

Optimasi Perletakan Lumener Untuk Pencahayaan Ruang Industri Dengan Menggunakan Algoritma Genetik

Rizki A. Mangkuto¹ dan Mohd. Akbar Anthony Siregar¹

ABSTRACT: Industrial halls have a relatively higher requirement for lighting, which require larger amount of luminaires compared to general office spaces, so that the luminaires layout should be optimally designed. In this study, optimisation method using genetic algorithm (GA) was applied to optimise the layout of 250 LED-based luminaires for general lighting in an industrial hall of $100\text{ m} \times 40\text{ m} \times 6\text{ m}$, considering the average illuminance (E_{av}) and uniformity (U_0) on the workplane, with several constraints in the input variables d_x , d_y , and d_h . Optimisations with GA that were run 20 times yield the most optimum value, obtained for d_x , d_y , d_h combination of 3.80 m, 3.55 m, and 1 m; whereas the second-most optimum value was obtained for d_x , d_y , d_h of 3.80 m, 3.49 m, and 0.96 m. The first and second combination respectively yields E_{av} of 568.1 lx and 566.6 lx, and U_0 of 0.97 and 0.96.

KEYWORDS: Optimisation, luminaire, lighting, industrial hall, genetic algorithm

ABSTRAK: Ruang industri memiliki kebutuhan pencahayaan yang relatif tinggi dibandingkan dengan ruang kantor pada umumnya serta memerlukan jumlah lumener yang cukup banyak, sehingga perletakan lumener pada ruang tersebut perlu didesain secara optimum. Dalam studi ini metode optimisasi menggunakan algoritma genetik (GA) diterapkan untuk mengoptimisasi perletakan 250 lumener berbasis LED untuk pencahayaan suatu ruang industri berukuran $100\text{ m} \times 40\text{ m} \times 6\text{ m}$, dengan memperhatikan parameter iluminansi rata-rata (E_{av}) serta pemerataan (U_0) pada bidang kerja, dengan sejumlah kendala pada variabel masukan jarak d_x , d_y , dan d_h . Hasil optimisasi menggunakan GA sebanyak 20 kali menunjukkan bahwa nilai paling optimum diperoleh dari kombinasi d_x , d_y , d_h sebesar 3,80 m, 3,55 m, dan 1 m; adapun nilai kedua optimum diperoleh dari kombinasi d_x , d_y , d_h sebesar 3,80 m, 3,49 m, dan 0,96 m. Kombinasi pertama dan kedua menghasilkan nilai E_{av} sebesar 568,1 lx dan 566,6 lx, serta U_0 0,97 dan 0,96.

KATA KUNCI: Optimisasi, lumener, pencahayaan, ruang industri, algoritma genetik

PENDAHULUAN

Pertumbuhan teknologi di bidang lampu dan lumener berlangsung semakin pesat dalam beberapa dasawarsa ini. Berkembangnya teknologi sistem pencahayaan berbasis *light-emitting diode* (LED) pada saat ini membuka peluang untuk meningkatkan efisiensi energi serta umur pemakaian. Dibandingkan dengan sumber cahaya konvensional seperti lampu pijar dan lampu pendar/fluoresen, lampu dan lumener berbasis LED memiliki keunggulan dalam efisiensi energi dan prediksi umur pemakaian. Diversifikasi fungsi LED sebagai sumber cahaya pada lumener untuk pencahayaan umum, telah banyak dijumpai pada aplikasi dalam dan luar ruang, salah satunya untuk pencahayaan pada ruang industri yang berukuran relatif besar.

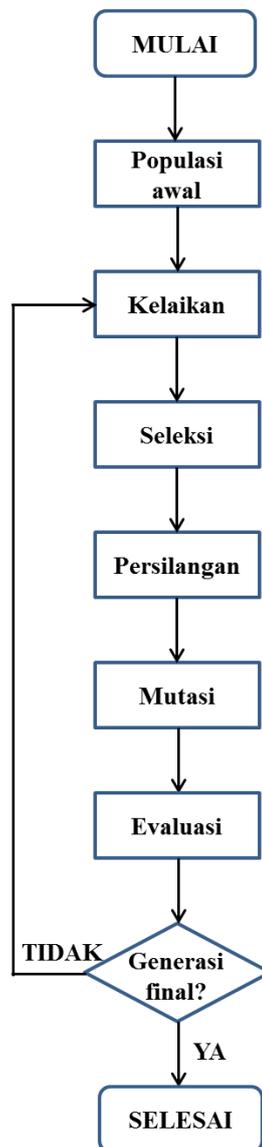
Ruang industri, yang umum ditemui berupa area manufaktur, perakitan, serta proses pada berbagai pabrik, secara umum memiliki kebutuhan pencahayaan yang relatif tinggi dibandingkan dengan ruang kantor pada umumnya. Kebutuhan pencahayaan ini lazimnya dinyatakan dengan iluminansi atau tingkat pencahayaan rata-rata (E_{av}) di bidang kerja (ketinggian 0,75 m dari lantai) dengan kriteria minimum sekitar 500 lx, tampak atau temperatur warna (CCT) sumber cahaya yang netral (3300 ~ 5300 K) atau sejuk ($> 5300\text{ K}$), serta indeks kesesuaian warna (CRI R_a) yang tinggi (> 80) [1]. Selain itu, terdapat pula kebutuhan untuk mendapatkan tingkat pencahayaan yang relatif merata di seluruh bidang kerja, umumnya dinyatakan dengan pemerataan (U_0) sebesar minimum 0,7 [2].

Berdasarkan sejumlah persyaratan di atas, parameter CCT dan CRI tergantung sepenuhnya dari jenis sumber cahaya yang digunakan, sehingga kriteria yang ada dapat dipenuhi sepanjang sumber cahaya yang dipilih memiliki spesifikasi yang memenuhi syarat. Adapun iluminansi rata-rata dan pemerataan sangat tergantung pada perletakan lumener pada ruang yang bersangkutan, sehingga memerlukan desain dan perencanaan yang tepat. Perletakan lumener yang tidak tepat selain akan mengakibatkan tidak tercapainya kriteria iluminansi rata-rata dan pemerataan minimum, juga akan mengakibatkan pemborosan energi listrik karena pemasangan lumener yang sesungguhnya tidak diperlukan. Kemudian, karena ruang industri pada umumnya berukuran besar, maka diperlukan jumlah lumener yang cukup banyak, sehingga kebutuhan akan desain perletakan lumener yang optimum menjadi sangat tinggi. Secara matematis, permasalahan tersebut dapat dipecahkan dengan metode atau teknik optimisasi.

Untuk memecahkan permasalahan optimisasi secara efisien dan akurat, konsep algoritma genetik (GA) saat ini menjadi metode yang paling umum digunakan. Dalam ilmu komputer dan matematika, GA adalah suatu metode optimisasi yang diilhami dari proses seleksi alamiah, dalam rangka mencari solusi yang berkualitas tinggi dan dapat memenuhi kebutuhan atau objektif dari optimisasi. Konsep GA menggunakan operator-operator yang umum ditemui pada proses evolusi biologis, yang antara lain mencakup mutasi, seleksi, dan persilangan. Secara umum, setiap kandidat solusi dari masalah optimisasi dianggap memiliki sejumlah properti (kromosom atau genotip) yang terdiri dari sejumlah *string* biner (0 dan 1) yang dapat dimutasi atau dipertukarkan. Proses optimisasi dilakukan dengan mengikuti proses evolusi, di mana sekumpulan populasi secara acak dalam satu

¹ Program Studi Teknik Fisika Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Bandung Jawa Barat

proses iterasi disebut sebagai “generasi”. Pada setiap generasi, “kelaikan” (*fitness*) dari setiap individu dievaluasi dengan cara membandingkan dengan fungsi objektif optimisasi tersebut. Individu-individu dengan kelaikan yang lebih tinggi (lebih sesuai dengan objektif) kemudian dipilih secara stokastik, kemudian propertinya direkombinasi atau dimutasi secara acak, untuk menghasilkan generasi yang baru. Proses evaluasi kelaikan dan mutasi properti dilakukan lagi pada generasi yang baru tersebut, sedemikian sehingga muncul generasi berikutnya yang lebih laik, dan begitu seterusnya sampai didapatkan individu (solusi) yang sangat laik dan sesuai dengan objektif yang dikehendaki. Gambar 1 menampilkan diagram alir dari proses optimisasi dengan metode GA.



■ **Gambar 1.** Diagram alir dari proses optimisasi dengan konsep GA

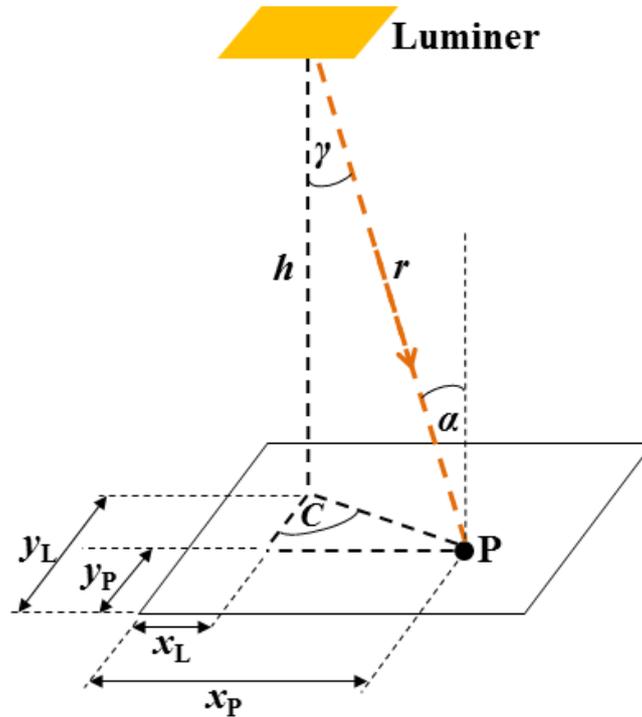
Dalam konteks teknik pencahayaan, konsep GA umumnya digunakan untuk mengoptimisasi perletakan lumener pada suatu konfigurasi ruang [3-5] serta untuk mengoptimisasi desain armatur atau sistem optik suatu lumener [6,7]. Dalam mengoptimisasi desain dengan GA, proses optimisasi dapat berjalan dalam waktu yang relatif singkat, dengan hasil yang memenuhi objektif dan didapatkan secara sistematis. Dengan demikian, dalam studi ini konsep GA digunakan dengan tujuan mengoptimisasi desain perletakan lumener pada suatu ruang industri yang telah didefinisikan, dengan memperhatikan parameter iluminansi rata-rata serta pemerataan pada bidang kerja.

TINJAUAN KONSEP

Secara konsep, nilai iluminansi di suatu titik ukur P ($E_p [lx]$) akibat suatu sumber cahaya berbentuk titik dapat ditentukan sebagai berikut:

$$E_p = \frac{I_{\gamma,C}}{r^2} \cos \alpha \dots\dots\dots(1)$$

dengan $I_{\gamma,C}$ [candela (cd)] ialah intensitas cahaya sumber pada sudut γ [°] yang terbentuk antara normal luminer dan garis hubung titik pusat luminer dengan titik ukur, sudut C [°] yang terbentuk antara sumbu lateral luminer dan garis hubung titik pusat luminer dengan titik ukur; r [m] ialah jarak antara titik ukur dan sumber; serta α [°] ialah sudut yang terbentuk antara normal bidang titik ukur dan garis hubung titik pusat luminer dengan titik ukur. Suatu sumber cahaya seperti luminer dapat dianggap sebagai sumber titik apabila jarak r cukup besar, yaitu sekurang-kurangnya lima kali dimensi terbesar dari luminer.



■ **Gambar 2.** Ilustrasi suatu luminer yang terletak pada koordinat (x_L, y_L) dan titik ukur P yang terletak pada koordinat (x_P, y_P) , di mana bidang luminer dan bidang titik ukur P sejajar dengan jarak tegak lurus h

Jika luminer dianggap terletak pada koordinat (x_L, y_L) dan titik ukur P terletak pada koordinat (x_P, y_P) , di mana kedua titik koordinat tersebut masing-masing berada pada bidang yang saling sejajar dengan jarak tegak lurus h seperti diilustrasikan pada Gambar 2, maka iluminansi di titik ukur P dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$E_p = \frac{I_{\gamma,C}}{h^2} \cos^3 \gamma \dots\dots\dots(2)$$

dengan mengetahui bahwa:

$$\gamma = \arctan \frac{\sqrt{(x_P - x_L)^2 + (y_L - y_P)^2}}{h} \dots\dots\dots(3)$$

$$C = \arctan \left| \frac{x_P - x_L}{y_P - y_L} \right| \dots\dots\dots(4)$$

mengacu pada Gambar 2.

Nilai $I_{\gamma,C}$ pada persamaan (1) dan (2) pada umumnya ditentukan dari diagram atau tabel distribusi intensitas cahaya luminer yang bersangkutan. Diagram atau tabel tersebut menampilkan data pengukuran luminer di dalam ruang gelap (tanpa cahaya pantul) dengan menggunakan instrumen goniometer, yang prosedurnya telah ditentukan di dalam standar CIE 121:1996 [8]. Nilai-nilai $I_{\gamma,C}$ umumnya diukur untuk rentang γ sebesar 0 ~ 90° dengan interval 1°, 2°, atau 5°, serta C sebesar 0 ~ 315° dengan interval 45°. Untuk luminer dengan tampak

depan berbentuk persegi panjang, umumnya nilai-nilai intensitas pada $C = 0^\circ$ akan sama dengan nilai-nilainya pada $C = 180^\circ$, $C = 45^\circ$ sama dengan $C = 225^\circ$, $C = 90^\circ$ sama dengan $C = 270^\circ$, serta $C = 135^\circ$ sama dengan $C = 315^\circ$.

Karena keterbatasan data pengukuran, seringkali nilai intensitas pada sudut γ dan/atau C yang tidak tertera harus diinterpolasi dari beberapa nilai intensitas pada sudut γ dan/atau C yang terdekat. Sebagai ilustrasi, anggaplah kita hendak mengetahui nilai I_{γ_j, C_k} , dengan $\gamma_1 < \gamma_j < \gamma_2$ dan $C_1 < C_k < C_2$, serta $\gamma_1, \gamma_2, C_1, C_2$ ialah sudut-sudut di mana dilakukan pengukuran nilai intensitas. Terlebih dahulu nilai I_{γ_j, C_1} dan I_{γ_j, C_2} dapat ditentukan sebagai berikut:

$$I_{\gamma_j, C_1} = \frac{I_{\gamma_2, C_1} - I_{\gamma_1, C_1}}{\gamma_2 - \gamma_1} \gamma_j + I_{\gamma_1, C_1} - \frac{I_{\gamma_2, C_1} - I_{\gamma_1, C_1}}{\gamma_2 - \gamma_1} \gamma_1 = I_{\gamma_1, C_1} + \frac{\gamma_j - \gamma_1}{\gamma_2 - \gamma_1} (I_{\gamma_2, C_1} - I_{\gamma_1, C_1}) \dots\dots\dots (5)$$

$$I_{\gamma_j, C_2} = \frac{I_{\gamma_2, C_2} - I_{\gamma_1, C_2}}{\gamma_2 - \gamma_1} \gamma_j + I_{\gamma_1, C_2} - \frac{I_{\gamma_2, C_2} - I_{\gamma_1, C_2}}{\gamma_2 - \gamma_1} \gamma_1 = I_{\gamma_1, C_2} + \frac{\gamma_j - \gamma_1}{\gamma_2 - \gamma_1} (I_{\gamma_2, C_2} - I_{\gamma_1, C_2}) \dots\dots\dots (6)$$

Nilai I_{γ_j, C_k} kemudian dapat ditentukan dengan menginterpolasi nilai I_{γ_j} pada C_1 dan C_2 :

$$I_{\gamma_j, C_k} = \frac{I_{\gamma_j, C_2} - I_{\gamma_j, C_1}}{C_2 - C_1} C_k + I_{\gamma_j, C_1} - \frac{I_{\gamma_j, C_2} - I_{\gamma_j, C_1}}{C_2 - C_1} C_1 = I_{\gamma_j, C_1} + \frac{C_k - C_1}{C_2 - C_1} (I_{\gamma_j, C_2} - I_{\gamma_j, C_1}) \dots\dots\dots (7)$$

Apabila terdapat lebih dari satu lumener yang masing-masing dapat dianggap sebagai sumber titik, maka total iluminansi di titik ukur P ialah jumlah dari kontribusi iluminansi tiap-tiap lumener pada titik tersebut. Apabila pada bidang penerima terdapat lebih dari satu titik ukur, maka kinerja pencahayaan di bidang tersebut umumnya dinyatakan dengan iluminansi rata-rata (E_{av}) dari nilai iluminansi di seluruh titik ukur, serta pemerataan (U_0), yaitu perbandingan antara iluminansi minimum (E_{min}) dan iluminansi rata-rata di seluruh titik ukur tersebut.

Secara matematis, iluminansi rata-rata dan pemerataan dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$E_{av} = \sum_{i=1}^n E_i \dots\dots\dots (8)$$

$$U_0 = \frac{E_{min}}{E_{av}} \dots\dots\dots (9)$$

Untuk menyederhanakan perhitungan dalam desain, seringkali iluminansi rata-rata pada bidang kerja di suatu ruang dapat diperkirakan dengan menggunakan metode lumen sebagai berikut:

$$E_{av} = \frac{N\Phi_L K_p K_d}{A} \dots\dots\dots (10)$$

dengan N ialah banyaknya lumener yang masing-masing memiliki fluks (keluaran) cahaya sebesar Φ_L [lumen (lm)], K_p ialah koefisien penggunaan yang tergantung dari distribusi intensitas cahaya lumener, ukuran, serta reflektansi permukaan dalam ruang, K_d ialah koefisien depresiasi yang tergantung dari tingkat kebersihan ruang (umumnya diambil sebesar 0,8), serta A ialah luas total bidang kerja [m²]. Apabila nilai K_p tidak dapat diketahui, umumnya perkalian K_p dan K_d dapat dianggap sama dengan 0,5.

METODE

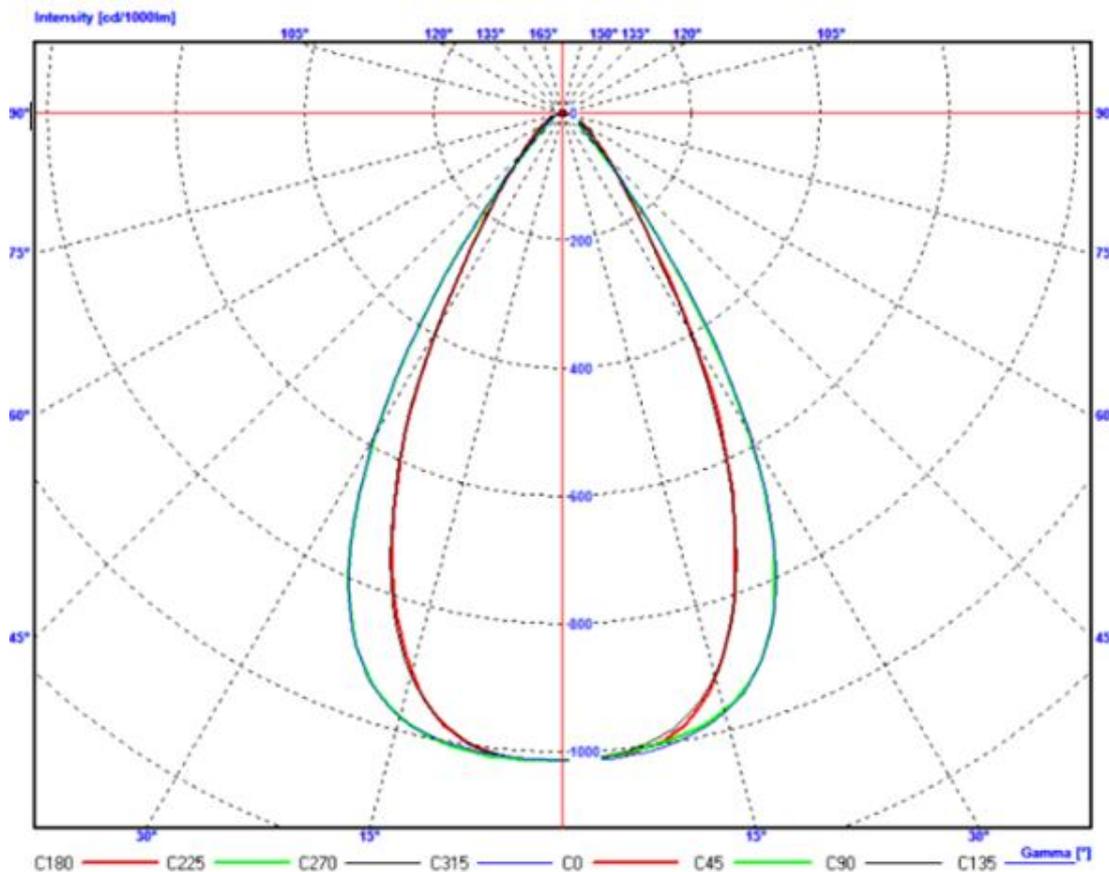
Lumener

Dalam studi ini digunakan suatu lumener khusus aplikasi industri (*high-bay*) berbasis LED sebagai sumber cahaya dengan daya listrik nominal 130 W, yang diproduksi oleh suatu perusahaan pabrikan LED yang berlokasi di Bandung, Indonesia. Penampang depan lumener tersebut berukuran 0,375 m × 0,460 m, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 2(a). Distribusi intensitas cahaya lumener tersebut telah diukur di ruang gelap Laboratorium Fisika Bangunan dan Akustik, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung. Diagram polar dari distribusi intensitas cahaya (dalam cd/1000 lumen lampu) lumener tersebut ditampilkan pada Gambar

3(b), adapun diagram Cartesian dari distribusi intensitas cahaya (dalam cd) luminer tersebut ditampilkan pada Gambar 4. Berdasarkan perhitungan, total fluks cahaya yang dihasilkan luminer tersebut sebesar 15902 lumen.

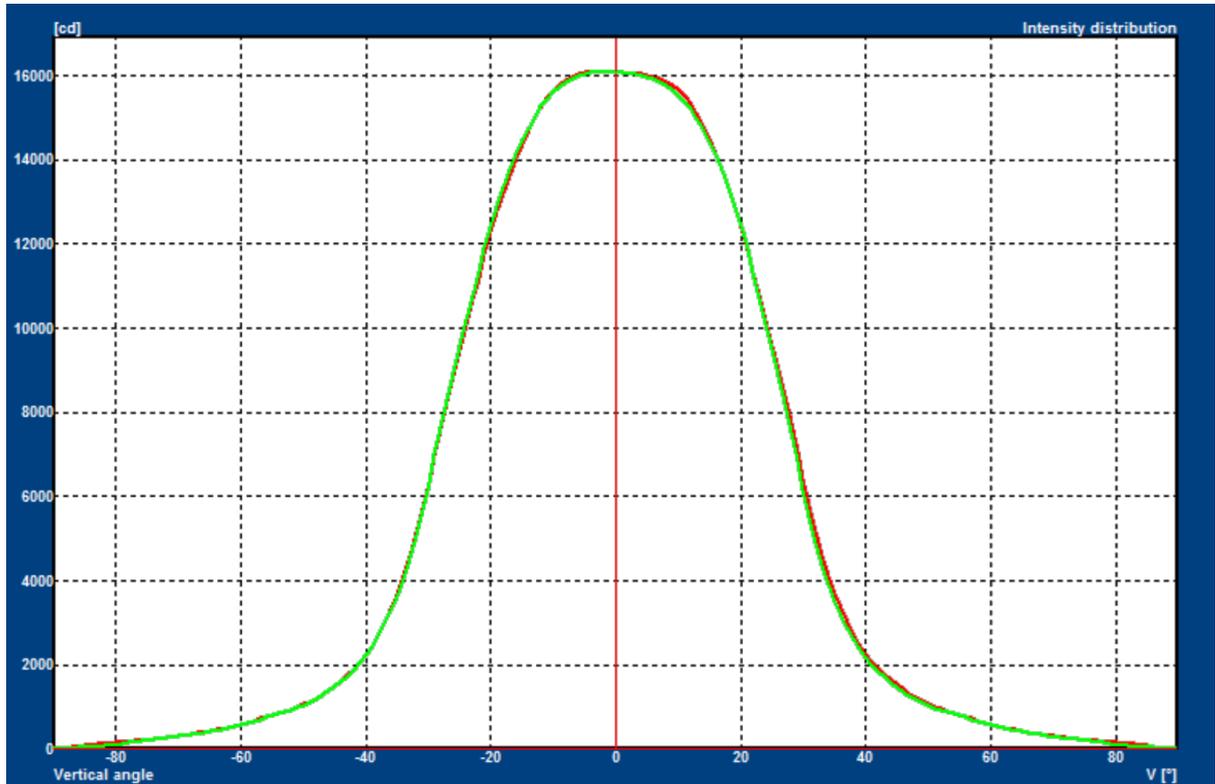


(a)



(b)

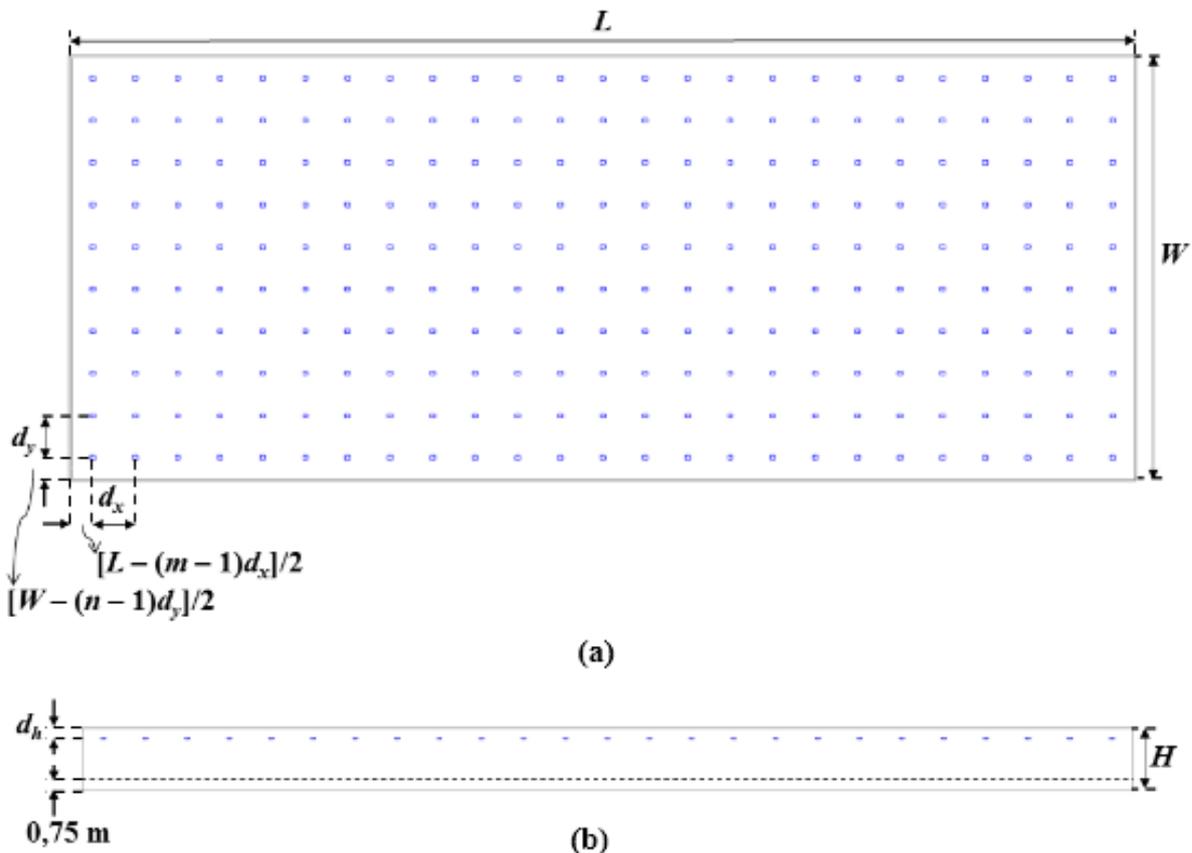
■ Gambar 3. (a) Foto tampak depan luminer yang digunakan, serta (b) diagram polar distribusi intensitas cahaya [cd/1000 lm] dari luminer tersebut pada $C = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ,$ dan 315°



■ **Gambar 4.** Diagram Cartesian distribusi intensitas cahaya [cd] dari lumener yang digunakan pada $C = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ,$ dan 315°

Ruang

Untuk keperluan optimisasi dalam studi ini, didefinisikan suatu ruang industri berukuran 100 m (panjang) \times 40 m (lebar) \times 6 m (tinggi), mengacu kepada referensi [9]. Tampak denah dan potongan dari ruang tersebut ditampilkan pada Gambar 5, beserta konsep perletakan lumener pada langit-langitnya.



■ **Gambar 5.** (a) Denah dan (b) potongan ruang industri dan konsep perletakan lumener pada langit-langitnya

Untuk menentukan banyaknya luminer yang harus dipasang pada ruang tersebut, digunakan metode lumen (persamaan (10)) dengan mengasumsikan iluminansi rata-rata yang diperlukan pada bidang kerja sebesar 500 lx [1]. Dengan menggunakan luminer seperti pada Gambar 3 yang memiliki fluks cahaya sebesar sekitar 16000 lm, dan dengan mengetahui bahwa luas total bidang kerja sebesar $100 \text{ m} \times 40 \text{ m} = 4000 \text{ m}^2$, serta K_p K_d dianggap sebesar 0,5; maka melalui persamaan (10) dapat ditentukan banyaknya luminer yang diperlukan yaitu 250 buah. Dengan menggunakan perbandingan panjang dan lebar ruang (5 : 2), maka 250 luminer tersebut dapat diletakkan dalam suatu konfigurasi yang terdiri dari 25 kolom dan 10 baris, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 5a.

Jarak antar baris dan antar kolom berturut-turut dapat dinyatakan sebagai d_x dan d_y , di mana keduanya ialah variabel masukan yang akan ditentukan nilai optimumnya pada studi ini. Supaya simetris, jarak antara kolom pertama dan dinding kiri (barat) ialah $[L - (m - 1)d_x]/2$, dengan L ialah panjang ruang (= 100 m), dan m banyaknya luminer dalam satu baris (= 25).

Dengan cara yang sama, jarak antara baris pertama dan dinding depan (selatan) ialah $[W - (n - 1)d_y]/2$, dengan W ialah lebar ruang (= 40 m), dan n banyaknya luminer dalam satu kolom (= 10). Nilai minimum d_x dan d_y berturut-turut yang diperbolehkan ialah 0,5 m dan 0,4 m (menyesuaikan ukuran penampang depan luminer), adapun nilai maksimum untuk keduanya ialah 4 m, yaitu = $[100 \text{ m}]/25 = [40 \text{ m}]/10$.

Ditinjau dari elevasinya (Gambar 5b), jarak luminer dari langit-langit dapat dinyatakan sebagai d_h , yang nilainya dapat divariasikan dari 0 m (menempel pada langit-langit) sampai dengan 1 m (digantung pada ketinggian 5 m dari lantai). Setelah d_x , d_y , dan d_h diketahui, maka nilai iluminansi di setiap titik ukur di bidang kerja dapat ditentukan secara eksak dengan persamaan (2), dan dengan menambahkan faktor koreksi sebesar 0,5. Untuk mendapatkan nilai iluminansi rata-rata dan pemerataan yang juga eksak, dalam studi ini didefinisikan $10 \times 4 = 40$ petak (*grid*) yang masing-masing berukuran $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$, tersebar merata di sepanjang bidang kerja. Di pusat tiap-tiap petak didefinisikan satu titik ukur, sehingga terdapat 40 titik ukur yang dapat digunakan untuk menentukan iluminansi rata-rata dan pemerataan.

Parameter Optimisasi

Objektif dari studi optimisasi yang dilakukan ialah memaksimumkan nilai iluminansi rata-rata (E_{av}) dan pemerataan (U_0) di bidang kerja. Karena nilai U_0 bersifat relatif (antara 0 dan 1), maka untuk menyederhanakan, nilai E_{av} dinyatakan pula sebagai nilai relatif terhadap 500 lx, yaitu kriteria minimum yang dipersyaratkan. Dengan demikian, fungsi objektif F yang akan dioptimisasi dapat dinyatakan secara matematis sebagai berikut:

■ **Tabel 1.** Parameter-parameter GA yang digunakan beserta nilai/tipenya

Parameter		Nilai/tipe
Banyaknya kromosom dalam populasi <i>(number of chromosomes in population)</i>	<i>(number)</i>	6
Peluang persilangan <i>(crossover probability)</i>		0,90
Tipe persilangan <i>(crossover type)</i>		<i>One-point</i>
Peluang mutasi <i>(mutation probability)</i>	<i>(mutation)</i>	0,10
Peluang seleksi acak <i>(selection probability)</i>	<i>(random)</i>	0,10
Banyaknya simulasi pendahuluan <i>(number of preliminary runs)</i>		4
Banyaknya generasi maksimum tiap simulasi pendahuluan <i>(Maximum number of generations per preliminary run)</i>		10
Banyaknya generasi maksimum tiap simulasi utama <i>(Maximum number of generations per main run)</i>		999
Toleransi konvergensi <i>(convergence tolerance)</i>	<i>(convergence)</i>	10^{-5}
Toleransi kendala mutlak <i>(absolute constraint tolerance)</i>		0
Presisi numerik dalam digit <i>(numeric precision in digits)</i>		6

$$F = \frac{E_{av}}{500} + U_0 \dots\dots\dots (11)$$

Adapun problem optimisasi yang dilakukan ialah:
 $\max F \dots\dots\dots (12)$

dengan memperhatikan kendala-kendala berikut:

$$0,5 \leq d_x \leq 4; 0,4 \leq d_y \leq 4; 0 \leq d_h \leq 1 \dots\dots\dots(13)$$

Proses optimisasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *GA Optimization for Excel v1.2* [10], yang dikembangkan khusus untuk melakukan optimisasi dalam *spreadsheet* yang dibuat pada *MS Excel*. Pada perangkat lunak tersebut, perlu didefinisikan sejumlah parameter optimisasi GA yang secara umum menggambarkan banyaknya kromosom dalam populasi, peluang terjadinya persilangan dan mutasi, pelaksanaan simulasi pendahuluan dan utama, serta toleransi konvergensi dan presisi yang dikehendaki. Nilai serta tipe dari berbagai parameter tersebut yang digunakan dalam penelitian ini ditabulasikan pada Tabel 1.

Optimisasi dilakukan selama sekurang-kurangnya 20 kali, sedemikian sehingga memberikan 20 kombinasi dari variabel masukan d_x , d_y , dan d_h yang optimum. Parameter-parameter statistik seperti kuartil pertama, median, kuartil ketiga, serta standar deviasi dari 20 data tersebut kemudian dihitung untuk memberi gambaran atas presisi dari hasil yang didapat.

HASIL DAN ANALISIS

Hasil dari optimisasi menggunakan GA sebanyak 20 kali, beserta banyaknya generasi yang diperlukan (N gen) untuk mendapatkan hasil yang konvergen ditampilkan pada Tabel 2. Terlihat bahwa nilai maksimum dari F yang dapat dicapai ialah 2,105; yang diperoleh dari kombinasi d_x , d_y , dan d_h sebesar 3,80 m, 3,55 m, dan 1 m. Adapun nilai F yang kedua terbaik ialah 2,097; diperoleh dari kombinasi d_x , d_y , dan d_h sebesar 3,80 m, 3,49 m, dan 0,96 m. Kombinasi pertama (paling optimum) menghasilkan nilai E_{av} sebesar 568,1 lx dan U_0 sebesar 0,97, sedangkan kombinasi kedua menghasilkan nilai yang tidak jauh berbeda, yaitu E_{av} sebesar 566,6 lx dan U_0 sebesar 0,96.

■ **Tabel 2.** Hasil optimisasi menggunakan GA sebanyak 20 kali

d_x [m]	d_y [m]	d_h [m]	E_{av} [lx]	U_0 [-]	F [-]	N gen [-]
3,77	3,56	1,00	569,1	0,95	2,087	36
3,80	3,40	1,00	565,2	0,94	2,066	37
3,80	3,55	1,00	568,1	0,97	2,105	224
3,80	3,49	0,96	566,6	0,96	2,097	82
3,80	3,63	1,00	560,6	0,96	2,080	31
3,81	3,63	1,00	558,7	0,97	2,085	88
3,83	3,68	0,81	549,5	0,97	2,064	67
3,84	3,54	0,97	561,1	0,96	2,086	48
3,85	3,50	1,00	560,9	0,95	2,074	54
3,88	3,71	0,70	540,4	0,96	2,044	17
3,93	3,66	0,43	539,6	0,97	2,051	226
4,00	3,39	1,00	540,0	0,96	2,037	62
4,00	3,48	1,00	545,2	0,97	2,064	89
4,00	3,54	1,00	548,0	0,98	2,081	58
4,00	3,54	1,00	548,2	0,99	2,082	107
4,00	3,56	0,98	547,6	0,99	2,083	4
4,00	3,58	1,00	547,2	0,99	2,082	22
4,00	3,59	1,00	546,4	0,99	2,080	87
4,00	3,59	1,00	545,9	0,99	2,079	89
4,00	3,64	1,00	538,9	0,98	2,056	69

Parameter-parameter statistik berupa kuartil pertama (Q_1), median (Q_2), kuartil ketiga (Q_3), serta standar deviasi (SD) dari 20 data pada Tabel 2 tersebut ditampilkan pada Tabel 3. Terlihat bahwa sebagian besar proses optimisasi yang dilakukan dapat menemukan solusi (konvergen) setelah kurang dari 100 generasi. Dengan demikian metode GA dapat digunakan untuk memecahkan masalah optimisasi dalam studi ini secara efektif dan efisien, dalam waktu yang relatif singkat.

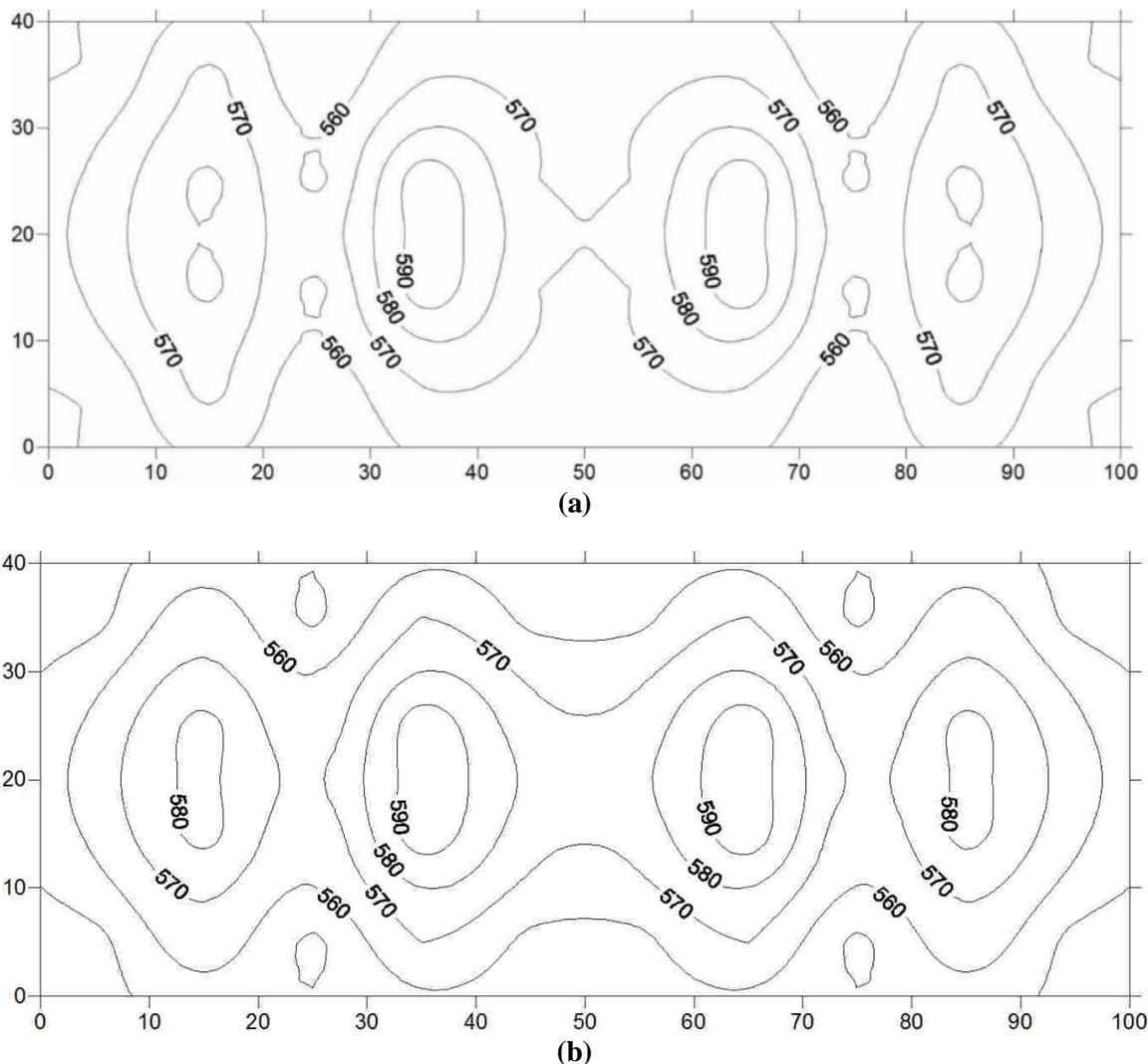
Nilai fungsi objektif F yang didapat cenderung bervariasi, dengan $Q_1 = 2,064$ dan $Q_3 = 2,083$. Rentang variasi nilai E_{av} yang didapat cukup besar, dengan standar deviasi 10 lx. Meskipun demikian, rentang variasi nilai U_0 cukup kecil, dengan standar deviasi hanya sebesar 0,01. Sebagian besar nilai d_x berada pada rentang $Q_1 \sim Q_3$ sebesar 3,81 ~ 4,00 m, d_y berada pada rentang 3,53 ~ 3,63 m, dan d_h berada pada rentang 0,98 ~ 1,00 m.

Dengan kata lain, nilai optimum yang didapat untuk d_h memiliki presisi paling tinggi dibandingkan dengan dua variabel masukan yang lain.

Untuk memberikan ilustrasi yang lebih jelas tentang pengaruh perletakan luminer yang optimum terhadap distribusi iluminansi di bidang kerja, Gambar 6 menampilkan kontur iluminansi pada bidang kerja yang didapatkan dari perletakan luminer paling optimum ($d_x, d_y, d_h = 3,80 \text{ m}, 3,55 \text{ m}, 1 \text{ m}$) dan kedua optimum ($d_x, d_y, d_h = 3,80 \text{ m}, 3,49 \text{ m}, 0,96 \text{ m}$). Nilai iluminansi maksimum terdapat di beberapa titik di tengah-tengah ruang, sedangkan nilai minimumnya berada di pojok-pojok ruang. Meskipun demikian, variasi antar-nilai iluminansi yang terukur pada ke-40 titik yang telah didefinisikan relatif sangat kecil, ditinjau dari nilai U_0 yang sangat besar, yaitu 0,97 dan 0,96.

■ Tabel 3. Parameter-parameter statistik dari hasil optimisasi

Parameter	d_x [m]	d_y [m]	d_h [m]	E_{av} [lx]	U_0 [-]	F [-]	$N \text{ gen}$ [-]
Q_1	3,81	3,53	0,98	545,7	0,96	2,064	37
Q_2	3,91	3,56	1,00	548,1	0,97	2,080	65
Q_3	4,00	3,63	1,00	560,9	0,99	2,083	88
SD	0,09	0,08	0,14	10,3	0,01	0,017	58



■ Gambar 6. Kontur iluminansi pada bidang kerja yang didapatkan dari perletakan luminer paling optimum (a) dan kedua optimum (b)

Secara umum, dalam studi ini terdapat beberapa asumsi dan batasan yang digunakan, terutama terkait dengan faktor koreksi (K_p, K_d) sebesar 0,5 serta diabaikannya reflektansi ruang, alih-alih menggunakan tabel K_p yang umum dijumpai untuk berbagai jenis luminer yang tersedia di pasaran. Meskipun demikian, pada kebanyakan kasus desain pencahayaan dalam ruang, asumsi ini cukup valid dan telah seringkali digunakan dalam praktik.

Sampai saat ini, belum terdapat data yang menunjukkan seberapa besar ketelitian hasil optimisasi dengan konsep GA pada kasus ini, jika diimplementasikan di ruang industri yang sebenarnya. Akan tetapi, berdasarkan hasil dari sejumlah studi sebelumnya yang telah dilakukan oleh berbagai peneliti [3-7], konsep GA sangat menjanjikan untuk diimplementasikan pada kasus nyata, karena akurasinya yang cukup tinggi dan beban komputasinya cenderung tidak terlalu besar.

Kendala utama dari penerapan konsep GA dalam optimisasi adalah terdapatnya ketidakpastian pada hasil optimisasi, karena GA menggunakan konsep stokastik dalam menentukan solusi optimum, sehingga solusi yang didapatkan setiap kali selalu berubah-ubah, walaupun nilainya dapat dianggap selalu terletak dalam suatu rentang kepercayaan tertentu. Ketidakpastian ini selalu terdapat pada semua jenis metode optimisasi dengan algoritma evolusioner, seperti GA, *particle swarm optimisation* (PSO), dan *bat algorithm* (BA). Bagaimanapun, hasil optimisasi yang didapat tetap dapat digunakan untuk memberi gambaran tentang perletakan lumener yang optimum dalam ruang tersebut. Secara umum, GA memiliki keunggulan secara umum yaitu aplikasinya telah banyak digunakan dan diuji dalam studi-studi optimisasi di berbagai bidang, serta secara khusus dalam penelitian ini dapat dieksekusi dengan bantuan perangkat lunak yang terhubung dengan spreadsheet *MS Excel*, sehingga relatif mudah untuk diprogram dan dijalankan.

Secara garis besar, studi ini telah menunjukkan peluang penggunaan metode optimisasi dengan konsep GA untuk menentukan perletakan sejumlah lumener untuk pencahayaan ruang besar, seperti yang umum ditemui di area industri. Dengan teknik ini, para perancang tata cahaya dan kelistrikan dalam ruang dapat menentukan konfigurasi dan perletakan lumener yang dikehendaki secara optimum, objektif, efektif, dan efisien.

KESIMPULAN

Dalam studi ini, telah ditunjukkan aplikasi konsep algoritma genetik (GA) untuk mengoptimisasi desain perletakan 250 lumener berbasis LED untuk pencahayaan suatu ruang industri berukuran $100 \text{ m} \times 40 \text{ m} \times 6 \text{ m}$, dengan memperhatikan parameter iluminansi rata-rata (E_{av}) serta pemerataan (U_0) pada bidang kerja. Objektif dari studi optimisasi yang dilakukan ialah memaksimumkan fungsi $F = E_{av}/500 + U_0$, dengan sejumlah kendala pada variabel masukan d_x , d_y , dan d_h dalam satuan meter.

Hasil dari optimisasi menggunakan GA sebanyak 20 kali menunjukkan bahwa nilai maksimum dari F yang dapat dicapai ialah 2,105, diperoleh dari kombinasi d_x , d_y , dan d_h sebesar 3,80 m, 3,55 m, dan 1 m; adapun nilai F kedua optimum ialah 2,097; diperoleh dari kombinasi d_x , d_y , dan d_h sebesar 3,80 m, 3,49 m, dan 0,96 m. Kombinasi pertama dan kedua menghasilkan nilai E_{av} berturut-turut sebesar 568,1 lx dan 566,6 lx, serta U_0 berturut-turut sebesar 0,97 dan 0,96. Nilai fungsi objektif F yang didapat cenderung bervariasi, karena rentang variasi E_{av} yang cukup besar (standar deviasi 10 lx), meskipun rentang variasi U_0 cukup kecil (standar deviasi 0,01). Sebagian besar nilai d_x berada pada rentang 3,81 ~ 4,00 m, d_y berada pada rentang 3,53 ~ 3,63 m, dan d_h berada pada rentang 0,98 ~ 1,00 m.

Kendala utama dari penerapan konsep GA dalam optimisasi adalah terdapatnya ketidakpastian pada hasil optimisasi sebagai konsekuensi diterapkannya konsep stokastik dalam menentukan solusi optimum, sehingga solusi yang didapatkan setiap kali selalu berubah-ubah, walaupun tetap berada dalam suatu rentang kepercayaan tertentu. Secara garis besar, studi ini telah menunjukkan peluang penggunaan metode optimisasi dengan konsep GA untuk menentukan perletakan sejumlah lumener untuk pencahayaan dalam ruang besar seperti ruang industri. Dengan menggunakan teknik ini, para perancang tata cahaya dan kelistrikan dalam ruang dapat menentukan konfigurasi dan perletakan lumener yang optimum secara objektif, efektif, dan efisien.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Badan Standardisasi Nasional (BSN). 2000. SNI 03-6197-2000: Konservasi energi pada sistem pencahayaan. Jakarta, BSN.
- [2] European Committee for Standardization (CEN). 2002. EN 12464-1:2002 – Light and lighting – Lighting of work places, Part 1: Indoor work places. Brussels, CEN.
- [3] K.P. Ferentinos, L.D. Albright. 2005. Optimal design of plant lighting system by genetic algorithms. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 18, pp. 473-484.
- [4] D. Gómez-Lorente, O. Rabaza, A. Espín Estrella, A. Peña-García. 2013. A new methodology for calculating roadway lighting design based on a multi-objective evolutionary algorithm. *Expert Systems with Applications*, 40, pp. 2156-2164.
- [5] E.D. Madias, P.A. Kontaxis, F.V. Topalis. 2016. Application of multi-objective generic algorithms to interior lighting optimization. *Energy and Buildings*, 125, pp. 66-74.
- [6] A-S. Choi, C-H. Kim, B-C. Park, K-D. Song, Y-S. Kim, 2007. Preliminary study on luminous intensity distribution modeling of the dome pendent prismatic luminaire and application of optimization techniques. *Building and Environment*, 42, pp. 1173-1182.
- [7] Y-S. Kim, A-S. Choi, J-W. Jeong. 2013. Applying micro genetic algorithm to numerical model for luminous intensity distribution of planar prism LED luminaire. *Optics Communications*, 293, pp. 22-30.

- [8] Commission Internationale de l'Éclairage (CIE). CIE 121:1996 – The photometry and goniophotometry of luminaires. Vienna, CIE.
- [9] B. Lee, M. Trcka, J.L.M. Hensen. 2014. Building energy simulation and optimization: A case study of industrial hall with varying process loads and occupancy patterns. *Building Simulation*, 7, pp. 229-236.
- [10] A. Schreyer. 2005. *GA Optimization for EXCEL*, Version 1.2.