

# Analisis Sensitivitas dan Optimisasi Sistem Pencahayaan Elektrik pada Gedung Olahraga Bulu Tangkis

Rizki A. Mangkuto<sup>1</sup>, Faizatuzzahrah Rahmaniah<sup>2</sup>, Tasya Nadya H.<sup>3</sup>, Diana Pinasthika<sup>4</sup>

**Abstract**—Electric lighting in indoor sport halls is essential for providing sufficient amount of light required for the sport activities, while maintaining visual comfort for the occupants. To do so, design optimization of the lighting system is often necessary. This study provides an example of design optimization for electric lighting system in the case of an indoor badminton hall in Bandung, according to the standard of EN 12193. The electric lighting system in the hall was modelled and simulated in DIALux evo simulation tool, validated with the measured values in the existing situation. One-at-a-time sensitivity analysis was then performed to investigate the influence of building parameters and luminaire configuration on the lighting performance and visual comfort parameters. Optimization process was realized by changing the dominant input parameters so that the required output parameters are achieved. Based on simulation results, the optimum luminaires are those of fluorescent tubes with luminous flux of 3,244 lm and electric power of 58 W per unit, mounted 5 m high above the floor. The optimum ceiling and floor reflectance are respectively 0.80 and 0.80. Based on optimization of those input parameters, the average illuminance on the field can be increased to 336~364 lx, the uniformity can be increased to 0.84~0.89, and the UGR glare index can be reduced to 19, satisfying the standard of EN 12193.

**Intisari**—Pencahayaan elektrik dalam gedung olahraga memiliki peran yang sangat penting untuk menyediakan cahaya yang cukup dan sesuai dengan aktivitas olahraga yang terkait, serta mempertahankan kenyamanan visual penghuni ruang. Untuk melakukan hal tersebut, sering kali diperlukan adanya optimisasi desain sistem pencahayaan. Makalah ini memberikan suatu contoh optimisasi desain sistem pencahayaan elektrik pada kasus suatu gedung bulu tangkis di Bandung, mengacu pada standar EN 12193. Sistem pencahayaan elektrik pada gedung tersebut dimodelkan dan disimulasikan dengan perangkat simulasi DIALux evo, yang divalidasi dengan pengukuran pada kondisi aktual. Analisis sensitivitas dengan teknik ‘satu pada setiap saat’ dilakukan untuk mengetahui pengaruh parameter-parameter bangunan dan konfigurasi lumener terhadap parameter kinerja pencahayaan dan kenyamanan visual. Proses optimisasi dilakukan dengan mengubah parameter-parameter masukan yang dominan sehingga parameter-parameter keluaran yang disyaratkan dapat tercapai. Berdasarkan hasil simulasi, didapatkan bahwa lumener yang optimum ialah lumener dengan lampu fluoresen tabung dengan fluks *luminous* 3.244 lm dan daya elektrik 58 W per unit, dipasang pada ketinggian 5 m dari lapangan. *Reflectance* permukaan langit-langit dan lantai yang

optimum berturut-turut ialah 0,80 dan 0,80. Berdasarkan optimisasi parameter-parameter masukan tersebut, iluminansi rata-rata di lapangan dapat ditingkatkan menjadi 336~364 lx, nilai pemerataan dapat ditingkatkan menjadi 0,84~0,89, serta indeks silau UGR dapat diturunkan menjadi 19, sesuai standar EN 12193.

**Kata Kunci**—pencahayaan elektrik, analisis sensitivitas, simulasi, optimisasi, gedung bulu tangkis.

## I. PENDAHULUAN

Pencahayaan elektrik dalam gedung atau ruang olahraga memiliki peran yang sangat penting untuk menyediakan cahaya dengan jumlah yang cukup dan sesuai dengan aktivitas olahraga yang terkait. Selain itu, pencahayaan elektrik juga harus diatur sedemikian rupa sehingga dapat mempertahankan kenyamanan visual penghuni ruang, serta tidak menghasilkan silau yang dapat membahayakan dalam aktivitas olahraga. Untuk dapat memenuhi dua kebutuhan tersebut, diperlukan adanya sistem pencahayaan elektrik yang efektif dan efisien.

Dalam kasus olahraga bulu tangkis, sistem pencahayaan dalam ruang atau gedung olahraga bulu tangkis haruslah memenuhi sejumlah persyaratan yang relevan dengan olahraga tersebut [1]. Secara ringkas, sistem pencahayaan gedung olahraga bulu tangkis harus menghasilkan parameter kinerja pencahayaan yang memadai di area lapangan dan sekitarnya sehingga kok (bulu) dapat terlihat dengan jelas oleh pemain, wasit, serta penonton; baik saat kok berada pada kondisi diam di lantai lapangan maupun saat bergerak pada ketinggian yang bervariasi di atas lapangan [1]. Sistem pencahayaan tersebut juga harus menghasilkan indeks silau yang rendah, untuk tetap menjaga kenyamanan visual pengguna ruang, khususnya para pemain.

Parameter dan kriteria kinerja pencahayaan dan kenyamanan visual pada gedung olahraga bulu tangkis tercantum dalam standar EN 12193: *Sports Facility Lighting* [2], yang dirangkum pada Tabel I.

Secara umum, iluminansi atau tingkat pencahayaan  $E$  [lux (lx)] didefinisikan sebagai rasio fluks cahaya  $d\Phi$  [lumen (lm)] yang diterima suatu permukaan, terhadap luas  $dA$  [m<sup>2</sup>] dari permukaan tersebut [3], sehingga

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad (1)$$

Pada kasus sumber cahaya berbentuk titik (dimensi terbesar sumber jauh lebih kecil daripada jarak sumber ke penerima) dan permukaan penerima juga berbentuk titik, iluminansi dapat dinyatakan dengan Hukum Kuadrat Terbalik [4], yaitu

$$E = \frac{I_{r,c}}{r^2} \cos \alpha \quad (2)$$

<sup>1</sup> Staf pengajar, Kelompok Keahlian Fisika Bangunan, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha 10, Bandung 40132 (telp: 022-2504424; fax: 022-2506281; e-mail: armento@tf.itb.ac.id)

<sup>2,3,4</sup> Mahasiswa, Program Studi Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha 10, Bandung 40132 (telp: 022-2504424; fax: 022-2506281).



Gbr. 1 Lapangan bulu tangkis pada GOR PDAM Tirtawening.

TABEL I  
PARAMETER DAN KRITERIA KINERJA PENCAHAYAAN DAN KENYAMANAN VISUAL PADA GEDUNG BULU TANGKIS [2]

Parameter	Kriteria
Iluminans rata-rata ( $E_{av}$ )	> 300 lx
Rasio pemerataan ( $U$ )	> 0,60
<i>Unified Glare Rating</i> (UGR)	< 22

dengan  $I_{\gamma,C}$  ialah intensitas cahaya sumber [candela (cd)] [5] pada sudut zenit  $\gamma$  dan sudut azimut  $C$ ;  $r$  ialah jarak sumber ke penerima [meter (m)], serta  $\alpha$  ialah sudut antara garis datang cahaya dan normal permukaan penerima.

Pada Tabel I, iluminans rata-rata ( $E_{av}$  [lx]) ialah rata-rata iluminans horizontal ( $E_i$  [lx]) yang diterima pada sejumlah  $n$  titik ukur pada lapangan bulu tangkis yang dievaluasi, sehingga

$$E_{av} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i \quad (3)$$

Rasio pemerataan ( $U$ ) ialah rasio antara iluminans minimum dan iluminans rata-rata pada lapangan bulu tangkis yang dievaluasi, sehingga

$$U = \frac{E_{\min}}{E_{av}} \quad (4)$$

Adapun *Unified Glare Rating* (UGR) adalah indeks silau yang dirumuskan oleh Komisi Pencahayaan Internasional (CIE) sebagai berikut [6].

$$UGR = 8 \log \frac{0,25 \sum_{j=1}^N \frac{L_{s,j}^2 \omega_{s,j}}{L_b P^2}}{L_b} \quad (5)$$

dengan  $L_{s,j}$  ialah luminans sumber silau ke- $j$  [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ],  $\omega_{s,j}$  ialah ukuran sumber silau ke- $j$  [steradian],  $L_b$  ialah luminans latar belakang [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ], serta  $P$  ialah indeks posisi Guth. Luminans dapat ditentukan berdasarkan definisi CIE [7].

Untuk memenuhi kriteria kinerja pencahayaan dan kenyamanan visual sebagaimana tersebut di atas, sering kali diperlukan optimisasi sistem pencahayaan elektrik. Optimisasi dapat dilakukan dengan berbagai cara, antara lain dengan didahului oleh analisis sensitivitas dalam rangka menentukan pengaruh masing-masing parameter desain atau masukan terhadap parameter keluaran, kemudian dilanjutkan simulasi menggunakan perangkat lunak komputasi kinerja bangunan. Metode ini cukup banyak diaplikasikan dalam konteks desain bangunan secara umum, terutama gedung perkantoran, tetapi belum banyak diaplikasikan dalam konteks bangunan dengan fungsi aktivitas khusus seperti gedung olahraga bulu tangkis.

TABEL II  
PARAMETER-PARAMETER LUMINER DAN PERMUKAAN DALAM RUANG YANG DIAMATI

Parameter	Nilai
Fluks cahaya tiap luminer	3.015 lm
Daya elektrik tiap luminer	36 W
Ketinggian luminer	5 m
Sudut angguk luminer	0°
Faktor perawatan luminer	0,50
<i>Reflectance</i> langit-langit	0,05
<i>Reflectance</i> dinding ubin (biru)	0,28
<i>Reflectance</i> dinding ubin (putih)	0,78
<i>Reflectance</i> dinding cat (biru)	0,59
<i>Reflectance</i> lantai (kayu)	0,07

Untuk itu, tujuan dari makalah ini ialah mendemonstrasikan aplikasi analisis sensitivitas sebagai acuan dalam optimisasi sistem pencahayaan elektrik di suatu gedung olahraga bulu tangkis, untuk mengoptimalkan kinerja pencahayaan dan kenyamanan visual yang ada sesuai dengan standar EN 12193 [2].

## II. METODE

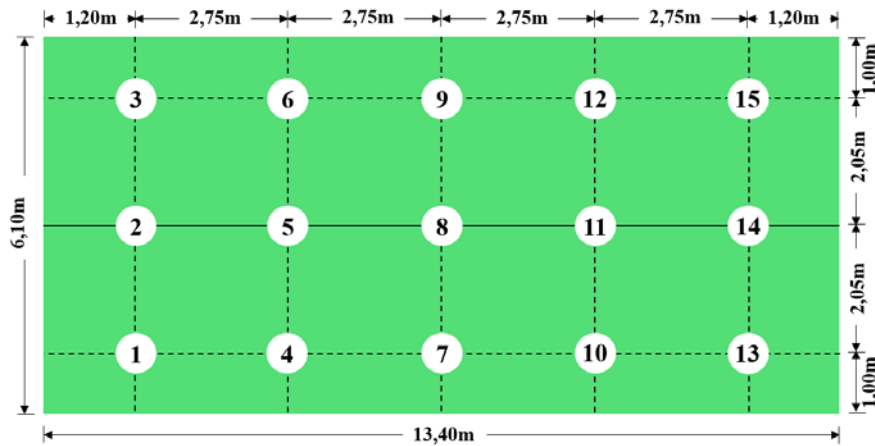
Objek yang dijadikan kasus dalam studi ini ialah Gedung Olahraga (GOR) PDAM Tirtawening, berlokasi di Bandung, Indonesia. Gedung ini memiliki fungsi antara lain sebagai ruang olahraga bulu tangkis, dengan dimensi internal 36 m  $\times$  25 m  $\times$  12,5 m. Terdapat tiga lapangan bulu tangkis di ruang utama gedung ini, seperti ditunjukkan pada Gbr. 1, masing-masing berukuran 6,1 m  $\times$  13,4 m.

Sistem pencahayaan elektrik yang digunakan untuk menerangi lapangan ialah 72 unit luminer Philips TCW060 1 $\times$ 36 W yang diinstal sebagai empat luminer besar (Gbr. 1) yang berisi lampu fluoresen tabung (TL). Setiap luminer dipasang pada ketinggian 5 m dari lantai lapangan, dengan sudut angguk 0° (arah normal luminer sejajar bidang horizontal). Parameter-parameter lain dari luminer serta properti optik dari permukaan dalam ruang yang relevan dirangkum pada Tabel II.

### A. Validasi

Untuk memastikan bahwa hasil optimisasi yang akan dilakukan dapat dipercaya untuk konteks penelitian ini, maka dilakukan validasi terhadap model komputasi yang dibangun dengan perangkat lunak DIALux evo [8], dengan hasil pengukuran kondisi aktual di lapangan. DIALux evo sendiri telah pula divalidasi terhadap kasus-kasus uji CIE 171:2006 [9]–[12]. Adapun evaluasi kondisi aktual dilakukan dengan cara mengukur iluminans horizontal pada ketiga lapangan tersebut, masing-masing sebanyak lima belas titik yang tersebar dalam grid 3  $\times$  5, dengan denah sebagaimana ditunjukkan pada Gbr. 2.

Validasi model dilakukan dengan melakukan uji statistik  $t$  [13] dan  $F$  [14], serta analisis parameter galat persentase mutlak rata-rata (*Mean Absolute Percentage Error*, MAPE) [15] terhadap data pengukuran dan simulasi pada kondisi aktual. Dalam kasus ini, MAPE didefinisikan sebagai (6).



Gbr. 2 Denah tipikal titik ukur iluminans horizontal pada lapangan bulu tangkis yang diamati.

TABEL III  
FLUKS CAHAYA DAN DAYA ELEKTRIK LUMINER YANG DIVARIASIKAN  
DALAM ANALISIS SENSITIVITAS

Fluks cahaya [lm]	Daya elektrik [W]	Contoh nama tipe lumener
1.647	2×18	Philips TCW060
2.275	1×36	Philips TCW060
3.015	1×36	Philips TMS018
3.019	1×49	Philips TCW060
3.244	1×58	Philips TCW060
3.675	2×28	Philips TCW060
4.788	2×35	Philips TCW060

$$MAPE = \frac{100\%}{15} \sum_{i=1}^{15} \left| \frac{E_{akt,i} - E_{sim,i}}{E_{akt,i}} \right| \quad (6)$$

dengan  $E_{akt,i}$  dan  $E_{sim,i}$  [lx] berturut-turut ialah iluminans horizontal aktual (hasil pengukuran) dan hasil simulasi pada titik ukur ke- $i$ . Terdapat lima belas titik ukur pada masing-masing lapangan bulu tangkis.

Hasil simulasi kondisi aktual dianggap valid jika nilai  $p(T \leq t)$  dan  $p(F \leq f)$  yang didapat lebih dari 0,05 (yaitu 95% interval kepercayaan), serta nilai MAPE yang didapat kurang dari 20%.

Sebagai tambahan, nilai indeks UGR pada kondisi aktual dievaluasi pada lapangan 1 dan 2 (lapangan 3 dianggap simetris dengan lapangan 1), dengan menggunakan teknik pengolahan citra foto *High Dynamic Range* (HDR) yang diambil dengan kamera DSLR dan lensa hemisfer (*fisheye*) 180°, kemudian dikalibrasi dengan instrumen luminans meter.

**B. Analisis Sensitivitas dan Optimisasi**

Setelah validasi dilakukan, dengan mengasumsikan model kondisi aktual telah tervalidasi, dilakukan analisis sensitivitas untuk setiap parameter masukan yang dipertimbangkan. Untuk itu, dilakukan beberapa kali simulasi pada rentang parameter masukan yang dimiliki dan kemudian dilihat pengaruhnya terhadap parameter keluaran, menggunakan teknik ‘satu pada setiap saat’ atau *one-at-a-time* (OAT), yaitu mengubah hanya satu parameter masukan pada setiap saat,

TABEL IV  
PARAMETER-PARAMETER LUMINER DAN PERMUKAAN DALAM RUANG  
YANG DIVARIASIKAN DALAM ANALISIS SENSITIVITAS

Parameter	Nilai minimum	Nilai maksimum	Interval
Ketinggian lumener	3 m	6 m	0,5 m
Sudut angguk lumener	0°	20°	5°
Reflectance langit-langit (kayu)	0,10	0,90	0,10
Reflectance dinding ubin (biru)	0,10	0,90	0,10
Reflectance dinding ubin (putih)	0,10	0,90	0,10
Reflectance dinding cat (biru)	0,10	0,90	0,10
Reflectance lantai (kayu)	0,10	0,90	0,10

dengan mempertahankan parameter masukan yang lain pada nilai yang konstan, yaitu nilai referensi pada kondisi dasar (*baseline*), dalam hal ini, kondisi aktual pada saat pengukuran sebagaimana dijelaskan pada subbagian A di atas.

Seluruh parameter masukan kemudian divariasikan nilainya pada rentang tertentu yang telah didefinisikan. Setelah itu, dilakukan standarisasi terhadap setiap parameter masukan  $x$  sebagai berikut.

$$x' = \frac{x - x_{ref}}{x_{max} - x_{min}} \quad (7)$$

dengan  $x'$  ialah parameter masukan terstandarisasi (tak bersatuan), serta  $x_{ref}$ ,  $x_{max}$ , dan  $x_{min}$  berturut-turut merupakan parameter masukan referensi, maksimum, serta minimum. Kemudian, dibuat *plot* yang menghubungkan masing-masing parameter keluaran (misalnya  $y$ ) dengan  $x'$  untuk ketiga lapangan bulu tangkis yang diamati. Dari *plot* yang terbentuk, diamati nilai mutlak dari tiap gradien garis yang terbentuk, yaitu  $|\Delta y / \Delta x'| \approx |dy/dx'|$ . Parameter masukan dengan nilai mutlak gradien yang terbesar dianggap sebagai parameter masukan yang paling berpengaruh terhadap parameter keluaran yang bersangkutan.

TABEL V  
HASIL PENGUKURAN DAN SIMULASI ILUMINANS HORIZONTAL PADA LAPANGAN 1, 2, DAN 3 PADA KONDISI AKTUAL

Titik ukur	Lapangan 1		Lapangan 2		Lapangan 3	
	$E_{akt}$ [lx]	$E_{sim}$ [lx]	$E_{akt}$ [lx]	$E_{sim}$ [lx]	$E_{akt}$ [lx]	$E_{sim}$ [lx]
1	34	36	34	33	34	36
2	34	35	34	35	34	36
3	30	33	33	36	30	33
4	79	88	75	79	79	85
5	68	77	68	72	68	80
6	64	99	78	81	64	94
7	187	134	178	126	187	135
8	136	109	123	97	136	114
9	170	158	152	127	170	163
10	104	87	101	87	104	90
11	87	77	79	72	87	81
12	91	93	94	84	91	96
13	35	36	32	35	35	37
14	33	38	34	35	33	35
15	28	35	32	33	28	38
Mean	78,7	75,7	76,5	68,8	78,7	78,8
SD	51,7	39,7	46,6	33,1	51,7	40,7
$t$	0,59		1,87		0,38	
$F$	1,69		1,98		1,61	
$p(T \leq t)$	0,56		0,08		0,71	
$p(F \leq f)$	0,17		0,11		0,19	
MAPE	15,0%		9,7%		14,3%	

Dalam kasus ini, fluks cahaya dari setiap lumener divariasikan dengan interval yang tidak reguler, antara 1.647 dan 4.788 lm, disesuaikan dengan ketersediaan spesifikasi dari tipe-tipe yang ada pada katalog lumener tersebut (Tabel III). Adapun parameter-parameter lumener serta permukaan dalam ruang divariasikan secara reguler dengan interval yang tetap, sebagaimana ditampilkan pada Tabel IV.

Berdasarkan hasil analisis sensitivitas, ditentukan nilai-nilai optimum dari parameter-parameter masukan pada Tabel III dan Tabel IV, dengan mengamati *plot* antara parameter keluaran dan parameter masukan yang signifikan, sedemikian sehingga target keluaran pada Tabel I sesuai EN 12193 dapat tercapai. Secara matematis, fungsi objektif dari optimisasi ini ialah

$$\max E_{av}, \min U_0, \min UGR \tag{8}$$

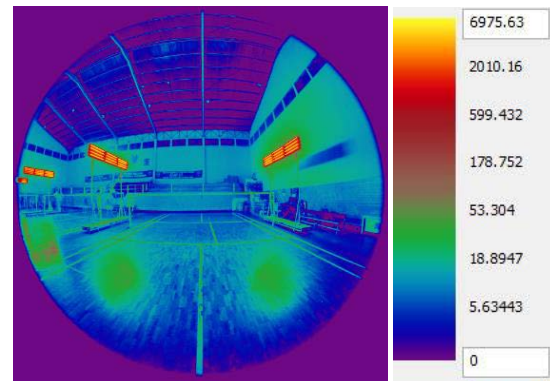
dengan mengacu kepada kendala-kendala yang dirangkum pada Tabel III dan Tabel IV.

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

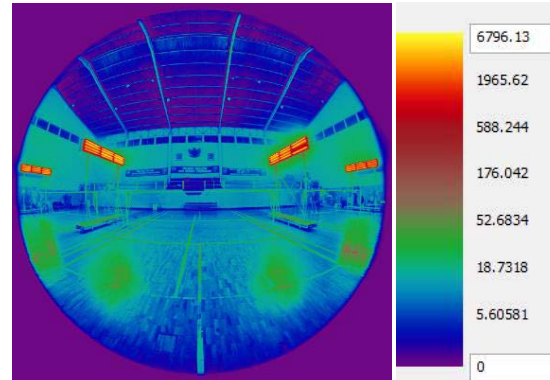
#### A. Validasi

Hasil pengukuran dan simulasi iluminans horizontal ( $E_{akt}$  dan  $E_{sim}$ ) pada ketiga lapangan bulu tangkis beserta variabel uji statistik yang dilakukan ditampilkan pada Tabel V.

Berdasarkan hasil validasi, tampak pada Tabel V bahwa  $p(T \leq t)$  dan  $p(F \leq f)$  untuk ketiga lapangan seluruhnya bernilai



(a)



(b)

Gbr. 3 Distribusi peta luminans yang diolah dari citra HDR pada lapangan, (a) lapangan 1, (b) lapangan 2.

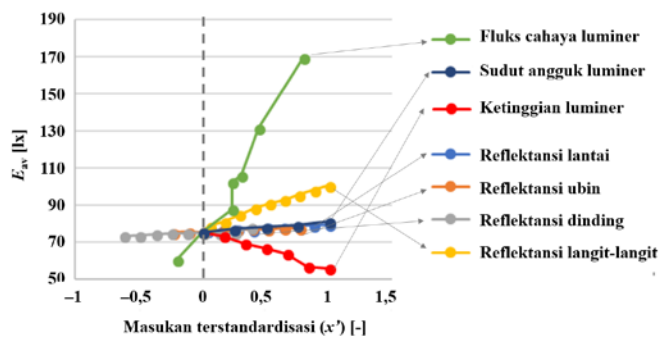
TABEL VI  
INDEKS SILAU UGR YANG TERUKUR PADA KONDISI AKTUAL DI LAPANGAN SERTA PERSEPSI SILAU YANG TIMBUL [4]

Lapangan	UGR	Persepsi silau
1	28,0	<i>Intolerable</i>
2	27,5	<i>Disturbing</i>

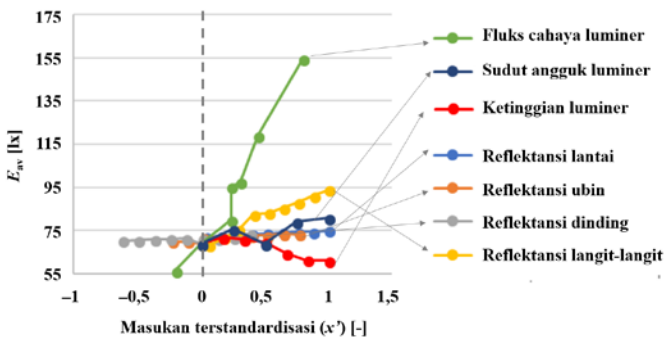
lebih dari 0,05, yang berarti pada tingkat kepercayaan 95%, tidak terdapat perbedaan yang signifikan antara rata-rata atau *mean* hasil pengukuran dan simulasi, serta varians hasil pengukuran dan simulasi. Nilai MAPE yang didapat dari data pengukuran dan simulasi ketiga lapangan juga masih lebih kecil dari 20% (terbesar ialah 15% pada lapangan 1). Dengan demikian, hasil pemodelan dan simulasi kondisi pencahayaan aktual dengan DIALux evo yang telah dibuat dapat dianggap valid dan dapat dilanjutkan ke tahap analisis sensitivitas dan optimisasi.

Hasil pengolahan citra HDR pada lapangan 1 dan 2 pada kondisi aktual ditunjukkan dalam bentuk distribusi peta luminans dalam warna semu (*false colour*) pada Gbr. 3. Adapun nilai indeks silau UGR yang terukur pada kedua lapangan beserta persepsi standar terhadap silau yang berkaitan [6] ditampilkan pada Tabel VI. Tampak bahwa indeks silau UGR pada kondisi aktual di lapangan tersebut cukup tinggi, sehingga berada pada tingkat yang mengganggu (*disturbing*) atau tidak dapat ditoleransi (*intolerable*), serta jauh lebih tinggi dari 22 (Tabel I), sehingga perlu dilakukan modifikasi atau optimisasi pada sistem pencahayaan elektrik di gedung olahraga tersebut.

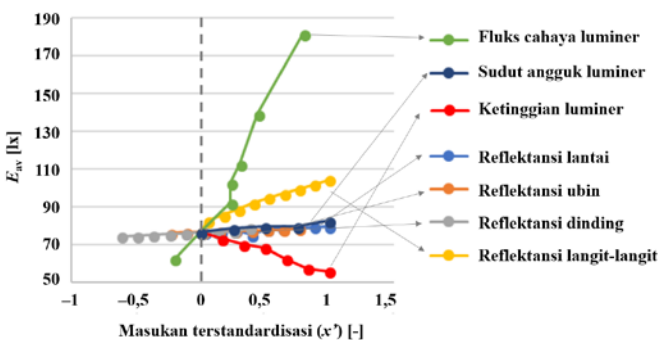




(a)



(b)



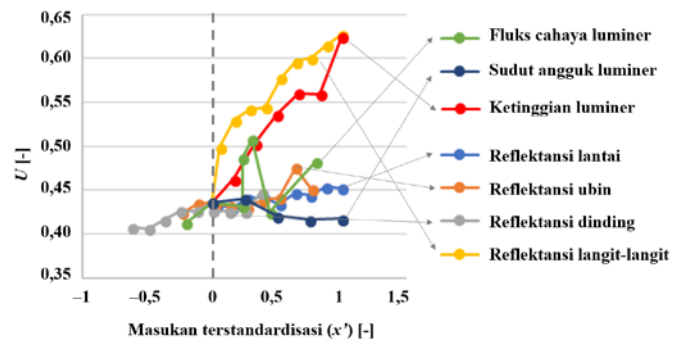
(c)

Gbr. 4 Plot analisis sensitivitas terhadap iluminans rata-rata ( $E_{av}$ ) di lapangan, (a) lapangan 1, (b) lapangan 2, (c) lapangan 3.

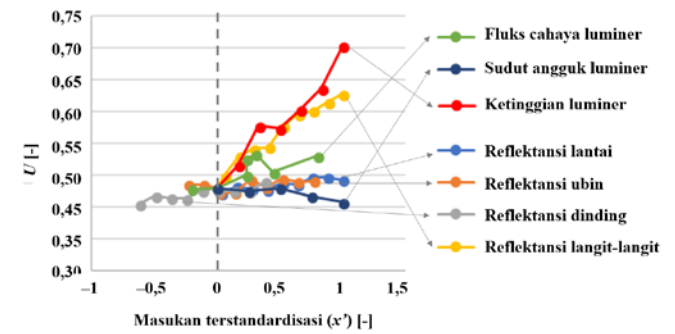
**B. Analisis Sensitivitas**

Setelah validasi dilakukan, selanjutnya dilakukan analisis sensitivitas menggunakan teknik OAT dengan referensi parameter masukan yang sesuai kondisi aktual (Tabel II). Plot analisis sensitivitas dari masing-masing parameter masukan terhadap  $E_{av}$ ,  $U$ , dan UGR di ketiga lapangan ditampilkan berturut-turut pada Gbr. 4 sampai Gbr. 6.

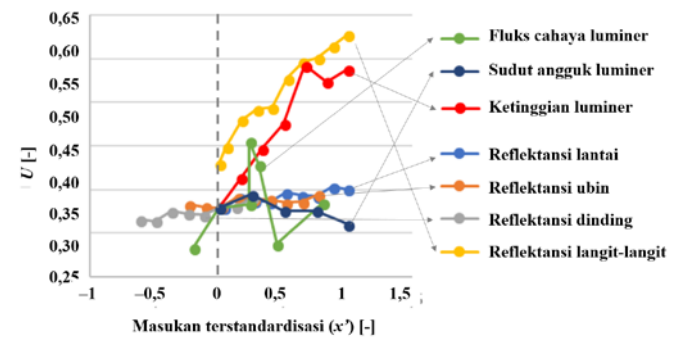
Berdasarkan plot analisis sensitivitas pada Gbr. 4 sampai Gbr. 6, secara umum tampak bahwa parameter masukan yang memiliki nilai mutlak gradien terbesar, dan dengan demikian menjadi parameter masukan yang paling berpengaruh terhadap parameter keluaran (khususnya  $E_{av}$  dan  $U$ ), adalah fluks cahaya ( $\Phi$ ) luminer; *reflectance* ( $\rho$ ) langit-langit; serta ketinggian ( $h$ ) luminer. Secara rinci, tiga parameter masukan yang memiliki pengaruh terbesar berdasarkan nilai gradien ( $\Delta y/\Delta x'$ ) pada setiap parameter keluaran dan di setiap lapangan dirangkum pada Tabel VII.



(a)



(b)

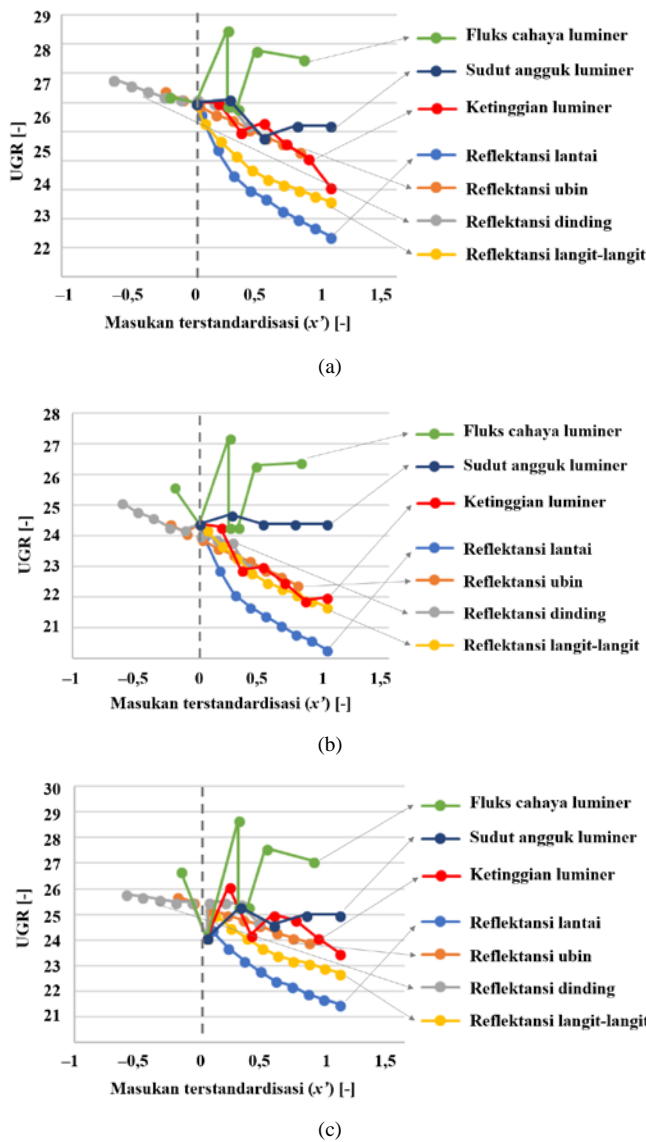


(c)

Gbr. 5 Plot analisis sensitivitas terhadap rasio pemerataan ( $U$ ) di lapangan, (a) lapangan 1, (b) lapangan 2, (c) lapangan 3.

Dapat diamati bahwa pengubahan nilai ketiga parameter masukan tersebut (Gbr. 4) akan menghasilkan perubahan nilai  $E_{av}$  yang signifikan pada lapangan. Berdasarkan target desain yang hendak dicapai, nilai  $E_{av}$  pada lapangan harus mencapai 300 lx sehingga masih diperlukan peningkatan nilai iluminans horizontal pada lapangan. Kondisi ini dapat dicapai dengan melakukan penambahan fluks cahaya luminer dan *reflectance* langit-langit.

Berdasarkan target desain yang hendak dicapai, nilai  $E_{av}$  ini berhubungan pula dengan nilai  $U$  yang akan dicapai ( $> 0,60$ ). Nilai  $U$  yang mendekati 1 menunjukkan nilai persebaran iluminans yang semakin seragam, atau nilai  $E_{av}$  tidak akan jauh berbeda dengan nilai iluminans minimum. Seperti yang dijelaskan sebelumnya, target desain adalah kenaikan nilai iluminans minimum, sehingga  $E_{av}$  harus ditingkatkan juga agar nilai  $U$  yang didapat cukup tinggi. Oleh karena itu, untuk mencapai kondisi ini, diperlukan peningkatan nilai *reflectance* langit-langit dan fluks cahaya luminer.



Gbr. 6 Plot analisis sensitivitas terhadap indeks silau UGR di lapangan, (a) lapangan 1, (b) lapangan 2, (c) lapangan 3.

Pada Gbr. 6 tampak bahwa *reflectance* lantai menjadi parameter masukan yang paling berpengaruh terhadap indeks silau UGR, meskipun *reflectance* lantai relatif tidak berpengaruh pada nilai  $E_{av}$  dan  $U$ . Ketinggian lumener cukup berpengaruh (nomor 2 atau 3) terhadap  $E_{av}$  dan  $U$ , tetapi tidak pada UGR. Adapun *reflectance* ubin dan dinding, serta sudut angguk lumener tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap ketiga parameter keluaran yang diamati.

Meskipun demikian, perlu diperhatikan pada Gbr. 6 bahwa penambahan fluks cahaya lumener berpengaruh pula terhadap kenaikan nilai UGR. Oleh karena itu, nilai *reflectance* langit-langit dan lantai tetap perlu dikendalikan, untuk mencegah kenaikan nilai UGR yang terlalu besar.

C. Optimisasi

Berdasarkan hasil analisis sensitivitas, diamati hubungan  $E_{av}$ ,  $U$ , dan UGR sebagai fungsi dari tiga parameter masukan yang paling berpengaruh (mengacu pada Tabel VII), yaitu

TABEL VII  
PARAMETER MASUKAN DENGAN PENGARUH TERBESAR PADA SETIAP KELUARAN DI SETIAP LAPANGAN BESERTA NILAI GRADIENNYA

Keluaran	Pengaruh	Lapangan 1	Lapangan 2	Lapangan 3
$E_{av}$	#1	$\Phi_{luminer}$ (109,4)	$\Phi_{luminer}$ (97,3)	$\Phi_{luminer}$ (114,8)
	#2	$\rho_{langit-langit}$ (26,4)	$\rho_{langit-langit}$ (26,7)	$\rho_{langit-langit}$ (27,6)
	#3	$h_{luminer}$ (-20,8)	$h_{luminer}$ (-10,0)	$h_{luminer}$ (-22,1)
$U$	#1	$\rho_{langit-langit}$ (0,2)	$h_{luminer}$ (0,3)	$\rho_{langit-langit}$ (0,3)
	#2	$h_{luminer}$ (0,2)	$\rho_{langit-langit}$ (0,2)	$h_{luminer}$ (0,2)
	#3	$\Phi_{luminer}$ (0,07)	$\Phi_{luminer}$ (0,06)	$\Phi_{luminer}$ (0,08)
UGR	#1	$\rho_{lantai}$ (-4,1)	$\rho_{lantai}$ (-4,1)	$\Phi_{luminer}$ (3,2)
	#2	$\rho_{langit-langit}$ (-3,0)	$\rho_{langit-langit}$ (-2,8)	$\rho_{lantai}$ (-2,6)
	#3	$\Phi_{luminer}$ (1,1)	$\Phi_{luminer}$ (2,4)	$\rho_{langit-langit}$ (-1,4)

\*angka dalam kurung menunjukkan nilai gradien ( $\Delta y/\Delta x'$ ) dari parameter yang bersangkutan

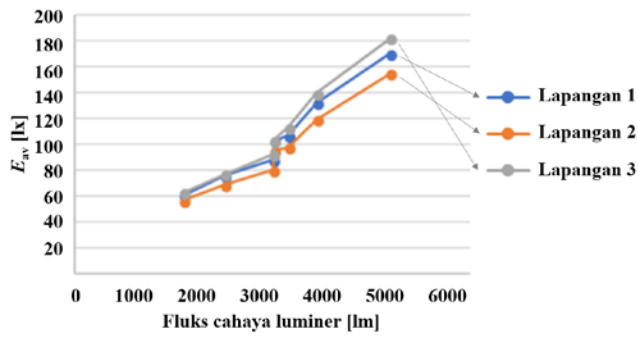
fluks cahaya lumener, *reflectance* langit-langit, dan ketinggian lumener; serta *reflectance* lantai (khusus untuk UGR saja), untuk memilih parameter masukan yang paling optimal. Plot hubungan antara parameter-parameter tersebut ditampilkan pada Gbr. 7 sampai Gbr. 9.

Berdasarkan Gbr. 8(a) dan Gbr. 9(a), tampak bahwa variasi fluks cahaya lumener menimbulkan perubahan nilai  $U$  dan UGR yang berfluktuasi dan tidak memiliki satu pola yang konsisten. Hal ini disebabkan karena masing-masing lumener, kecuali memiliki fluks cahaya dan daya elektrik yang berbeda, juga memiliki bentuk distribusi intensitas cahaya yang berbeda pula. Nilai UGR minimum diperoleh pada simulasi menggunakan tipe lumener 2 (TCW060 1x36W), 4 (TCW060 1x49W), dan 5 (TCW060 1x58W). Sebaliknya, nilai UGR maksimum diperoleh menggunakan tipe lumener 1 (TCW060 2x18W), 3 (TMS018 1x36 W), 6 (TCW060 2x 28W), dan 7 (TCW060 2x35W).

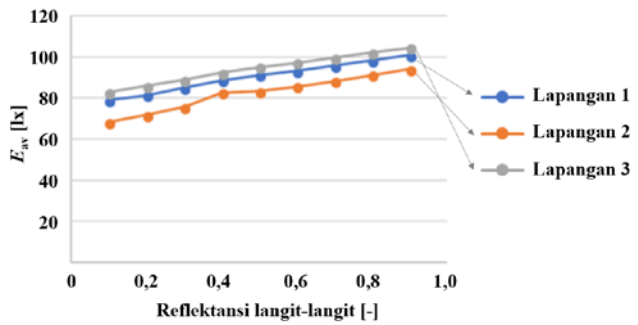
Semakin besar fluks cahaya lumener, semakin tinggi nilai  $E_{av}$  pada lapangan. Penambahan  $E_{av}$  terbesar terjadi pada saat fluks cahaya lumener maksimum, yaitu tipe lumener 7. Pada konfigurasi ini, dengan faktor perawatan lumener sebesar 0,50, dapat diperoleh nilai  $E_{av}$  sebesar 170 lx. Terdapat penambahan nilai  $E_{av}$  sebesar 100 lx jika dibandingkan dengan kondisi awal dengan konfigurasi tipe lumener 2.

Secara umum, perubahan *reflectance* langit-langit dan ketinggian lumener sangat berpengaruh terhadap nilai  $U$ , dibandingkan dengan fluks cahaya lumener (Gbr. 8). Nilai  $U$  terbesar dicapai pada *reflectance* lantai 0,90, dengan peningkatan sebesar 0,10 dari nilai minimum di rentang 0,40~0,50 menjadi 0,50~0,60; serta pada ketinggian lumener 6 m, yaitu terjadi peningkatan sebesar 0,20 dari rentang 0,40~0,47 menjadi 0,60~0,70.

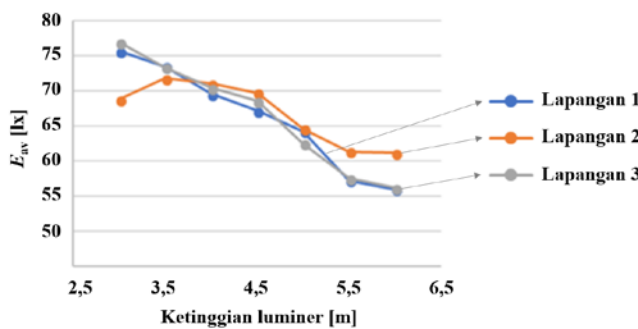
Dari hasil variasi parameter *reflectance* lantai lapangan, terlihat bahwa nilai UGR berkurang seiring bertambahnya



(a)



(b)

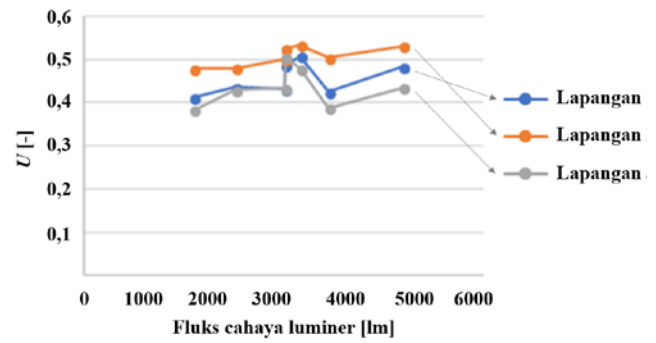


(c)

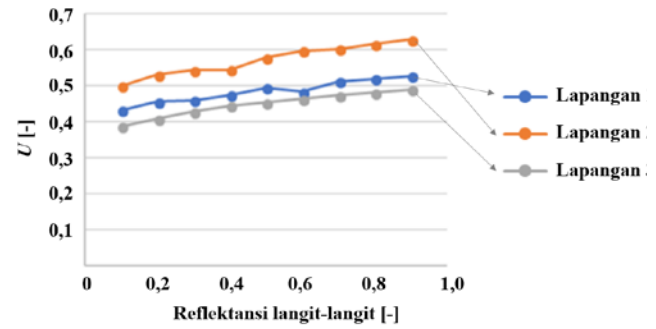
Gbr. 7 Plot hubungan antara iluminans rata-rata ( $E_{av}$ ) dan tiga parameter masukan paling berpengaruh, (a) fluks cahaya luminer, (b) *reflectance* langit-langit, (c) ketinggian luminer.

nilai *reflectance* lantai. Nilai pengurangan terbesar UGR terjadi pada *reflectance* lantai 0,90 sebesar lima skala dengan nilai maksimumnya berada pada rentang 24~26 dan nilai minimumnya berada pada rentang 20~22. Jika dibandingkan dengan hasil pengukuran silau yang diperoleh melalui citra HDR (Gbr. 3), tampak bahwa silau juga bersumber dari cahaya yang dipantulkan oleh lantai lapangan. Berdasarkan kondisi ini, jika *reflectance* lantai diperbesar, akan diperoleh luas sumber silau yang semakin besar (berupa pantulan pada lantai). Jika dikombinasikan dengan cahaya langsung dari luminer, kontras luminans yang terukur dapat menjadi lebih kecil sehingga indeks silau UGR justru menurun.

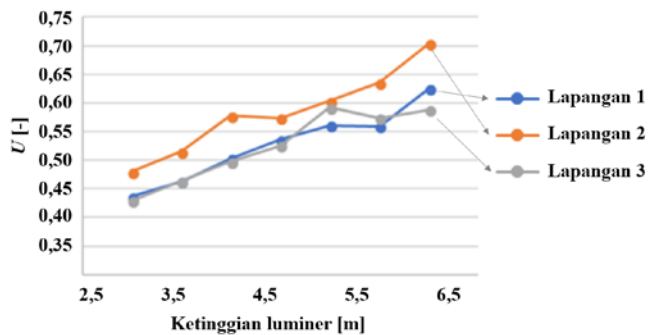
Dari hasil variasi parameter ketinggian luminer, terlihat bahwa nilai  $E_{av}$  menurun seiring bertambahnya ketinggian luminer. Nilai pengurangan terbesar  $E_{av}$  terjadi pada ketinggian luminer 6 m, sebesar 20 lx pada lapangan 1 dan 3



(a)



(b)

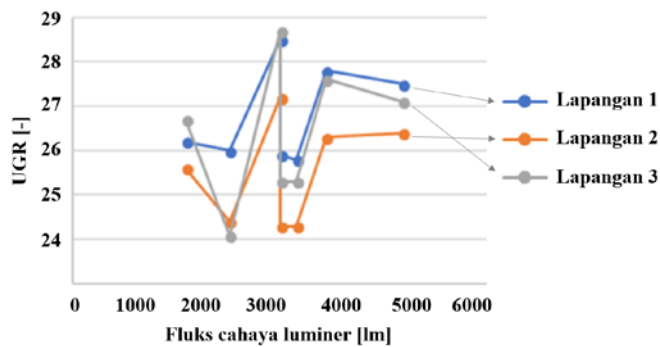


(c)

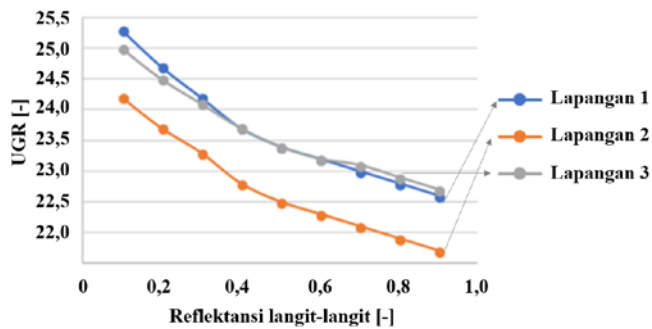
Gbr. 8 Plot hubungan antara rasio pemerataan ( $U$ ) dan tiga parameter masukan paling berpengaruh, (a) fluks cahaya luminer, (b) *reflectance* langit-langit, (c) ketinggian luminer.

dengan nilai minimum dan maksimumnya sebesar 55 dan 75 lx. Pada lapangan 2, penurunan  $E_{av}$  hanya sebesar 5 lx, minimum 60 lx dan maksimum 65 lx. Adapun nilai  $U$  bertambah dengan perubahan ketinggian luminer. Nilai  $U$  terbesar dicapai pada ketinggian luminer 6 m dengan peningkatan dari rentang 0,40~0,47 menjadi 0,60~0,70.

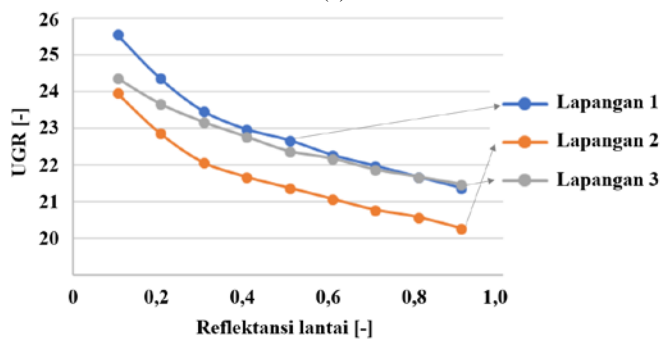
Dengan mempertimbangkan hasil analisis sensitivitas yang telah dilakukan, nilai-nilai parameter masukan yang memiliki sensitivitas tinggi direkomendasikan untuk diubah menjadi nilai optimumnya, sedangkan nilai-nilai parameter masukan yang lain dipertahankan tetap. Nilai-nilai parameter masukan setelah dioptimisasi tersebut dirangkum pada Tabel VIII. Nilai yang dicetak tebal adalah nilai yang dioptimalkan berdasarkan analisis sensitivitas. Adapun nilai-nilai parameter keluaran berupa kinerja pencahayaan dan kenyamanan visual yang didapat setelah optimisasi dirangkum pada Tabel IX.



(a)



(b)



(c)

Gbr. 9 Plot hubungan antara indeks silau UGR dan tiga parameter masukan paling berpengaruh, (a) fluks cahaya lumener, (b) *reflectance* langit-langit, (c) *reflectance* lantai.

Berdasarkan pemeriksaan pada katalog yang tersedia, untuk lumener tipe Philips TCW060 1×58W sebagaimana yang disimulasikan, diperlukan sebanyak delapan belas unit lumener dengan konfigurasi 1×4 untuk setiap unit, yang diperkirakan mampu menghasilkan parameter-parameter keluaran yang ditargetkan.

Plot kontur *isolux* pada denah ketiga lapangan berdasarkan hasil simulasi setelah optimisasi ditampilkan pada Gbr. 10.

Berdasarkan Tabel IX dan Gbr. 10, secara umum tampak bahwa nilai iluminans horizontal di ketiga lapangan telah memenuhi persyaratan minimum  $E_{av} > 300$  lx dengan rasio pemerataan  $U$  sebesar 0,85–0,89, yang jauh lebih tinggi dari persyaratan minimum sebesar 0,60 [2]. Berdasarkan simulasi, UGR pada ketiga lapangan didapatkan sebesar 19, lebih rendah dari persyaratan maksimum sebesar 22 [6].

Secara umum, penggunaan simulasi dalam hal ini dapat menjadi metode alternatif yang lebih efisien dalam

TABEL VIII  
PARAMETER-PARAMETER LUMINER DAN PERMUKAAN DALAM RUANG SETELAH OPTIMISASI

Parameter	Nilai
Tipe lumener	TCW060 1×58W
Fluks cahaya lumener	3.244 lm
Ketinggian lumener	5 m
Sudut angguk lumener	0°
<i>Reflectance</i> langit-langit (kayu)	0,80
<i>Reflectance</i> dinding ubin (biru)	0,40
<i>Reflectance</i> dinding ubin (putih)	0,78
<i>Reflectance</i> dinding cat (biru)	0,65
<i>Reflectance</i> lantai (kayu)	0,80

TABEL IX  
HASIL OPTIMISASI ILUMINANS HORIZONTAL PADA LAPANGAN 1, 2, DAN 3

Titik ukur	Lapangan 1	Lapangan 2	Lapangan 3
	$E_{sim}$ [lx]	$E_{sim}$ [lx]	$E_{sim}$ [lx]
1	340	333	319
2	328	329	303
3	325	342	286
4	404	379	376
5	390	376	352
6	398	391	344
7	430	396	387
8	428	387	365
9	439	403	350
10	399	374	370
11	390	369	347
12	387	388	331
13	344	333	326
14	331	325	305
15	318	337	285
$E_{av}$ [lx]	337	364	336
$U$ [-]	0,84	0,89	0,85
UGR [-]	19,1	19,0	19,1

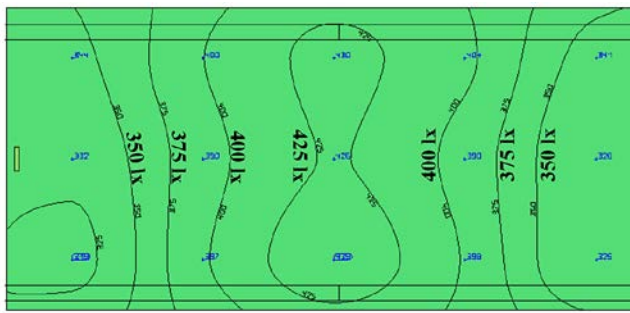
mengoptimalkan sistem pencahayaan lapangan bulu tangkis, dibandingkan dengan metode coba-coba [16], [17]. Dengan demikian, analisis sensitivitas dan optimisasi dengan simulasi untuk sistem pencahayaan elektrik pada kasus gedung olah raga yang diamati ini telah berhasil dijalankan dengan efektif. Seluruh parameter keluaran berupa kinerja pencahayaan dan kenyamanan visual pada ketiga lapangan telah dioptimalkan sehingga seluruhnya dapat memenuhi persyaratan dan kriteria yang tercantum dalam standar EN 12193 [2].

#### IV. KESIMPULAN

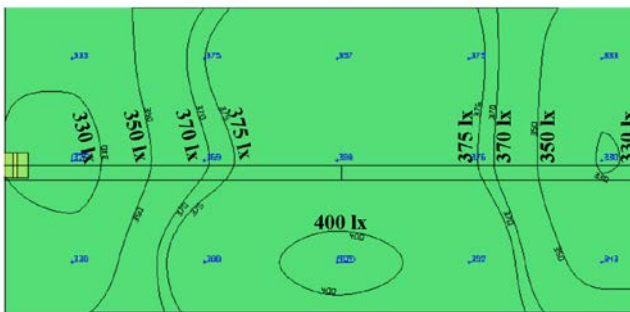
Aplikasi analisis sensitivitas dalam optimisasi sistem pencahayaan elektrik di suatu gedung olahraga bulu tangkis telah didemonstrasikan dalam makalah ini, untuk kasus tiga buah lapangan bulu tangkis dalam GOR PDAM Tirtawening, Bandung. Persyaratan dan kriteria yang digunakan dalam optimisasi diambil sesuai dengan standar EN 12193.

Berdasarkan analisis sensitivitas, secara umum parameter masukan yang memiliki nilai mutlak gradien terbesar, dan

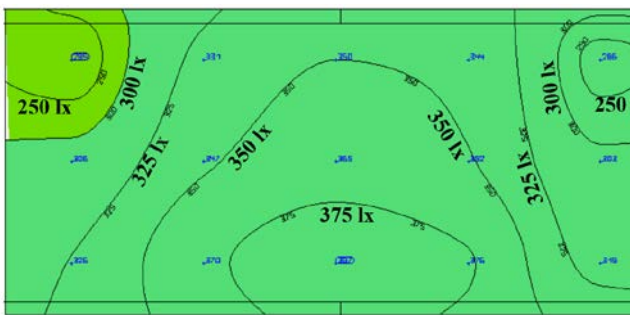




(a)



(b)



(c)

Gbr. 10 Plot kontur *isolux* pada denah lapangan berdasarkan hasil simulasi setelah optimisasi, (a) lapangan 1, (b) lapangan 2, (c) lapangan 3.

dengan demikian paling memengaruhi parameter keluaran, khususnya iluminansi horizontal rata-rata pada lapangan ( $E_{av}$ ) dan rasio pemerataan ( $U$ ) adalah fluks cahaya lumener, *reflectance* langit-langit, serta ketinggian lumener. Parameter *reflectance* lantai juga ditemukan signifikan memengaruhi indeks silau UGR.

Nilai-nilai parameter masukan yang memiliki sensitivitas tinggi direkomendasikan untuk diubah menjadi nilai optimumnya, sedangkan nilai-nilai parameter masukan yang lain dipertahankan tetap. Berdasarkan hasil simulasi pada perangkat lunak DIALux evo yang telah divalidasi dengan hasil pengukuran pada kondisi aktual, didapatkan bahwa lumener yang optimal untuk digunakan dalam sistem pencahayaan elektrik di gedung olahraga bulu tangkis tersebut ialah lumener yang menggunakan lampu fluoresen tabung (TL), dengan spesifikasi fluks *luminous* 3.244 lm dan daya elektrik 58 W per unit, misalnya dengan tipe Philips TCW060 1×58W sebanyak delapan belas unit lumener dengan konfigurasi 1×4 untuk tiap unit, dipasang pada ketinggian 5 m

dari lapangan. Adapun *reflectance* permukaan langit-langit dan lantai yang optimum berturut-turut didapatkan sebesar 0,80 dan 0,80.

Berdasarkan optimisasi parameter-parameter masukan tersebut, kinerja pencahayaan dan kenyamanan visual di ketiga lapangan bulu tangkis GOR PDAM Tirtawening dapat ditingkatkan sehingga memenuhi standar EN 12193. Nilai  $E_{av}$  di ketiga lapangan dapat ditingkatkan menjadi 336~364 lx, nilai  $U$  dapat ditingkatkan menjadi 0,84~0,89, serta indeks silau UGR dapat diturunkan menjadi 19.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada pihak pengelola GOR PDAM Tirtawening, Bandung, atas kesediaan memberikan izin pengambilan data untuk keperluan penelitian ini.

#### REFERENSI

- [1] Sport England, *Badminton Field Design Guidance Note*, London, UK: Sport England and Badminton England, 2011.
- [2] British Standard Institution (BSI), *BS EN 12193:2007: Sports Facility Lighting*, London, UK: BSI, 2007.
- [3] (2014) 17-550 Illuminance (at a point of a surface), [Online], <http://eiv.cie.co.at/term/550>, tanggal akses: 2-Feb-2019.
- [4] (2014) 17-912 Photometric distance law, [Online], <http://eiv.cie.co.at/term/912>, tanggal akses: 7-Feb-2019.
- [5] (2014) 17-739 Luminous intensity (of a source, in a given direction), [Online], <http://eiv.cie.co.at/term/739>, tanggal akses: 8-Feb-2019.
- [6] Commission Internationale de l'Éclairage (CIE), *CIE 117-1995: Discomfort Glare in Interior Lighting*, Vienna, Austria: CIE, 1995.
- [7] (2014) 17-711 Luminance (in a given direction, at a given point of a real or imaginary surface). [Online], <http://eiv.cie.co.at/term/711>, tanggal akses: 15-Feb-2019.
- [8] (2019) DIALux evo, [Online], <https://www.dial.de/en/dialux-desktop/download/>, tanggal akses: 3-Mar-2019.
- [9] F. Maamari, M. Fontoynt, A. Tsangrassoulis, C. Marty, E. Kopylov, dan G. Sytnik, "Reliable Datasets for Lighting Programs Validation – Benchmark Results," *Solar Energy*, Vol. 79, No. 2, hal. 213–215, 2005.
- [10] F. Maamari, M. Fontoynt, dan N. Adra, "Application of the CIE Test Cases to Assess the Accuracy of Lighting Computer Programs," *Energy and Buildings*, Vol. 38, No. 7, hal. 869–877, 2006.
- [11] Commission Internationale de l'Éclairage (CIE), *CIE 171-2006: Test Cases to Assess the Accuracy of Lighting Computer Programs*, Vienna, Austria: CIE, 2006.
- [12] R.A. Mangkuto, "Validation of DIALux 4.12 and DIALux evo 4.1 Against the Analytical Test Cases of CIE 171:2006," *LEUKOS*, Vol. 12, No. 3, hal. 139–150, 2016.
- [13] Student, "The Probable Error of a Mean", *Biometrika*, Vol. 6, No. 1, hal. 1–25, 1908.
- [14] G.E.P. Box, "Non-normality and Tests on Variances," *Biometrika*, Vol. 40, No. 3/4, hal. 318–335, 1953.
- [15] A. Myttenaere, B. Golden, B. Le Grand, dan F. Rossi, "Mean Absolute Percentage Error for Regression Models," *Neurocomputing*, Vol. 192, hal. 38–48, 2016.
- [16] X.-H. Lee, J.-T. Yang, W.-T. Chien, J.-H. Chang, Y.-C. Lo, C.-C. Lin, dan C.-C. Sun, "High-performance LED Luminaire for Sports Hall," *Proceedings Volume 9578, Current Developments in Lens Design and Optical Engineering XVI*, 2015 hal. 95780Q.
- [17] X.-H. Lee, J.-T. Yang, J.-H. Chang, W.-T. Chien, Y.-C. Lo, C.-C. Lin, dan C.-C. Sun, "An LED-based Luminaire for Badminton Court Illumination," *Lighting Research and Technology*, Vol. 49, No. 3, hal. 396–406, 2017.