

SIMULASI MONTE CARLO MENGGUNAKAN PEMROGRAMAN R UNTUK MENENTUKAN KOREKSI KETIDAKCOCOKAN PADA FOTOMETER BERDASARKAN INDEKS KETIDAKCOCOKAN LAZIM

MONTE CARLO SIMULATION USING R PROGRAMMING TO DETERMINE PHOTOMETER MISMATCH CORRECTION BASED ON GENERAL MISMATCH INDEX

Yonan Prihhapso¹, Nelfyenny², Dini Suryani³, Wiwin Farhanisa³

¹Pusat Riset Teknologi Pengujian dan Standar, Badan Riset dan Inovasi Nasional

²Badan Riset dan Inovasi Nasional

³Direktorat Standar Nasional Satuan Ukuran Termoelektrik dan Kimia, Badan Standardisasi Nasional

Email: yona001@brin.go.id

ABSTRAK

Ketidakcocokan (*mismatch*) antara lampu ukur ketika sebuah fotometer atau lux meter dikalibrasi dengan lampu sumber ketika fotometer digunakan dalam pengukuran dapat menyebabkan eror atau kesalahan. Saat ini belum ada metode umum yang dapat digunakan untuk mengoreksi kesalahan ini. Metode yang direkomendasikan oleh Komisi Internasional untuk Pencahayaan (*Commission Internationale de l'Eclairage* - CIE) cenderung rumit dan hanya dapat diimplementasikan pada lembaga metrologi nasional saja. Dalam penelitian ini dikemukakan metode untuk mengoreksi kesalahan ketidakcocokan menggunakan korelasi antara nilai indeks ketidakcocokan lazim (f'_1) dengan nilai faktor koreksi ketidakcocokan spektral (F^*). Nilai f'_1 dan F^* dihitung dari profil-profil responsivitas spektral fotometer sampel yang banyak digunakan di Indonesia. Berdasarkan profil tersebut dibuat model simulasi Monte Carlo untuk mendapatkan sebaran nilai F^* pada berbagai nilai indeks f'_1 . Menggunakan 2×10^4 pengacakan dan 20 kali perulangan, didapatkan nilai ketidakpastian dari komponen faktor koreksi ketidakcocokan spektral sebesar 0,002%, 0,044% dan 0,203% untuk sumber cahaya berupa lampu pijar (tungsten halogen), lampu fluorescent dan lampu LED. Kontribusi komponen F^* terhadap ketidakpastian pengukuran tingkat pencahayaan adalah sebesar 0,011% untuk lampu pijar (tungsten halogen), 0,2% untuk lampu fluorescent dan 2,5% untuk lampu LED.

Kata Kunci: LED, SSL, ketidakcocokan spektral, SMCF, Monte Carlo, lux meter

ABSTRACT

A mismatch between the light source used in the photometer or lux meter calibration and the light source used in the measurement will lead to measurement error. Currently, no generalised method can be used to correct this error. The methods recommended by the CIE tend to be complicated and can only be implemented at the national metrology institute (NMI). In this study, a method for correcting mismatch errors using the correlation between the index with the mismatch factor (F^) is proposed. The values of $f_{1'}$ and F^* are calculated from the spectral responsivity profiles of the sample photometers that are widely used in Indonesia. Based on the profiles, a Monte Carlo simulation model was constructed to obtain the distribution of F^* at different $f_{1'}$ index values. Using 2×10^4 random numbers and 20 iterations, the uncertainty values of the mismatch components were found to be 0.002%, 0.044%, and 0.203% for tungsten-halogen, fluorescent, and LED sources. The mismatch component's contribution to the measurement uncertainty of the illuminance of a source was 0.011% for the tungsten-halogen source, 0.2% for the fluorescent source, and 2.5% for the LED source.*

Keywords : LED, SSL, spectral mismatch, SMCF, Monte Carlo, lux meter

1. PENDAHULUAN

Sumber cahaya yang berbasis pada teknologi *Solid State Lighting* (SSL) seperti lampu LED (*white LED*) yang berbahan dasar fosfor ataupun RGB LED mengalami kemajuan yang pesat, sehingga sumber cahaya tipe ini telah banyak tersedia di pasaran (Delendik et al., 2020; Demid V. Pekur et al., 2020; Prihhapso et al., 2018). Berdasarkan *International Energy Agency* (IEA), hingga tahun 2019 pangsa pasar lampu LED dunia telah mencapai 46% dan diperkirakan akan terus naik pada tahun 2025 hingga mencapai 65% dari total pangsa pasar lampu penerangan (IEA,

2020). Apabila dibandingkan dengan sumber cahaya tradisional seperti lampu pijar (tungsten) maupun fluorescent (lampu TL dan LHE), lampu LED saat ini telah memiliki efikasi yang jauh lebih tinggi (Morgan Pattison et al., 2018; Spunei et al., 2017). Oleh karena itu, LED dipandang lebih hemat energi dan ramah lingkungan sehingga lebih dipilih oleh konsumen dibandingkan jenis lampu lain baik untuk penerangan domestik, publik, maupun industri (D. V. Pekur et al., 2020; Zissis et al., 2021).

Selain potensi besar dalam penghematan energi, jenis lampu LED juga memiliki tantangan dalam pengukuran nilai besaran fotometri yang dihasilkan. Hal ini karena LED memiliki *spectral power distribution* (SPD) yang berbeda dengan sumber cahaya tradisional. LED yang didesain menggunakan lapisan fosfor memiliki SPD dengan tingkat radiasi yang dominan pada daerah panjang gelombang rendah, serta tidak menghasilkan emisi pada daerah ultraviolet dan inframerah (Wang et al., 2019). Pengukuran besaran fotometri seperti tingkat pencahayaan ruang dengan lampu LED akan menghasilkan kesalahan pengukuran atau eror karena adanya ketidakcocokan (*mismatch*) SPD. Ketidakcocokan SPD disebabkan oleh lampu sumber pada kalibrasi lux meter atau fotometer menggunakan sumber tipe-A yang berupa lampu pijar (Kokka et al., 2018). Perbedaan hasil ukur karena ketidakcocokan SPD jenis lampu sumber pada saat kalibrasi dan ketika pengukuran ini tidak dapat dihindari dan harus dikoreksi menggunakan faktor koreksi ketidakcocokan spektral. Hal ini bertujuan untuk menjamin kebenaran, serta akurasi dari pengukuran nilai fotometri untuk tingkat pencahayaan.

Setiap sensor fotometer selalu memiliki nilai indeks ketidakcocokan lazim (f_1') yang dapat ditemukan pada spesifikasi

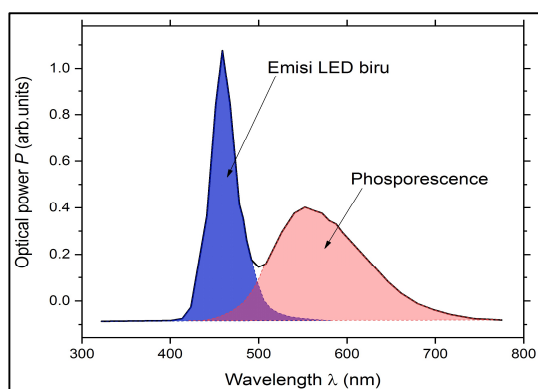
teknis sensor, dan nilai ini menunjukkan karakteristik instrumen tersebut (Neyezhmakov et al., 2019). Akan diinvestigasi korelasi antara nilai f_1' fotometer dengan faktor koreksi ketidakcocokan spektral. Sehingga, dengan menggunakan data nilai f_1' saja pengguna dapat melakukan koreksi kesalahan karena adanya ketidakcocokan SPD lampu sumber penerangan dengan mudah.

Secara garis besar dalam makalah ini akan dijelaskan beberapa tipe lampu yang umum digunakan sebagai sumber penerangan seperti lampu pijar, lampu fluorescent dan lampu LED. Kemudian akan dijelaskan korelasi matematis antara nilai indeks ketidakcocokan lazim (f_1') dan nilai faktor koreksi ketidakcocokan spektral (F^*). Menggunakan korelasi ini akan dijelaskan juga metode kerja program simulasi Monte Carlo menggunakan bahasa pemrograman R.

2. TINJAUAN PUSTAKA

LED memiliki spektrum warna putih-kebiruan, hal ini dikarenakan lampu LED didesain berdasarkan LED biru berbahan gallium indium (GaIn) atau gallium nitride (GaN) dengan suplementasi bahan konverter (Zhang & Liu, 2019). Spektrum panjang gelombang biru sebagian diserap oleh bahan konverter dan akan dipancarkan kembali menjadi cahaya pada

daerah panjang gelombang yang lebih tinggi seperti pada Gambar 1. Dikarenakan emisi LED menghasilkan dua puncak dominan pada daerah panjang gelombang biru dan merah maka desain LED ini disebut sebagai *di-chromatic* LED (Arteev et al., 2020). Lampu *fluorescent* atau lebih dikenal di Indonesia sebagai lampu hemat energi (LHE) dan lampu tabung (TL) juga menggunakan fosfor sebagai bahan dasar (Shionoya et al., 2018). Tergantung senyawa aktifator, lampu *fluorescent* secara umum menghasilkan emisi cahaya dominan pada panjang gelombang 254 nm, 313 nm, 365 nm, 405 nm, 436 nm ataupun 578 nm. Berbeda dengan kedua jenis lampu tersebut, lampu pijar memiliki spektrum yang kontinu.



Gambar 1. Spektrum lampu LED *di-chromatic* dengan puncak dominan pada daerah panjang gelombang 445 nm dan 565 nm.

Koreksi karena adanya ketidakcocokan antara SPD yang dihasilkan oleh LED maupun lampu fluorescent terhadap sumber tipe-A dapat dilakukan ketika responsivitas spektral sensor

fotometer ($s_{rel}(\lambda)$) dan SPD sumber cahaya ($S_z(\lambda)$) diketahui (Rosas & Estrada-Hernández, 2016). Koreksi ini akan dengan mudah dilakukan oleh lembaga metrologi nasional, akan tetapi bagi laboratorium kalibrasi dan pengguna langsung akan sulit dilakukan. Saat ini belum ada metode umum yang dapat digunakan oleh pengguna fotometer untuk mengoreksi kesalahan karena adanya ketidakcocokan SPD.

Faktor koreksi ketidakcocokan spektral (F^*) merupakan rasio daya radiasi yang diterima pengamat dari sebuah sumber cahaya, dalam hal ini berkorelasi dengan responsivitas pengamat atau sensor dan SPD sumber cahaya (CIE, n.d.). Persamaan [1] menunjukkan bagaimana kesalahan akibat perbedaan SPD sumber dapat dikoreksi menggunakan nilai F^* pada pengukuran tingkat pencahayaan ruangan (E_v).

$$E_v = \frac{x}{s_v} F^* \quad [1]$$

dengan

E_v merupakan nilai tingkat pencahayaan dalam lx, s_v adalah responsivitas dari sensor fotometer yang digunakan dalam pengukuran yang memiliki satuan A/lx , x merupakan penunjukan fotometer dalam nilai arus (A), dan F^* adalah koreksi ketidakcocokan spektral tanpa satuan.

Seperti disebutkan sebelumnya, F^* hanya bisa dihitung apabila responsivitas

spektral sensor fotometer ($s_{rel}(\lambda)$) dan SPD sumber cahaya ($S_Z(\lambda)$) diketahui.

$$F^* = \frac{\int S_Z(\lambda).V(\lambda) d\lambda}{\int S_Z(\lambda).s_{rel}(\lambda) d\lambda} \frac{\int S_A(\lambda).s_{rel}(\lambda) d\lambda}{\int S_A(\lambda).V(\lambda) d\lambda} [2]$$

dimana, $V(\lambda)$ adalah nilai acuan untuk responsivitas mata manusia secara umum, dan $S_A(\lambda)$ SPD lampu tipe-A. Batas integral ditentukan oleh λ_{min} dan λ_{max} yang umumnya berada pada panjang gelombang 360 nm dan 830 nm.

Sedangkan nilai indeks ketidakcocokan lazim (f'_1) dapat dihitung dengan persamaan berikut ini,

$$f'_1 = \frac{\int |s_{rel}^*(\lambda) - V(\lambda)| d\lambda}{\int V(\lambda) d\lambda} [3]$$

$$s_{rel}^*(\lambda) = s_{rel}(\lambda) \cdot \frac{\int S_A(\lambda).V(\lambda) d\lambda}{\int S_A(\lambda).s_{rel}(\lambda) d\lambda} [4]$$

Dengan nilai indeks ketidakcocokan lazim (f'_1) merupakan hasil bagi perbedaan absolut antara nilai responsivitas spektral yang dinormalisasi $s_{rel}^*(\lambda)$ dan nilai $V(\lambda)$.

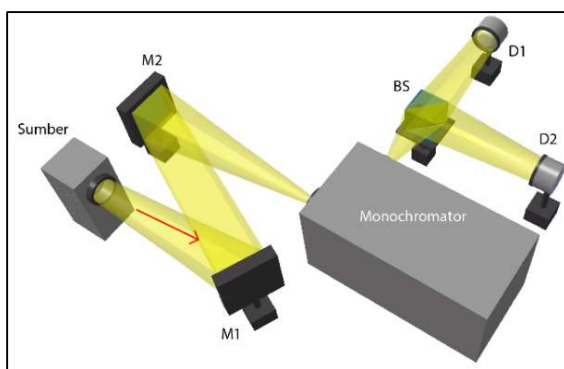
Melihat persamaan [2]-[4], terdapat komponen yang sama-sama mempengaruhi hasil perhitungan faktor ketidakcocokan lazim dan faktor koreksi ketidakcocokan spektral. Komponen ini adalah rasio bentuk profil fotometer pada sumber tipe-A ($\int S_A(\lambda).s_{rel}(\lambda) d\lambda$) terhadap definisi profil responsivitas $V(\lambda)$ pada sumber tipe-A ($\int S_A(\lambda).V(\lambda) d\lambda$). Sehingga

diketahui bahwa perhitungan f'_1 dan F^* saling berkorelasi berdasarkan variabel tersebut.

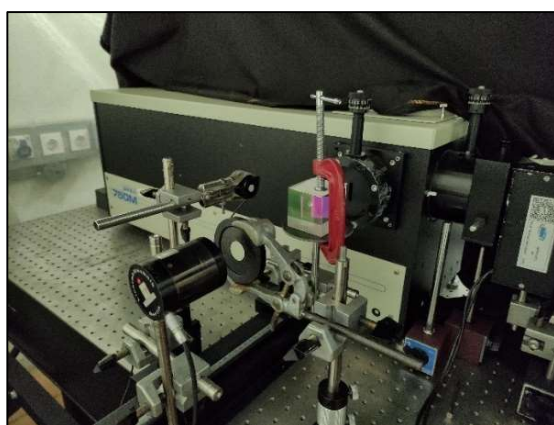
3. METODE

Pengukuran responsivitas spektral sensor fotometer ($s_{rel}(\lambda)$) pada penelitian ini menggunakan monokromator Jobin-Yvon SPEX 750M yang memiliki konfigurasi optis Czerny-Turner. Pelurusan peralatan dalam pengukuran responsivitas spektral sensor fotometer ditunjukkan pada Gambar 2(a). Pengukuran dilakukan pada rentang panjang gelombang tampak dari 380-780 nm dengan pengambilan sampel data setiap 5 nm dan lebar pita spektral (SBW) sebesar 3,0 nm. Sumber cahaya yang digunakan merupakan lampu halogen 250 watt, berkas cahaya difokuskan menggunakan dua buah cermin M1 dan M2 ke celah masukan monokromator. Intensitas berkas cahaya luaran monokromator dibagi sama besar menggunakan *beam splitter* (BS), seperti ditunjukkan pada Gambar 2 (b). Masing-masing berkas diarahkan ke fotometer sampel (D1) dan detektor monitor (D2). D1 adalah fotometer sampel, yaitu fotometer komersial dengan nilai indeks ketidakcocokan lazim (f'_1) yang berbeda-beda. Pemilihan fotometer sampel mewakili setiap rentang kelas fotometer sesuai definisi yang terdapat dalam dokumen DIN 5032 atau JIS C 1609. Kelas

fotometer ini adalah $f_1' < 1,5\%$, $1,5 - 3\%$, $3 - 6\%$, $6 - 9\%$, dan $f_1' > 9\%$. Dalam penelitian ini fotometer dengan kelas $f_1' < 1,5\%$ tidak digunakan, karena fotometer ini umumnya hanya digunakan pada lembaga metrologi nasional saja. Sedangkan untuk pengukuran nilai-nilai SPD sumber cahaya ($S_z(\lambda)$) diukur menggunakan *array-spectro radiometer* pada rentang panjang gelombang 380 nm hingga 780 nm dengan pengambilan 380 nm hingga 780 nm dengan pengambilan data setiap 1 nm.



(a)



(b)

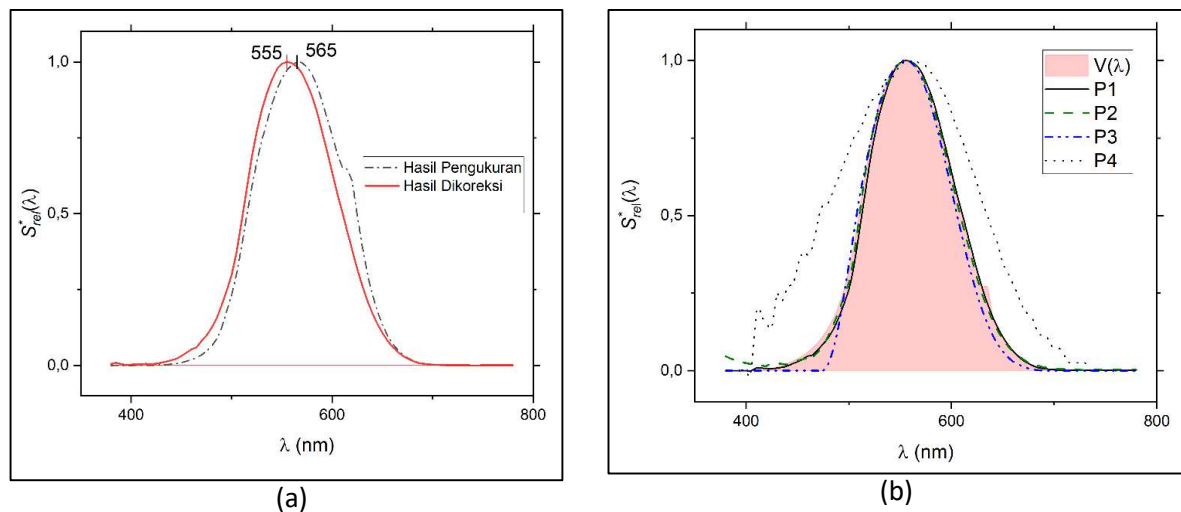
Gambar 2. Penempatan peralatan: (a) skema pengukuran dengan arah sinar ditunjukkan oleh anak panah; (b) penempatan detektor monitor dan fotometer sampel.

Menggunakan data hasil pengukuran responsivitas spektral fotometer sampel dan nilai SPD beberapa lampu, nilai indeks ketidakcocokan lazim dan faktor koreksi ketidakcocokan spektral yang berkorelasi dihitung menggunakan persamaan [2] – [4]. Sebuah model kurva dibangun untuk dapat menggambarkan ketidakcocokan spektral berdasarkan hasil ukur responsivitas spektral fotometer sampel. Model ini direplikasi sebanyak 10^n dengan metode simulasi *Monte Carlo* (MCS) untuk menghasilkan data yang dapat mewakili populasi menggunakan program R. Program R dipilih karena memiliki kecepatan pengolahan data dalam bentuk vektor dan nilai-nilai acak yang dihasilkan memiliki kualitas pengacakan yang tinggi (Templ, 2016). Program R diintegrasikan dengan Microsoft Excel menggunakan BERT (*Basic Excel R Toolkit*). Metode MCS dipilih karena metode simulasi ini mampu menghasilkan sampel berulang yang mirip dengan data yang didapatkan dari pengambilan sampel pada fenomena sebenarnya (Abonazel, 2018). Metode ini telah banyak digunakan dalam berbagai bidang, baik dalam bidang fotonik, kimia, energi maupun bidang ekonomi (Baležentis & Streimikiene, 2017; Periyasamy & Pramanik, 2017; Ramos-Méndez et al., 2018; Zaroni et al., 2019).

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Detektor monitor (D2) memiliki peran yang sangat penting dalam pengukuran responsivitas spektral untuk menghilangkan faktor ketidakstabilan intensitas sumber cahaya terhadap waktu. Bila diperhatikan pada Gambar 3(a) terlihat profil fotometer hasil pengukuran mengalami pergeseran puncak sebesar 10

nm dan perubahan bentuk pada salah satu *slope* kurva ketika tidak dikoreksi terhadap D2. Pergeseran ini diakibatkan oleh kontribusi perubahan intensitas lampu sumber ($S_z(\lambda)$) dan faktor transmisi dari monokromator ($\tau(\lambda)$), kedua faktor tersebut dapat dieliminasi menggunakan responsivitas spektral ($S_{rel}(\lambda)$) detektor D2 yang didapatkan dari sertifikat kalibrasi.



Gambar 3. Hasil pengukuran: (a) koreksi menggunakan detektor monitor, (b) hasil pengukuran fotometer-fotometer sampel.

Fotometer sampel dipilih sesuai spesifikasi dari pabrikan dengan kelas 1,5-3%, 3 - 6%, 6 - 9%, dan $f'_1 > 9\%$, masing-masing diberikan label P1, P2, P3 dan P4. Gambar 3(b) menunjukkan profil responsivitas spektral fotometer sampel hasil pengukuran. Fotometer P1 memiliki nilai indeks ketidakcocokan lazim (f'_1) terkecil, sedangkan nilai terbesar diwakili P4. Nilai indeks ketidakcocokan lazim dihitung menggunakan persamaan [3] dan

[4] dengan hasil perhitungan ditunjukkan pada Tabel 1. P4 memiliki nilai f'_1 berada jauh dari spesifikasi yang tertera dari pabrikan, dengan nilai hasil perhitungan 26% sedangkan dalam spesifikasi disebutkan sebesar 9%. Pada penelitian ini, nilai indeks ketidakcocokan lazim tidak diambil dari spesifikasi alat, melainkan dihitung menggunakan persamaan [3] dan [4].

Berdasarkan hasil penelitian penyebab, diketahui ketidakcocokan

spektral dapat dibedakan menjadi beberapa parameter. Pertama, adanya pergeseran puncak profil responsivitas spektral fotometer baik ke arah panjang gelombang yang lebih rendah atau panjang gelombang yang lebih tinggi. Kedua, perbedaan luasan area profil responsivitas spektral

dibandingkan dengan profil $V(\lambda)$, baik berupa penyusutan (P3) maupun perluasan area profil (P4). Selain kedua parameter tersebut, dapat diamati pula profil kurva respon yang tampak tidak rata seperti pada fotometer P4 dimana dapat diamati derau yang cukup berarti.

Tabel 1. Hasil perhitungan nilai f'_1 dan F^* yang berkorelasi untuk masing-masing fotometer sampel.

Fotometer	f'_1	F^*					
		Tungsten	Lampu <i>fluorescent</i> CFL/ LHE/ TL				LED
			3000 K	4100 K	5000 K	6500 K	
P1	2,85%	1,00004	1,00616	1,00603	0,99590	0,99571	0,99832
P2	2,85%	0,99994	0,99527	1,00489	0,99581	0,99865	1,00042
P3	8,08%	1,00026	1,01694	1,03799	1,01168	1,01459	1,02760
4	25,96%	0,99907	0,86874	0,86312	0,97917	0,98608	0,94386

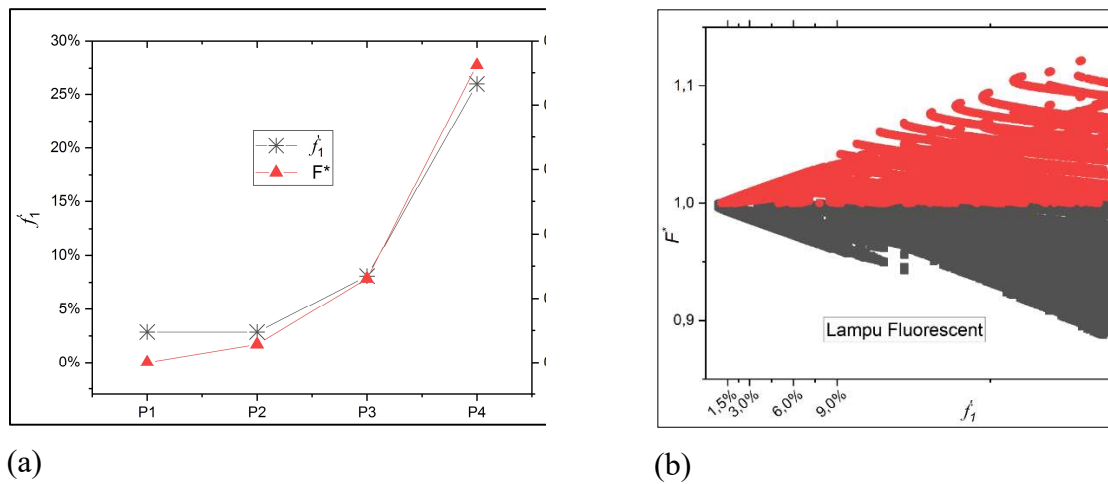
Nilai faktor koreksi ketidakcocokan spektral (F^*) untuk masing-masing kelompok fotometer terhadap beberapa jenis lampu dihitung menggunakan persamaan [2]. Hal yang menarik dapat diamati dari hasil perhitungan F^* adalah pada nilai f'_1 yang sama, kelompok fotometer P1 memiliki faktor koreksi yang lebih besar dibandingkan dengan kelompok fotometer P2 untuk jenis lampu TL dan LED. Hal ini dikarenakan kelompok fotometer P2 memiliki respon yang tinggi pada rentang 480 nm hingga 550 nm. Lampu jenis TL dan LED menggunakan material yang menghasilkan pancaran cahaya pada panjang gelombang rendah

dengan intensitas yang lebih tinggi, sehingga memberikan kontribusi kesalahan yang cukup besar pada fotometer P2.

Korelasi antara f'_1 dan F^* dianalisa dengan nilai *Pearson's - r* yang mendekati 1 ($r = 0,9979$). Hal ini menunjukkan korelasi yang kuat dengan setiap kenaikan nilai f'_1 maka F^* juga mengikuti seperti ditunjukkan pada Gambar 4 (a). Menggunakan informasi korelasi tersebut, maka nilai faktor koreksi ketidakcocokan spektral inferensial pada setiap kelas fotometer dapat diestimasi berdasarkan dari nilai ketidakcocokan lazim fotometer. Koreksi ketidakcocokan pada dasarnya bertujuan untuk menghilangkan kesalahan

karena perbedaan luas kurva profil fotometer terhadap profil $V(\lambda)$. Sehingga dapat dilihat bahwa ketika profil fotometer dan $V(\lambda)$ memiliki bentuk yang identik, maka nilai faktor koreksi ketidakcocokan spektral (F^*) akan mendekati 1 (≈ 1). Sedangkan, pada kasus bentuk profil

fotometer dengan luas yang lebih sempit dari $V(\lambda)$ maka nilai faktor koreksi ketidakcocokan spektral $F^* > 1,0$, begitu juga sebaliknya. Oleh karena itu, pada indeks ketidakcocokan lazim (f'_1) yang sama maka akan didapatkan rentang probabilitas nilai $F^* > 1 < F^*$.



Gambar 4. Hasil perhitungan: (a) korelasi antara f'_1 dan F^* , (b) hasil MCS nilai F^* pada rentang f'_1 1,5 - 27%.

Tabel 2. Nilai F^* hasil simulasi Monte Carlo untuk beberapa kelas fotometer.

f'_1	F^*		
	Tungsten	fluorescent CFL/TL	LED
1,5%	0,9999	0,9903	0,9914
3%	0,9999	0,9843	0,9862
6%	0,9998	0,9723	0,9758
9%	0,9997	1,0413	0,9654
>9%	0,9992	1,1283	0,9031

Pada penelitian ini simulasi MC digunakan untuk menghasilkan 2×10^4 data profil fotometer sesuai dengan batasan

model. Model diturunkan berdasarkan faktor-faktor penyebab ketidakcocokan spektral dari fotometer P1, P2, P3 dan P4.

Data kurva profil di simulasi dengan perulangan sebanyak 20 kali, nilai rata-rata F^* terbesar dari batas maksimum atau minimum digunakan sebagai nilai estimasi untuk melakukan koreksi kesalahan akibat ketidakcocokan. Hasil perhitungan F^* pada kelas fotometer yang berbeda dapat dilihat pada Tabel 2, nilai-nilai ini dapat digunakan untuk mengkoreksi hasil pengukuran tingkat penerangan dengan melihat nilai f_1' yang tertera pada spesifikasi alat. Bentuk sebaran data perhitungan nilai F^* dari setiap kurva yang dihasilkan dari simulasi MC dapat dilihat pada Gambar 4 (b). Ketidakpastian relatif untuk nilai F^* pada pengukuran tingkat penerangan yang menggunakan lampu pijar adalah sebesar 0,002%, untuk lampu TL adalah 0,044% dan untuk lampu LED adalah 0,203%.

Penentuan ketidakpastian pengukuran yang berkaitan dengan pengukuran tingkat penerangan dengan

memperhitungkan kontribusi komponen ketidakcocokan dapat dilihat pada Tabel. 3. Dapat dilihat bahwa komponen ketidakcocokan memiliki kontribusi terbesar ketiga setelah koreksi dan *drift* fotometer. Selain pada pengukuran lampu LED, penentuan ketidakpastian pengukuran yang berkaitan dengan pengukuran tingkat pencahayaan juga dilakukan pada sumber berupa lampu pijar dan fluorescent. Kontribusi komponen ketidakcocokan pada evaluasi ketidakpastian pengukuran lampu pijar adalah sebesar 0,011% dan untuk lampu fluorescent sebesar 0,2%. Memperhatikan besarnya kontribusi komponen ketidakcocokan pada pengukuran lampu fluorescent dan LED, maka komponen ini harus dimasukkan dalam evaluasi pengukuran tingkat penerangan yang menggunakan fotometer komersial.

Tabel 3. Evaluasi ketidakpastian pengukuran tingkat pencahayaan lampu LED.

Komponen Ketidakpastian	PDF	IndeksKontribusi
Perulangan pengukuran	Normal	0,0%
Daya baca fotometer	Persegi	0,3%
Koreksi fotometer	Normal	91,4%
Non-linieritas fotometer	Persegi	0,0%
<i>Drift</i> fotometer	Persegi	5,8%
Koreksi Ketidakcocokan	Normal	2,5%

5. KESIMPULAN

Kesalahan pembacaan fotometer komersial pada pengukuran tingkat

penerangan diakibatkan oleh perbedaan profil responsivitas spektral fotometer ketika digunakan dalam pengukuran

sumber selain *illuminant-A* dapat dikoreksi dengan faktor koreksi ketidakcocokan spektral. Koreksi ini dapat diestimasi berdasarkan korelasi antara indeks ketidakcocokan lazim dengan faktor koreksi ketidakcocokan spektral. Oleh karenanya, konsumen dapat menggunakan nilai koreksi ini sebagai alternatif untuk memperkirakan besar koreksi ketidakcocokan hanya dengan melihat informasi yang tertera pada spesifikasi fotometer.

Nilai F^* untuk fotometer komersial yang dihitung menggunakan 2×10^4 data simulasi Monte Carlo dapat digunakan untuk mengoreksi fotometer kelas L ($f'_1 \leq 1,5\%$), A ($f'_1 \leq 3\%$), kelas B ($f'_1 \leq 6\%$), kelas C ($f'_1 \leq 9\%$) dan untuk fotometer yang tidak mencantumkan informasi f'_1 dianjurkan untuk menggunakan faktor koreksi ketidakcocokan spektral dengan nilai $f'_1 > 9\%$. Faktor koreksi ini dapat digunakan untuk meningkatkan akurasi pengukuran nilai fotometri seperti tingkat pencahayaan (lx), daya optik lampu (*lumen*) maupun tingkat kecerahan (cd/m^2). Selain itu faktor koreksi ini dapat digunakan sebagai gambaran mengenai besar simpangan pengukuran ketika fotometer komersial digunakan dalam pengukuran menggunakan sumber penerangan tipe fluorescent atau LED.

Pada penelitian ini, karena keterbatasan sistem, data acak yang dihasilkan sebesar 2×10^4 sudah dianggap mencukupi untuk menghitung faktor koreksi. Bila diinginkan akurasi yang lebih tinggi dan hasil yang lebih konsisten data acak hingga 10^6 dapat digunakan pada penelitian lebih lanjut.

6. UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Prof. Boedi Soesatyo dan Achalik serta rekan-rekan laboratorium Fotometri Radiometri.

7. DAFTAR PUSTAKA

- R. Abonazel, Mohamed. (2018). A Practical Guide for Creating Monte Carlo Simulation Studies Using R. *International Journal of Mathematics and Computational Science*, 4(1), 18–33.
- Arteev, D. S., *et al.* (2020). Emission Spectrum Control In Monolithic Blue-Cyan Dichromatic Lightemitting Diodes. *Semiconductor Science and Technology*, 35(4).
- Baležentis, T., & Streimikiene, D. (2017). Multi-criteria ranking of energy generation scenarios with Monte Carlo simulation. *Applied Energy*, 185(2016), 862–871.
- CIE. (n.d.). *E-International Lighting Vocabulary*. diakses pada April 6, 2020, melalui

- <http://eilv.cie.co.at/term/1224>
- Delendik, K., Kolyago, N., & Voitik, O. (2020). Design and investigation of cooling system for high-power LED luminaire. *Computers and Mathematics with Applications*, 83, 84–94.
- IEA. (2020). *Lighting on Tack*. diakses pada April 6, 2020, melalui <https://www.iea.org/reports/lighting>
- Kokka, A., *et al.* (2018). Development of white LED illuminants for colorimetry and recommendation of white LED reference spectrum for photometry. *Metrologia*, 55(4),
- Morgan Pattison, P., Hansen, M., & Tsao, J. Y. (2018). LED lighting efficacy: Status and directions. *Comptes Rendus Physique*, 19(3), 134–145.
- Neyezhmakov, P. I., *et al.* (2019). Increasing the measurement accuracy of wide-aperture photometer based on digital camera. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 11(3), 1–6.
- Pekur, D. V., Sorokin, V. M., & Nikolaenko, Y. E. (2020). Thermal characteristics of a compact LED luminaire with a cooling system based on heat pipes. *Thermal Science and Engineering Progress*, 18(March), 100549.
- Pekur, Demid V., Sorokin, V. M., & Nikolaenko, Y. E. (2020). Features of wall-mounted luminaires with different types of light sources. *Electrica*, 21(1), 32–40.
- Periyasamy, V., & Pramanik, M. (2017). Advances in Monte Carlo Simulation for Light Propagation in Tissue. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, 10, 122–135.
- Prihhapso, Y., Farhanian, W., Suryani, D., & Nelfyenny. (2018). Pengukuran Nilai Colorimetry Lampu Penerangan Jalan Umum (PJU) Led Menggunakan Array-Spectroradiometer. *Jurnal Standardisasi Nasional*, 20(1), 49–56.
- Ramos-Méndez, J., *et al.* (2018). Monte Carlo simulation of chemistry following radiolysis with TOPAS-nBio. *Physics in Medicine and Biology*.
- Rosas, E., & Estrada-Hernández, A. (2016). Effect of photometric detector spectral response quality on white LED spectral mismatch correction factors. *Applied Optics*, 55(19), 5267.
- Shionoya, S., Yen, W. M., & Yamamoto, H. (2018). Phosphor Handbook. In M. J. Weber (Ed.), *CRC Press* (2nd ed.). CRC Press.
- Spunei, E., Piroi, I., & Chioncel, C. P. (2017). The experimental determination of the luminous flux emitted by a few types of lighting sources. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 163(1).

- Templ, M. (2016). *Simulation For Data Science With R*. PACKT Publishing.
- Wang, G., Yi, X., Zhan, T., & Huang, Y. (2019). The AlGaInP/AlGaAs Material System and Red/Yellow LED. In J. Li & G. Q. Zhang (Eds.), *Light-Emitting Diodes, Solid State Lighting Technology and Application Series 4* (4th ed., pp. 171–202). Springer.
- Zaroni, H., Maciel, L. B., Carvalho, D. B., & Pamplona, E. de O. (2019). Monte Carlo Simulation approach for economic risk analysis of an emergency energy generation system. *Energy*, 172, 498–508.
- Zhang, N., & Liu, Z. (2019). The InGaN Material System and Blue/Green Emitters. In J. Li & G. Q. Zhang (Eds.), *Light-Emitting Diodes, Solid State Lighting Technology and Application Series 4* (4th ed., pp. 203–243). Springer.
- Zissis, G., Bertoldi, P., & Serrenho, T. (2021). *Update on the status of LED-lighting world market since 2018, JRC Technical Report n° JRC122760*.