MRSE direkomendasikan sebagai indikator kecerahan spasial dari pencahayaan latar (Cai et al. 2018; Cuttle 2013; 2015), yang jika dirancang dengan baik dapat secara signifikan mengurangi konsumsi energi pencahayaan.

Meskipun konsep MRSE telah lama diusulkan, studi kasus yang melibatkan optimisasi dalam ruang nyata jarang ditemui. Cuttle (2010; 2013; 2015) telah memberikan beberapa contoh praktis tentang penerapan MRSE dalam desain pencahayaan berbagai ruang interior, tetapi tanpa proses optimisasi. Cai et al. (2018) telah mengusulkan aturan praktis serta hubungan matematis antara iluminansi

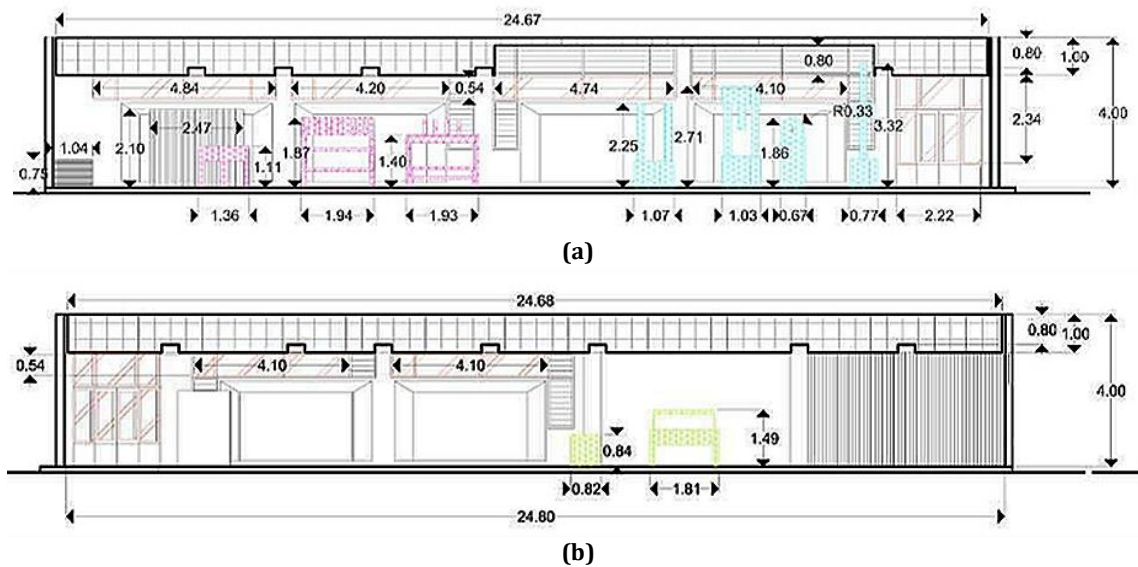
pada bidang mata dan MRSE serta reflektansi permukaan ruang pada skenario pencahayaan alami dan elektrik. Namun demikian, ruang yang dimodelkan dalam penelitian tersebut bersifat hipotetis/konseptual, sehingga kurang mewakili interaksi riil dengan lingkungan.

Dalam penelitian ini, diusulkan studi kasus nyata yang melibatkan perhitungan dan optimisasi MRSE pada Laboratorium Beton Balai Besar Bahan dan Barang Teknik (B4T), Kementerian Perindustrian, Bandung, Indonesia. Laboratorium ini terdiri dari dua ruang (barat dan timur), yang berfungsi sebagai fasilitas pengujian untuk menilai kualitas sampel beton komersial.

Kedua ruang tersebut secara umum memiliki kecerahan ruang yang rendah, karena reflektansi permukaan dalam ruang yang relatif rendah. Pengecatan dinding dalam ruang dianggap kurang efektif karena faktor perawatan/ kebersihan ruang yang cenderung rendah. Oleh karena itu, strategi



Gambar 1 Denah Lantai dan Sistem Pencahayaan Umum Elektrik pada Ruang (a) barat dan (b) timur Laboratorium Beton (dalam meter)



Gambar 2 Tampak Elevasi Ruang (a) Barat dan (b) Timur Laboratorium Beton (dalam meter)

desain dalam penelitian ini difokuskan pada mengoptimalkan perletakan dan penjadwalan luminer (lampu + armatur) pada sistem pencahayaan umum, serta integrasinya dengan pencahayaan alami.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan perletakan luminer pada laboratorium pengujian beton tersebut, dengan mengevaluasi MRSE dan metrik pencahayaan lain yang relevan. Metode algoritme genetika (GA) digunakan untuk optimisasi, dengan sasaran sebagai berikut:

1. Menentukan spesifikasi, posisi, dan pengelompokan luminer di ruangan terkait, dengan mempertimbangkan berbagai metrik pencahayaan termasuk MRSE.
2. Menentukan jadwal optimum untuk pengontrolan sistem pencahayaan elektrik yang terintegrasi dengan pencahayaan alami.

METODE

Pengambilan Data

Bangunan Laboratorium Beton B4T terdiri dari dua ruang besar yang terpisah, yaitu ruang barat dan timur. Kedua ruang memiliki lantai berukuran sekitar 21 m × 11 m, serta langit-langit gantung setinggi 3 m dari lantai. Denah lantai ditampilkan dalam Gambar 1, mencakup denah sistem pencahayaan umum elektrik (LED) yang ada. Tampak elevasi kedua ruang ditampilkan pada Gambar 2, sedangkan foto kedua ruang ditampilkan pada Gambar 3.

Dalam desain yang diusulkan, kedua ruang laboratorium secara virtual dibagi menjadi beberapa zona pengelompokan luminer, yang ditentukan berdasarkan posisi relatif dan jenis kegiatan yang relevan. Lima zona (A sampai E) didefinisikan pada ruang barat, sedangkan tujuh zona (A hingga G) didefinisikan pada ruang timur, seperti pada Gambar 2.

Karena optimisasi desain dilakukan dengan menggunakan pemodelan komputasi dan simulasi, prosedur validasi dilakukan untuk memastikan tidak ada perbedaan yang signifikan antara kinerja ruang aktual dan ruang model. Terdapat 16 dan 15 titik ukur yang didefinisikan pada ruang barat dan timur. Iluminansi horizontal pada setiap titik diukur menggunakan iluminansi meter *Hioki HiTester 3423* dan *Lutron LX-103*, pada ketinggian 0,75 m dari lantai.

Pengukuran dilakukan pada 6 Mei 2017 dari pukul 10.00 hingga 11.00 WIB di semua titik ukur dan di luar gedung, di bawah kondisi langit berawan, tanpa menggunakan pencahayaan elektrik. Rasio antara iluminansi dalam dan luar ruang menghasilkan faktor pencahayaan alami siang hari (FPASH) untuk setiap titik ukur, yang secara teoritis bernilai konstan sepanjang tahun, dengan asumsi kondisi langit berawan standar.

Reflektansi permukaan dalam ruang (ρ) diukur menggunakan luminansi meter *Konica Minolta LS-110* dan disesuaikan dengan *JALOXA Colour Picker* (Jaloxa 2019). Kekasaran (r) dan spekularitas (s) masing-masing bahan permukaan ditentukan menurut basis data *Radiance* (Matthews 2017).



(a)



(b)

Gambar 3 Foto Suasana pada Ruang (a) Barat dan (b) Timur Laboratorium Beton

Pemodelan dan Simulasi

Model geometris dari kedua ruang laboratorium beserta penghalang luar yang ada di sekitarnya dibangun dan disimulasikan dengan *Rhinoceros 3D* (Robert McNeel & Associates 2019) dan *Grasshopper* (Davidson 2018). Simulasi di dilakukan menggunakan data cuaca (*.epw) dari Bandung, Indonesia. Kedua ruang diasumsikan selalu dihuni mulai pukul 08.00 hingga 16.00, dari hari Senin hingga Jumat.

Faktor pencahayaan alami siang hari (DF), yang merupakan rasio antara iluminansi dalam dan luar ruang yang diukur secara bersamaan di bawah langit berawan CIE, ditinjau pada titik-titik ukur yang ditetapkan. Uji statistik *t* dilakukan untuk mengevaluasi perbedaan statistik antara rata-rata DF yang diukur dan yang disimulasikan. Jika perbedaannya tidak signifikan ($p > 0,05$), model yang dibangun dianggap telah valid dalam merepresentasikan fenomena refleksi dan transmisi di dalam ruang tersebut.

Seluruh properti material permukaan ruang diambil berdasarkan data *JALOXA Colour Picker* pada Tabel 1, sedangkan parameter simulasi *Radiance* yang digunakan tercantum dalam Tabel 2. Untuk memodelkan kondisi pencahayaan umum, pengelompokan luminer di kedua ruang

laboratorium diasumsikan seperti pada Gambar 5. Dua atau tiga luminer yang terdapat pada kondisi aktual digabungkan menjadi empat kelompok (P, Q, R, S) seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 1 Properti Material Permukaan Dalam Ruang

Material	ρ_R	ρ_G	ρ_B	<i>r</i>	<i>s</i>
Lantai	0,149	0,150	0,149	0,000	0,000
Dinding putih	0,770	0,770	0,770	0,000	0,000
Dinding kuning	0,100	0,568	0,040	0,000	0,000
Dinding kayu	0,160	0,090	0,045	0,100	0,080
Perabot kayu	0,005	0,003	0,002	0,080	0,080
Skala bacaan	0,290	0,280	0,280	0,020	0,050
Instrumen 1	0,320	0,296	0,296	0,800	0,020
Instrumen 2	0,000	0,000	0,400	0,800	0,020
Instrumen 3	0,320	0,302	0,302	0,800	0,020
Kusen jendela	0,150	0,150	0,150	0,800	0,020
Fasad luar	0,581	0,615	0,523	0,000	0,000
Pohon	0,000	0,250	0,000	0,270	1,000

Tabel 2 Parameter Simulasi Dalam *Radiance*

Parameter	Nilai
<i>Ambient accuracy (aa)</i>	0,2
<i>Ambient bounce (ab)</i>	5
<i>Ambient divisions (ad)</i>	512
<i>Ambient resolution (ar)</i>	128
<i>Ambient super-samples (as)</i>	256
<i>Direct relays (dr)</i>	3
<i>Source substructuring (ds)</i>	0,15
<i>Limit reflection (lr)</i>	8
<i>Limit weight (lw)</i>	0,002
<i>Direct certainty (dc)</i>	0,5
<i>Direct pretest density (dp)</i>	512
<i>Direct thresholding (dt)</i>	0,05
<i>Specular threshold (st)</i>	0,15

Tabel 3 Fluks Cahaya Aktual dan Asumsi Dalam Pengelompokan Luminer

Luminer (barat)	Luminer (timur)	Fluks cahaya aktual [lm]	Grup	Fluks cahaya asumsi [lm]
-	#16, #17	990	P	1055
#2	-	1100		1055
-	#1~4	1100		1055
#1	#7~10	2520	Q	2500
#3	#5, #6	2340		2500
-	#11~14	1276	R	1500
#6~11	#15	1426		1500
#4	-	2300	S	2300
#5	-	2300		2300

Parameter utama dalam penelitian ini adalah MRSE, yang didefinisikan sebagai berikut:

$$MRSE = \frac{FRF}{A_\alpha} = \frac{\sum_{j=1}^n \rho_j \Phi_{(d)j}}{\sum_{j=1}^n A_j (1 - \rho_j)} = \frac{\sum_{j=1}^n \rho_j E_{(d)j} A_j}{\sum_{j=1}^n A_j (1 - \rho_j)} \dots\dots(1)$$

dengan FRF ialah fluks pantulan pertama dari permukaan dalam ruang [lm], A_α ialah total luas absorpsi cahaya dalam ruang [m²], ρ ialah reflektansi permukaan dalam ruang [-], sedangkan $\Phi_{(d)}$ dan $E_{(d)}$ ialah fluks cahaya [lm] dan iluminansi [lx] langsung yang diterima pada permukaan dalam ruang.

Nilai 200 lm/m² diambil sebagai target, yaitu titik tengah antara 100 dan 300 lm/m², seperti yang direkomendasikan oleh Cuttle (2008; 2015) untuk persepsi kecerahan yang 'dapat diterima' dan 'cerah'. Nilai MRSE dihitung secara terpisah untuk setiap zona lumener (Gambar 3), berdasarkan kontribusi pencahayaan alami dan elektrik.

Untuk mengamati berapa lama target MRSE dapat dicapai sepanjang tahun, didefinisikan metrik temporal %MRSE₂₀₀, yaitu fraksi waktu di mana MRSE ≥ 200 lm/m² terpenuhi, relatif terhadap total jam kerja dalam setahun (T), sehingga:

$$\%MRSE_{200} = \frac{t_{MRSE \geq 200}}{T} \times 100\% \dots\dots\dots(2)$$

Untuk menunjukkan kinerja pencahayaan alami siang hari, digunakan metrik otonomi cahaya alami dalam domain spasial (sDA) di setiap zona, dengan target iluminansi minimum 200 lx (BSN 2001), selama sekurang-kurangnya 50% dari waktu, yaitu:

$$sDA_{200/50\%} = \frac{A_{DA200>50\%}}{A_{total}} \times 100\% \dots\dots\dots(3)$$

dengan $A_{DA200>50\%}$ ialah area lantai yang memiliki $DA_{200/50\%}$ [m²], serta A_{total} ialah total luas lantai yang dihuni di zona tersebut [m²].

Selanjutnya, metrik iluminansi rata-rata (E_{av}) dan pemerataan (U, yaitu rasio antara pencahayaan minimum dan rata-rata) pada bidang kerja di setiap zona juga dihitung, dengan target minimum 200 lx. Metrik % E_{av200} juga diusulkan untuk menentukan kontribusi pencahayaan alami terhadap kinerja pencahayaan total, sehingga:

$$\%E_{av,200} = \frac{t_{E_{av} \geq 200}}{T} \times 100\% \dots\dots\dots(4)$$

Strategi Desain

Strategi desain yang dilakukan pada prinsipnya mengintegrasikan pencahayaan alami dengan sistem pencahayaan elektrik dalam ruang, untuk mengoptimalkan kinerja dan kenyamanan visual serta konsumsi energi elektrik. Nilai FRF yang diperlukan untuk setiap zona adalah:

$$FRF \approx MRSE \times [A_c(1 - \rho_c) + A_f(1 - \rho_f)] \dots\dots\dots(5)$$

Dengan menerapkan metode lumen, total fluks yang dipancarkan oleh semua lumener (Φ_{tot}) pada setiap zona adalah:

$$\Phi_{tot} \approx \frac{MRSE \times [A_c(1 - \rho_c) + A_f(1 - \rho_f)]}{ULOR \times \rho_c + DLOR \times \rho_f} \dots\dots\dots(6)$$

dengan A_c , A_f ialah luas permukaan langit-langit dan lantai [m²], ρ_c , ρ_f ialah reflektansi langit-langit dan lantai [-], serta ULOR dan DLOR ialah rasio keluaran cahaya ke atas dan ke bawah dari tiap lumener.

Untuk mengoptimalkan pencahayaan umum, karena faktor pemeliharaan ruang relatif rendah serta reflektansi langit-langit lebih besar daripada reflektansi lantai, dipilih jenis lumener yang mengarah ke atas (*uplight*). Berdasarkan Persamaan 5 dan 6, banyaknya lumener yang diperlukan pada masing-masing zona dapat dihitung dan disesuaikan, sebagaimana ditampilkan dalam Tabel 4 dan 5. Densitas daya pencahayaan di ruang barat dan timur didapatkan berturut-turut sebesar 6,1 dan 4,3 W/m².

Tabel 4 Banyaknya Lumener yang Diperlukan Pada Ruang Barat

Zona	A_α [m ²]	FRF [lm]	Φ_{tot} [lm]	n hitung	n sesuai
A	41,5	8295	14204	4	2
B	45,1	9016	15438	4	4
C	99,3	19860	34007	6	7
D	44,2	8834	15127	4	3
E	39,9	7976	13658	4	3
n total (d disesuaikan)					19
Total luas lantai [m²]					163,9
Densitas daya pencahayaan [W/m²]					6,1

Tabel 5 Banyaknya Lumener yang Diperlukan Pada Ruang Timur

Zone	A_α [m ²]	FRF [lm]	Φ_{tot} [lm]	n hitung	n sesuai
A	61,6	12318	21092	4	4
B	25,9	5184	8876	2	2
C	35,6	7112	12177	2	2
D	52,3	10464	17917	4	4
E	35,7	7133	12213	2	2
F	18,6	3720	6371	2	1
G	28,4	5680	9727	2	3
n total (d disesuaikan)					18
Total luas lantai [m²]					219,7
Densitas daya pencahayaan [W/m²]					4,3

Sebagai langkah terakhir, dalam simulasi dilakukan penghilangan langit-langit gantung (*false ceiling*) yang ada dalam kedua ruang, untuk memperbesar bukaan cahaya alami dan udara segar.

Optimisasi Desain

Optimisasi desain dilakukan dengan menggunakan algoritme genetik (GA) dalam *Grasshopper* dan *Octopus*. Konsep GA diusulkan pertama kali pada tahun 1950-an (Barricelli 1954; 1957; Fraser 1957) Secara ringkas, GA menerapkan berbagai operator yang ada pada proses evolusi, seperti persilangan, mutasi, dan seleksi, untuk mendapatkan generasi keturunan dengan tingkat kelaikan lebih tinggi dibandingkan generasi sebelumnya. Iterasi dilakukan secara komputasi sampai titik tertentu di mana nilai kelaikan yang diperoleh menjadi cukup dekat dengan target, sehingga diperoleh solusi optimum dari masalah optimisasi tersebut.

Dalam kasus ini, variabel masukan adalah lokasi spasial (x, y, z) dari setiap lumener umum di setiap zona, dengan interval 0,1 m. Pada setiap zona diberlakukan aturan sebagai berikut: semua lumener harus memiliki nilai z yang sama; semua lumener pada baris yang sama harus memiliki nilai x yang sama; dan semua lumener dalam kolom yang sama harus memiliki nilai y yang sama. Jarak antara baris yang berdekatan (d_x) dan kolom (d_y) lumener setidaknya harus 0,1 m.

Nilai MRSE yang dihitung ($MRSE_{calc}$) kemudian dinormalisasi dengan MRSE target sebesar 200 lm/m^2 . Dengan mempertimbangkan pula nilai pemerataan (U), dapat didefinisikan suatu fungsi objektif f sebagai berikut:

$$f = \sqrt{\left(\frac{MRSE_{calc}}{MRSE_{target}} - 1\right)^2 - \left(\frac{1}{U} - 1\right)^2} \dots\dots\dots (7)$$

Problem optimisasi pada setiap zona dengan demikian dapat dituliskan secara formal sebagai berikut:

$$\min f \dots\dots\dots (8)$$

dengan kendala:

$$d_x \geq 0,1 \text{ m}, d_y \geq 0,1 \text{ m} \dots\dots\dots (9)$$

$$E_{av} \geq 200 \text{ lx} \dots\dots\dots (10)$$

Untuk mendapatkan solusi optimum, GA dilakukan menggunakan program *Octopus*. Parameter GA yang relevan ditampilkan pada Tabel 6.

Tabel 6 Parameter GA dalam *Octopus*

Parameter	Nilai	Rentang
Crossover rate	0,8	0 ~ 1
Mutation probability	0,01	0 ~ 1
Mutation rate	0,001	0 ~ 1
Elitism	0,5	0 ~ 1

Optimisasi luminer dilakukan sebagai pelengkap pencahayaan alami dalam ruang, dengan cara penjadwalan luminer, dengan asumsi sakelar nyala/mati untuk pengelompokan luminer tertentu. Semua luminer ditetapkan untuk aktif selama jam kerja (1910 jam per tahun), dengan algoritme sebagai berikut:

1. Pada skema pencahayaan umum, jika zona memiliki MRSE < 200 lm/m^2 , atau E_{av} < 200 lx, maka semua luminer pada zona tersebut akan dinyalakan. Untuk menerangi pembacaan skala instrumen, misal pada zona A dan C di ruang timur dan pada zona D di ruang barat, luminer lokal harus digunakan jika diperlukan.
2. Pada skema pencahayaan lokal + umum, selain algoritme yang ditentukan, jika MRSE dan E_{av} mencapai target tetapi iluminansi pada permukaan skala (E_s) tidak, maka hanya luminer lokal yang akan dinyalakan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Validasi Model

Tabel 7 merangkum hasil uji statistik t untuk validasi nilai FPASH berdasarkan pengukuran dan simulasi kondisi aktual. Dapat diamati bahwa tidak terdapat perbedaan signifikan ($p = 0,78$ dan $0,81$ untuk ruang barat dan timur berturut-turut) antara rata-rata nilai FPASH terukur dan simulasi. Oleh karena itu, model ini dianggap valid dan dapat diproses untuk optimisasi lebih lanjut.

Tabel 7 Hasil Uji t untuk Nilai FPASH Berdasarkan Pengukuran dan Simulasi Kondisi Aktual

Parameter	Ruang Barat		Ruang Timur	
	Ukur [%]	Sim. [%]	Ukur [%]	Sim. [%]
Mean	0,21	0,26	2,59	2,23
SD	0,30	0,66	4,64	3,44
t stat	0,28		0,61	
df	21		29	
T crit	2,08		2,06	
p	0,78		0,81	

Tabel 8 Hasil Simulasi Pencahayaan Alami Tahunan pada Kondisi Aktual Di Tiap Zona

Zona	Ruang Barat		Ruang Timur	
	%MRSE ₂₀₀ [%]	sDA _{200/50%} [%]	%MRSE ₂₀₀ [%]	sDA _{200/50%} [%]
A	0,0	0,0	0,2	18,3
B	0,0	0,0	12,4	82,8
C	0,0	0,0	69,7	94,2
D	0,1	5,9	1,4	63,2
E	44,8	78,7	10,7	89,0
F	-	-	86,9	91,8
G	-	-	94,2	99,8

Tabel 9 Hasil Simulasi Pencahayaan Elektrik pada Kondisi Aktual Di Tiap Zona

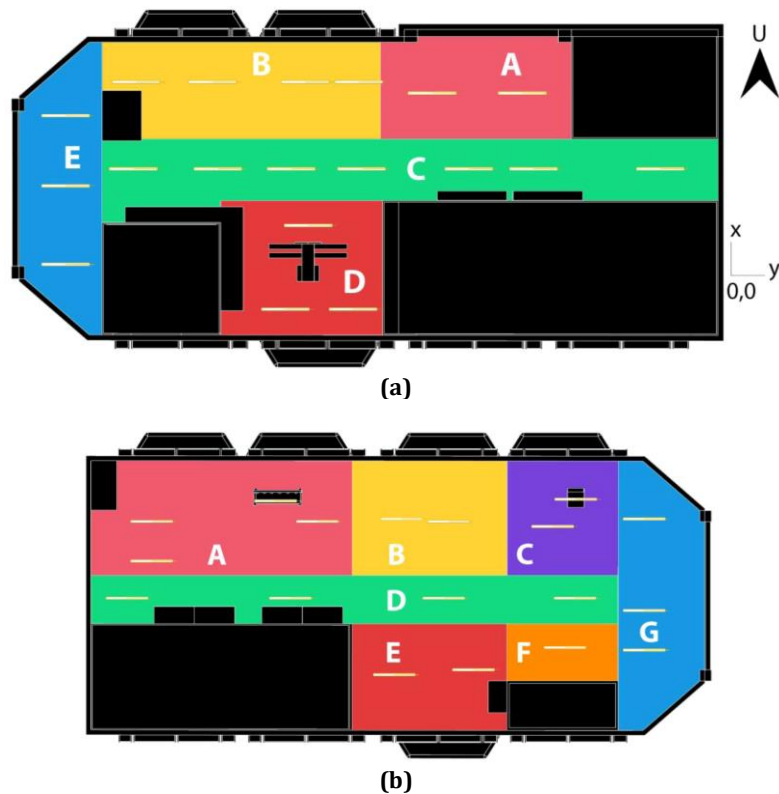
Zona	Ruang Barat			Ruang Timur		
	MRSE [lm/m ²]	E _{av} [lx]	U [-]	MRSE [lm/m ²]	E _{av} [lx]	U [-]
A	25	37	0,40	19	22	0,40
B	23	37	0,30	6	1	0,30
C	18	38	0,20	0	2	0,40
D	20	44	0,50	71	12	0,10
E	22	29	0,40	0	23	0,20
F	-	-	-	20	43	0,70
G	-	-	-	1	9	0,10

Simulasi tahunan dilakukan dengan model kondisi yang ada, dengan mempertimbangkan pencahayaan alami dan elektrik. Tabel 8 merangkum %MRSE₂₀₀

dan sDA_{200/50%} pada tiap zona dalam skenario pencahayaan alami. Adapun Tabel 9 merangkum MRSE, E_{av}, dan U dalam skenario pencahayaan elektrik saja, untuk mengetahui kontribusi sistem pencahayaan umum. Nilai U tidak dipertimbangkan dalam skenario pencahayaan alami, karena umumnya bernilai rendah dan berpotensi menimbulkan kontras yang tinggi.

Sebagian besar zona tidak memenuhi target MRSE dan sDA karena terbatasnya luas bukaan cahaya serta terdapat penghalang di luar gedung laboratorium. Ruang timur secara umum menerima lebih banyak cahaya alami dibandingkan dengan ruang barat. Zona G di ruang timur terletak di sebelah bukaan pintu besar (digunakan untuk masuk dan keluar saat mengangkut material beton uji) di sisi timur, sehingga memiliki nilai sDA_{200/50%} terbesar.

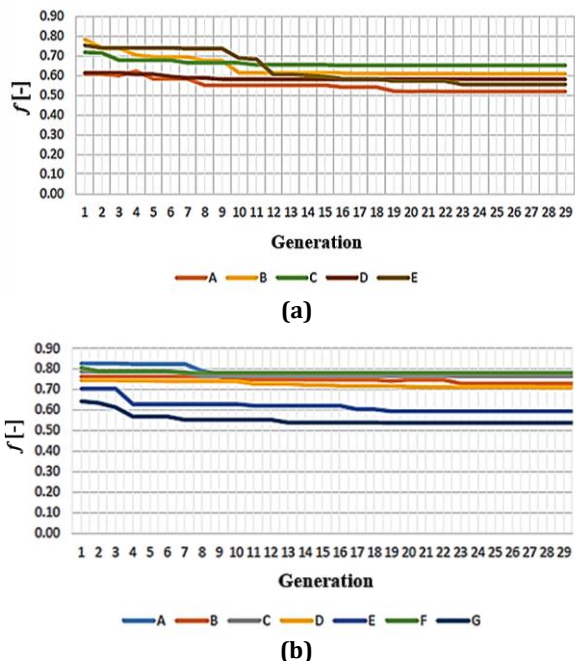
Tabel 9 menunjukkan bahwa MRSE tertinggi adalah 71 lm/m² di zona D ruang timur, sedangkan E_{av} tertinggi adalah 44 lx di zona D ruang barat. Kemerataan terbesar adalah 0,70 di zona F ruang timur, sedangkan E_{av} adalah 43 lx. Meskipun zona A, C, dan F ruang timur dan zona A, D, E barat mencapai U > 0,33, iluminansi rata-ratanya masih terlalu rendah sehingga masih perlu dioptimumkan.



Gambar 4 Denah Perletakan Optimum Luminer Umum pada Ruang (a) Barat dan (b) Timur

Optimisasi

Gambar 5 menunjukkan plot konvergensi GA untuk fungsi objektif f pada setiap zona di kedua ruang laboratorium. Diamati bahwa setelah sekitar 23 generasi, iterasi nilai f pada semua zona menjadi konvergen. Berdasarkan hasil tersebut, perletakan optimum dari setiap lumener umum dapat diperkirakan, seperti ditampilkan pada Gambar 6.



Gambar 5 Plot Konvergensi GA untuk Fungsi Objektif f Pada Ruang (a) Barat dan (b) Timur

Tabel 10 merangkum hasil simulasi tahunan setelah optimisasi pada setiap zona dan ruang, dalam skenario pencahayaan alami tanpa langit-langit gantung. Dibandingkan dengan Tabel 8, modifikasi yang diusulkan lebih efektif pada ruang timur, di mana $sDA_{200/50\%}$ pada semua zona mencapai hampir 100%, serta $\%MRSE_{200} > 78\%$.

Tabel 10 Hasil Simulasi Pencahayaan Alami Setelah Optimisasi Di Tiap Zona

Zona	Ruang Barat		Ruang Timur	
	$\%MRSE_{200}$ [%]	$sDA_{200/50\%}$ [%]	$\%MRSE_{200}$ [%]	$sDA_{200/50\%}$ [%]
A	0,3	0,0	78,9	95,4
B	0,0	0,6	87,4	97,9
C	0,2	0,3	90,5	99,1
D	41,6	90,8	87,7	96,2
E	69,9	86,5	90,8	97,5
F	-	-	97,7	98,7
G	-	-	98,4	100,0

Adapun peningkatan kinerja cahaya alami secara keseluruhan di ruang barat relatif kecil, terutama karena adanya penghalang di sisi luar pintu barat.

Situasi di zona A, B, dan C relatif tidak berubah. Pada zona-zona tersebut, pencahayaan elektrik masih harus digunakan sepanjang hari, sehingga konsumsi energi tahunannya diperkirakan akan jauh lebih tinggi daripada ruang timur.

Sementara itu, Tabel 11 merangkum MRSE, E_{av} , dan U setelah optimisasi dalam skenario pencahayaan elektrik saja. Dibandingkan dengan Tabel 13, tampak bahwa modifikasi dan optimisasi yang diusulkan dapat menghasilkan MRSE sekitar 200 lm/m^2 dan E_{av} 200 lx di kedua ruang.

Tabel 11 Hasil Simulasi Pencahayaan Elektrik Setelah Optimisasi di Tiap Zona

Zone	Ruang Barat			Ruang Timur		
	MRSE [lm/m^2]	E_{av} [lx]	U [-]	MRSE [lm/m^2]	E_{av} [lx]	U [-]
A	203	219	0,48	209	229	0,23
B	200	237	0,39	189	185	0,27
C	205	293	0,35	208	206	0,24
D	213	290	0,42	246	189	0,33
E	211	256	0,45	220	206	0,42
F	-	-	-	293	185	0,37
G	-	-	-	221	219	0,47

Nilai MRSE terendah yang dicapai adalah 189 lm/m^2 di zona B ruang timur, sedangkan tertinggi adalah 293 lm/m^2 di zona F, juga di ruang yang sama. Peningkatan terbesar dicapai untuk MRSE di zona G (ruang timur, sekitar 220% meningkat) dan untuk E_{av} di zona B (ruang timur, sekitar 184% meningkat). Kemerataan pada bidang kerja menjadi antara 0,2 dan 0,5 di semua zona; nilai ini relatif rendah, tetapi perlu diingat kembali bahwa nilai minimum kemerataan tidak dicantumkan secara spesifik dalam SNI (BSN 2001).

Berdasarkan penjadwalan yang diusulkan untuk mengintegrasikan pencahayaan alami dan elektrik, dan dengan mempertimbangkan posisi lumener yang optimum dari hasil optimisasi GA, maka durasi waktu (t_{on} [jam]) untuk pengoperasian lumener umum dan lokal, serta konsumsi energi pencahayaan tahunan (KE [kWh/m^2 atau $kWh/m^2/tahun$]) untuk kedua ruang laboratorium dapat ditentukan, sebagaimana dirangkum dalam Tabel 12 dan 13.

Tabel 12 menunjukkan bahwa pencahayaan umum di ruang timur hanya diperlukan selama sekitar seperempat dari total jam kerja dalam setahun, sesuai dengan profil MRSE dan DA pada semua zona di ruangan tersebut. Pencahayaan lokal pada zona A aktif selama 90 jam per tahun. Meskipun memiliki instrumen uji yang memerlukan pembacaan yang teliti, zona C tidak memerlukan pencahayaan lokal sepanjang waktu, karena posisinya relatif dekat

dengan bukaan pintu (Gambar 4b), sehingga kontribusi cahaya alami yang diterima pada zona tersebut telah cukup memadai.

Tabel 12 Durasi Waktu Operasi Luminer Umum dan Lokal Serta Konsumsi Energi Pencahayaan yang Diperlukan pada Ruang Barat

Zona	<i>n</i> luminer	<i>t_{on}</i> , umum [jam]	<i>t_{on}</i> , lokal [jam]	KE [kWh/th]	KE [kWh/ m ² /th]
A	2	1910	-	202,5	
B	4	1910	-	404,9	
C	7	1907	-	707,5	9,9
D	3	1115	795	219,4	
E	3	576	-	91,6	

Tabel 13 Durasi Waktu Operasi Luminer Umum dan Lokal serta Konsumsi Energi Pencahayaan yang Diperlukan pada Ruang Timur

Zona	<i>n</i> luminer	<i>t_{on}</i> , umum [jam]	<i>t_{on}</i> , lokal [jam]	KE [kWh/th]	KE [kWh/ m ² /th]
A	4	403	90	90,2	
B	2	241	-	25,5	
C	2	182	-	19,3	
D	4	235	-	49,8	1,0
E	2	175	-	18,6	
F	1	44	-	2,3	
G	3	30	-	4,8	

Sebaliknya, pencahayaan umum di ruang barat diperlukan pada sebagian besar waktu; zona A dan B bahkan memerlukan pencahayaan umum setiap saat, yaitu 1910 jam per tahun. Pencahayaan lokal diperlukan di zona D selama sekitar 800 jam per tahun, sedemikian sehingga ruang barat mengkonsumsi energi pencahayaan listrik kira-kira sembilan kali lebih besar daripada ruang timur.

Pembahasan

Metode pengontrolan sistem pencahayaan elektrik (luminer) dalam penelitian ini menggunakan teknik pengelompokan sesuai zona dengan algoritme nyala-padam (*on-off*) sesuai kebutuhan. Hal ini diharapkan dapat menghasilkan kinerja sistem pencahayaan yang lebih baik dibandingkan dengan sistem pencahayaan mampu-redup (*dimmable*), yang kurang andal ketika dicatu dengan tegangan jala-jala yang kurang stabil.

Hasil simulasi dan optimisasi menunjukkan bahwa desain dan modifikasi sistem yang diusulkan menghasilkan MRSE rata-rata sekitar 200 lm/m² dan *E_{av}* 200 lx di kedua ruang laboratorium, sesuai target desain. Nilai MRSE terendah dan tertinggi dicapai pada zona B dan F di ruang timur, yang menerima relatif lebih banyak radiasi matahari selama pagi hari,

sehingga menghasilkan pula kontras yang tinggi pada lantai ruang. Nilai iluminansi bidang kerja ditargetkan sebesar 200 lx atau 1,5 kali lebih rendah dari nilai 300 lx yang biasanya digunakan, karena bidang kerja di laboratorium tersebut lebih banyak digunakan untuk memindahkan dan menyiapkan material beton, yang dapat dikategorikan sebagai aktivitas visual rendah-menengah dalam ruang industri (BSN 2001).

Kemerataan *U* pada bidang kerja setelah optimisasi di semua zona masih relatif rendah (di bawah 0,5); namun demikian, nilai minimum *U* tidak secara spesifik ditentukan dalam SNI (BSN, 2001). Untuk membaca skala pada instrumen ukur yang cukup teliti, dapat digunakan pencahayaan lokal, misalnya pada zona D di ruang barat dan zona A di ruang timur.

Prosedur pengukuran MRSE dapat dilakukan dengan memasang sensor cahaya yang dikalibrasi di beberapa titik dalam ruang, menghadap ke enam arah sumbu utama (*x+*, *x-*, *y+*, *y-*, *z+*, *z-*), seraya dilindungi dari cahaya langsung. Namun, lokasi yang tepat dari sensor cahaya tersebut haruslah disesuaikan agar tidak mengganggu tata letak berbagai perabot atau perkakas yang telah ada di dalam ruang. Dengan demikian, pengembangan topik ini dapat dilakukan dalam hal kalibrasi antara desain dan kinerja operasional sistem pencahayaan yang telah terintegrasi.

KESIMPULAN

Penelitian ini telah mendemonstrasikan aplikasi metode optimisasi sistem pencahayaan dengan mempertimbangkan eksitasi rata-rata permukaan dalam ruang (MRSE), otonomi cahaya alami (DA), iluminansi rata-rata pada bidang kerja (*E_{av}*) dan kemerataan, dalam kasus Laboratorium Beton di B4T, Bandung. Berdasarkan modifikasi desain yang diusulkan, didapatkan bahwa di ruang laboratorium timur, *sDA_{200/50%}* di semua zona mencapai hampir 100%, dan %MRSE₂₀₀ lebih dari 78%. Adapun peningkatan secara keseluruhan di ruang laboratorium barat relatif kecil, karena adanya penghalang di sisi luar ruang pada arah barat.

Berdasarkan perhitungan dengan konsep MRSE, disarankan menggunakan masing-masing 19 dan 18 unit luminer untuk ruang barat dan timur. Posisi optimum luminer yang digunakan untuk sistem pencahayaan umum telah ditentukan dengan menggunakan algoritme genetik (GA), sedemikian sehingga menghasilkan MRSE sekitar 200 lm/m² dan *E_{av}* 200 lx pada kedua ruang. Kemerataan pada bidang kerja setelah optimisasi bernilai antara 0,2 dan 0,5 pada seluruh zona.

Densitas daya pencahayaan yang dihasilkan oleh sistem pencahayaan elektrik adalah 6,1 dan 4,3 W/m² untuk masing-masing ruang, yaitu di bawah target maksimum 7,25 W/m². Integrasi sistem pencahayaan elektrik dengan pencahayaan alami didapatkan menghasilkan konsumsi energi elektrik tahunan sebesar 9,9 kWh/m²/tahun untuk ruang barat dan 1,0 kWh/m²/tahun untuk ruang timur.

Meskipun dibatasi oleh geometri ruang dan jenis lumener yang diasumsikan, penelitian ini telah mendemonstrasikan kemampuan GA dalam mengoptimalkan desain pencahayaan dalam ruang, serta kemungkinan untuk menghitung potensi penghematan energi dengan integrasi sistem pencahayaan alami dan elektrik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh Tim Pemingkatan Universitas (WCU) Institut Teknologi Bandung melalui skema penelitian luar negeri tahun 2018, bekerjasama dengan Kyushu University (Dr. Eng. Yasuko Koga). Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak Balai Besar Bahan dan Barang Teknik (B4T) Kementerian Perindustrian RI atas kerjasama dalam memberikan izin pengambilan data pada Laboratorium Beton.

DAFTAR PUSTAKA

Badan Standardisasi Nasional. 2000. "SNI 03-6197-2000: Konservasi Energi Sistem Pencahayaan Pada Bangunan Gedung."

Badan Standardisasi Nasional. 2001. "SNI 03-6575-2001: Tata Cara Perancangan Sistem Pencahayaan Buatan pada Bangunan Gedung."

Barricelli, Nils Aall. 1954. "Esempi Numerici di Processi di Evoluzione." *Methodos* 6 (21-22): 45-68.

———. 1957. "Symbiogenetic Evolution Processes Realized by Artificial Methods." *Methodos* 9 (35-36): 143-82.

Cai, Wenjing, Jiguang Yue, Qi Dai, Luoxi Hao, Yi Lin, Wen Shi, Yingying Huang, dan Minchen Wei. 2018. "The Impact of Room Surface Reflectance on Corneal Illuminance and Rule-of-Thumb Equations for Circadian Lighting Design." *Building and Environment* 141: 288-97.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.056>.

Comité Européen de Normalisation. 2011. "EN 12464-01:2011 - Lighting of Work Place - Indoor Work Places."

Cuttle, Christopher. 2008. *Lighting by Design*. 2nd ed. Oxford: Architectural Press.

———. 2010. "Towards the Third Stage of the Lighting profession." *Lighting Research & Technology* 42 (1): 73-93.

———. 2013. "A New dDirection for General Lighting Practice." *Lighting Research & Technology* 45 (1): 22-39.

———. 2015. *Lighting Design: a Perception-Based Approach*. London: Routledge.

Davidson, Scott. 2018. "Grasshopper-Algorithmic Modeling for Rhino." Lynnwood: United States. 2018. <https://www.grasshopper3d.com/>.

Fraser, Alex S. 1957. "Simulation of Genetic Systems by Automatic Digital Computers: I. Introduction." *Australian Journal of Biological Sciences* 10 (4): 484-91.

International Organization for Standardization. 2002. "ISO 8995-1:2002 (CIE S 008/E:2001) - Lighting of Workplaces - Part 1: Indoor."

Jaloxa. 2019. "Colour Picker for Radiance. Diakses 1 April 2019." *Daylighting, Radiance, and HDR Photography*.
http://www.jaloxa.eu/resources/radiance/colour_picker.shtml.

Kim, Yu-Sin, An-Seop Choi, dan Jae-Weon Jeong. 2013. "Applying Micro Genetic Algorithm to Numerical Model for Luminous Intensity Distribution of Planar Prism LED Luminaire." *Optics Communications* 293: 22-30.

Matthews, Kevin. 2017. "Basic Radiance Materials Library." *Design Integration Laboratory*.
<http://www.artifice.com/radiance/radmatlib.html>.

Robert McNeel & Associates. 2019. "RhinoCeros @." <https://www.rhino3d.com/>.