
PENGUKURAN NILAI *COLORIMETRY* LAMPU PENERANGAN JALAN UMUM (PJU) LED MENGGUNAKAN *ARRAY-SPECTRORADIOMETER*

Led Street Light Colorimetry Measurement Using Array-Spectroradiometer

Yonan Prihhapso, Wiwin Farhania, Dini Suryani, dan Nelfyenny

Pusat Penelitian Metrologi - LIPI
Kompleks PUSPIPTEK, Gedung 420 Setu, Tangerang Selatan
e-mail: yonan.prihhapso@gmail.com

Diterima: 21 Februari 2018, Direvisi: 20 Maret 2018, Disetujui: 21 Maret 2018

Abstrak

Lampu jalan LED memiliki nilai efikasi yang lebih tinggi dibandingkan lampu jalan tradisional. Konsekuensi dari efikasi yang tinggi pada suatu lampu adalah kualitas color rendering yang rendah. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengukur nilai colorimetry lampu penerangan jalan umum LED. Untuk mengukur kualitas warna dari suatu sumber cahaya digunakan array spectroradiometer. Selain portabilitas dan kecepatan dalam pengukuran spectral, instrument ini memiliki keterbatasan yang harus dikarakterisasi. Salah satunya adalah respon spektral yang memiliki dampak yang cukup besar dalam pengukuran karena itu membutuhkan nilai koreksi dalam penggunaannya. Array spectroradiometer dikalibrasi terhadap lampu spectral irradiance standar untuk pengukuran magnitude dan lampu atomic untuk pengukuran akurasi panjang gelombang. Metode analisis digunakan untuk mengimbangi besarnya pengukuran spectral dari array spectroradiometer yang disebabkan oleh pergeseran spectral. Factor koreksi selanjutnya dikoreksi terhadap beberapa illuminan standard dan digunakan untuk perhitungan rendering index dari lampu jalan LED. Lampu jalan LED dengan nilai efikasi tinggi dapat menghasilkan rendering index pada level 80, tiga kali lebih besar dibandingkan lampu jalan tradisional (HPS) yang hanya mampu menghasilkan rendering index pada level 25. Pada penelitian selanjutnya, dapat dilakukan pengukuran terkait dengan reproduktivitas pengukuran array spektrodiodometer yang dapat berdampak pada kualitas pengukuran color rendering.

Kata kunci: *Color Rendering Index (CRI)*, lampu penerangan jalan umum LED, *array spektrodiodometer*.

Abstract

LED Street light considered to have high efficacy compared to traditional street light. However there is a trade of from higher efficacy, which led to poor quality of color rendering. This research aims to measure the colorimetry value of LED street light. Array spectroradiometer commonly used to asses color quality of a light source. Aside from its portability and the speed of spectral measurement, this instruments has limitation that needs to be characterized. One that might have great effect is its spectral response, therefore correction needs to be applied. The array spectroradiometer calibrated against standard spectral irradiance lamp for its magnitude and atomic lamps for its wavelength accuracy. Analytical method applied to compensate the magnitude of spectral measurement of array spectroradiometer due to the spectral shift. The correction factor then validated against several standard illuminant, and applied to calculate rendering index of the LED Street light. With higher efficacy, LED Street light capable to produce rendering index in the level of 80 almost three times larger than traditional street light (HPS) that only can produce rendering index in the level of 25. Future study regarding the measurement reproducibility of an array spectrodiodometer is needed, since this problem will affect the measurement quality of color rendering.

Keyword: *Color Rendering Index(CRI)*, *LED street light*, *array spectroradiometer*.

1. PENDAHULUAN

Sumber penerangan *Solid State Lighting (SSL)* seperti LED telah banyak menggantikan sumber penerangan tradisional. Karakterisasi *performacolorimetry* seperti *colour rendering index (CRI)*, suhu warna *colour temperature (CCT)*, dan koordinat kromatisitas (*chromaticity coordinates*) dari sumber penerangan tipe ini

perlu dilakukan, karena pada umumnya LED memiliki nilai efikasi (lumen/Watt) yang tinggi. Sebuah sumber penerangan dengan nilai efikasi yang tinggi berakibat terhadap *performa colour rendering* yang rendah (Yoshi Ohno, 2006). Hal ini umumnya terjadi pada kasus sumber penerangan tipe *fluorescent* dan mungkin juga terjadi pada sumber penerangan LED.

Salah satu fungsi penerangan jalan (PJU) di kawasan perkotaan adalah menghasilkan kekontrasan antara objek dan permukaan jalan (BSN, 2008). Berdasarkan SNI 7391, salah satu jenis lampu jalan ditinjau dari karakteristik dan penggunaannya adalah lampu *High Pressure Sodium* (HPS). Lampu penerangan jalan umum (PJU) tipe HPS telah banyak digunakan untuk jalan tol, arteri, kolektor, persimpangan besar/luas, dan *interchange*. Lampu tipe HPS memiliki nilai efikasi yang cukup tinggi namun pengaruhnya terhadap warna objek (*colour rendering*) dinilai buruk. Saat ini terdapat lampu jenis LED yang mampu mendapatkan nilai efikasi pada rentang yang sama dengan daya yang jauh lebih rendah dari pada lampu PJU jenis HPS.

Dalam penelitian ini akan dibandingkan performa lampu PJU tipe LED dan HPS berdasarkan karakteristik nilai *colorimetry* terutama tingkat nilai *Colour Rendering Index*. Hal ini dilakukan untuk mengetahui apakah lampu PJU jenis LED mampu menggantikan lampu PJU jenis HPS baik dari efikasi maupun dari performa *colorimetry* lampu tersebut.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Dokumen IES LM-79 telah banyak dijadikan rujukan dalam pengujian dan pengukuran sumber penerangan yang berbasis SSL. Dalam dokumen ini disebutkan beberapa parameter kelistrikan maupun parameter fotometri yang perlu dilakukan pengukurannya. Informasi fotometri yang diperlukan dalam pengukuran produk-produk SSL antar lain adalah *total luminous flux* (lumens), *luminous efficacy* (lm/W), *luminous intensity* (candela), koordinat kromatisitas, CCT dan *colour rendering index* (Iesna, 2008). *Colour rendering index* (CRI) adalah ukuran tingkat kesamaan persepsi warna secara *psychophysical* dari sebuah objek ketika berada di bawah sumber tes dengan ketika berada di bawah sumber referensi yang sesuai dengan melakukan penyesuaian adaptasi kroma (*chromatic adaptation*) (AI, 2011).

Dapat diartikan bahwa warna dari sebuah objek dapat mengalami perubahan relatif terhadap pengamat, ketika dikenai sumber cahaya satu dengan ketika dikenai sumber cahaya lain seperti terlihat pada Gambar 1. CRI memiliki dampak yang tidak terlalu besar dalam penerangan jalan, terkecuali untuk area pusat perkotaan dan/atau area dengan jumlah pejalan kaki yang cukup banyak (CIE, 2007b). Hal ini karena pada area ini diperlukan pencahayaan dengan kualitas yang bagus sehingga mampu

mendukung penglihatan manusia, terutama untuk dapat membedakan warna dan detail dengan baik.



Gambar 1 Perbedaan persepsi warna (IES, *Whiteness of LED*).

Nilai CRI dapat dikalkulasi dengan menggunakan nilai *spectral power distribution* (SPD) dari sumber penerangan dengan memperhitungkan nilai *colorimetric observer*, \bar{x} , \bar{y} dan \bar{z} . Sebuah sumber penerangan yang memiliki tingkat nilai *rendering index* >90 dikategorikan memiliki tingkat *rendering* warna yang bagus (Hunt & Pointer, 2011).

Efisiensi energi sumber cahaya atau biasa dikenal sebagai *luminous efficacy* (efikasi sumber cahaya) biasanya diukur dalam lumens per watt (lm/W) yang dapat diartikan sebagai banyaknya cahaya yang dihasilkan oleh lampu setiap watt listrik yang dikonsumsi (Lingard, 2012). Tabel 1 menjelaskan mengenai perbandingan lampu penerangan jalan umum tipe HPS dan LED berdasarkan nilai efikasi yang mampu dihasilkan dengan penggunaan daya yang dibutuhkan oleh masing-masing jenis lampu.

Tabel 1 Nilai efikasi lampu PJU tipe HPS dan LED.

Tipe Lampu	Daya (Watt)	Luminous Flux (lumen)	Efikasi (lm/watt)
High Pressure Sodium (HPS)-I	452	47000	104
High Pressure Sodium (HPS)-II	453	48599	107
LED-I	118	13336	113
LED-II	64	8469	133

Kedua jenis lampu memiliki nilai efikasi yang hampir sama. Namun konsumsi daya yang dibutuhkan lampu LED jauh lebih sedikit dibandingkan dengan lampu HPS. Selain itu, LED cenderung lebih mudah dimanipulasi pada tingkat desain sehingga distribusi spektrumnya lebih mudah dikendalikan. Dengan kelebihan ini,

LED sangat mungkin untuk mempunyai tingkat *CRI* yang lebih tinggi dari lampu PJU tradisional.

3. METODE PENELITIAN

Nilai *spectral* sebuah sumber diukur dengan melakukan *scanning* panjang gelombang cahaya dari panjang gelombang 380 nm hingga 780 nm menggunakan *spectroradiometer*. *Array spectroradiometer* banyak menjadi pilihan karena kemampuannya dalam akuisisi data *spectral* dalam jumlah yang besar sehingga dapat mempercepat akuisisi data dengan tingkat sensitivitas yang tinggi (Gaigalas, Wang, He, & DeRose, 2009). Hal ini berkaitan dengan komponen optis pada sebuah *spectroradiometer*, pada umumnya komponen optis ini terdiri dari *optical input*, *entrance slit*, elemen dispersi optis (*grating*), serta detektor *array*. Komponen dispersi optis memungkinkan cahaya yang masuk pada *entrance slit* tersebar pada daerah yang berbeda pada detektor *array*, tergantung pada panjang gelombangnya (Zong, Brown, Johnson, Lykke, & Ohno, 2006). Pencacahan panjang gelombang menjadi sangat tergantung pada kemampuan komponen dispersi dan ukuran sensor *array*.

Ketika sebuah detektor *array* digunakan (baik tipe CCD atau CMOS) dalam sebuah *spectroradiometer*, setiap *pixel* dari detektor mewakili setiap panjang gelombang (Gigahertz-Optik Inc, n.d.). Sehingga ketika rentang pengukuran panjang gelombang semakin lebar maka jumlah *pixel* yang dibutuhkan pada detektor juga akan meningkat. Hal yang sama juga berlaku dengan *bandwidth* panjang gelombang, dengan *bandwidth* yang semakin kecil maka jumlah *pixel* detektor *array* juga akan meningkat. Persamaan (1) dapat digunakan untuk menentukan spesifikasi ukuran sensor sebuah *array-spectroradiometer*, sehingga didapatkan nilai akurasi panjang gelombang yang sesuai.

$$\text{pixelnumber} = \frac{\lambda_j - \lambda_i}{\text{bandwidth}} \times n \dots\dots\dots (1)$$

dengan :

- $\lambda_i - \lambda_j$: rentang *scanning* panjang gelombang dalam nm,
- n : jumlah *pixel* perpanjang gelombang (*pixel/nm*).

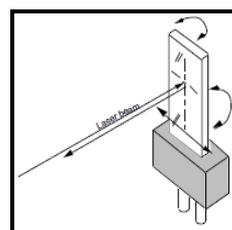
Komponen optis serta jumlah *pixel* dapat mempengaruhi kualitas hasil pengukuran SPD, dalam hal ini pergeseran penunjukan panjang gelombang (*wavelength shift*). Pergeseran penunjukan panjang gelombang dapat memberikan kesalahan pengukuran nilai

colorimetry, oleh karena itu perlu dilakukan pengukuran terhadap penunjukan panjang gelombang. Sebuah lampu *atomic* yang memiliki puncak-puncak gelombang yang tetap digunakan untuk melihat akurasi penunjukan dari *array spectroradiometer*, serta sebuah lampu *spectral Irradiance* (FEL) dengan daya 1000 W digunakan untuk mengkoreksi penunjukan tingkat *Irradiance* pada setiap panjang gelombang ($W/m^2.nm$) (Nevas, Lindemann, Sperling, Teuber, & Maass, 2009).

Sebuah *spectroradiometer* dari *International Light* yang memiliki sensor *photodiode array* 128 *pixel* digunakan untuk mengukur SPD sumber cahaya. Elemen dispersi instrumen ini menggunakan *grating* dengan akurasi panjang gelombang hingga $\pm 0,5$ nm, pada rentang ukur 380 nm – 780 nm. Instrumen ini memiliki *digital spectral resolution* sebesar 4,1 nm, sehingga dengan rentang pengukuran sebesar 400 nm area sensor untuk setiap panjang gelombangnya adalah 1,3 *pixel/nm*. *Dynamic range* pembacaan sensor ditentukan oleh nilai *electronic resolution* sebesar 14 bit, ketika sensor mendapatkan tegangan masukan sebesar 5 V pada tegangan maksimum koneksi USB mampu didapatkan pembacaan hingga tingkat 10^{-4} .

Akurasi panjang gelombang ditentukan oleh kemampuan sebuah *spectroradiometer* memisahkan dua puncak panjang gelombang saling berdekatan pada satu spektrum dengan intensitas yang sama, atau umumnya disebut dengan *Rayleigh Criterion* (JETI Technische Instrumente GmbH, 2005). Lampu *atomic* dengan elemen neon (Ne) digunakan untuk melihat penunjukan panjang gelombang *array spectroradiometer*, data pengukuran yang diperoleh akan digunakan untuk menentukan koreksi pergeseran panjang gelombang terukur.

Lampu tungsten 1000 W tipe FEL merupakan standar nilai *Irradiance* yang digunakan untuk melihat kesalahan penunjukan tingkat *Irradiance* yang terukur pada setiap panjang gelombang pada *array spectroradiometer*.



Gambar 2 Pelurusan posisi menggunakan *lampijig* (Yoshihiro Ohno, 1997).

Lampu ini memiliki tipe filamen dengan bentuk *coiled-coil* dengan gelas dari bahan *quartz*, dasar lampu merupakan *medium bi-post* (G22) yang memungkinkan filamen selalu berada ditempat yang sama pada setiap pemasangan. *Array spectroradiometer* diletakkan pada jarak 0,5 m dari titik tengah filamen lampu, penempatan lampu dapat dilakukan dengan bantuan *lampjig* seperti pada Gambar 2.

Penuaan lampu (*seasoning*) merupakan hal yang sangat penting, karena akan mempengaruhi kestabilan sumber cahaya. Lampu FEL dinyalakan menggunakan sumber tegangan DC pada nilai arus 7,900A dan tegangan sebesar 107,67 volt. Nilai *spectral Irradiance* Lampu FEL dari panjang gelombang 250nm hingga 1100nm, dengan lebar interval panjang gelombang ($\Delta\lambda$) sebesar 5 nm. Penggunaan $\Delta\lambda$ pada pengukuran SPD sebesar 10 nm atau 20 nm tidak direkomendasikan, hal ini dikarenakan akan menyebabkan penurunan akurasi yang cukup besar dan jika dipergunakan harus diperiksa untuk spektrum-spektrum khusus (CIE Division 1, 2004).

Simulasi menunjukkan tingkat kesalahan perhitungan *colorimetric* ketika menggunakan interval panjang gelombang 5 nm ($<0,03$ in ΔE_{ab}^*), sedangkan pada interval 10 nm ($<0,15\Delta E_{ab}^*$) dan pada interval 20 nm ($\approx 1\Delta E_{ab}^*$) (CIE, 2007a).

Nilai *CRI* lampu PJU dikalkulasi dari data SPD hasil pengukuran menggunakan *array spectroradiometer* yang telah dikoreksi. Sebuah sumber cahaya referensi diperlukan dalam menentukan nilai *CRI*, untuk itu dihitung nilai *colorimetry* berdasarkan SPD tersebut mengikuti *flowchart* pada Gambar 3a. Nilai *colorimetry* ini adalah koordinat kromatisitas *x, y, z* serta nilai *correlated color temperature* (CCT) dari lampu PJU. Berdasarkan CIE 13.3:1995, nilai *CRI* dihitung dari jarak koordinat kromatisitas dalam skala CIE $U^*V^*W^*$ antara delapan buah sampel warna Munsell, terhadap sumber cahaya referensi yang apabila sumber tes memiliki CCT dibawah 5000 K adalah Planckian radiator akan tetapi bila sumber tes memiliki CCT >5000 K maka sumber referensi adalah CIE-D *illuminant* (CIE Division 1, 1995). Faktor radiansi spectral dari delapan buah sampel warna Munsell dapat dilihat pada gambar 3b, dan nilai *CRI* (R_a) dihitung menggunakan persamaan 2.

$$R_a = 100 - 4.6d_i$$

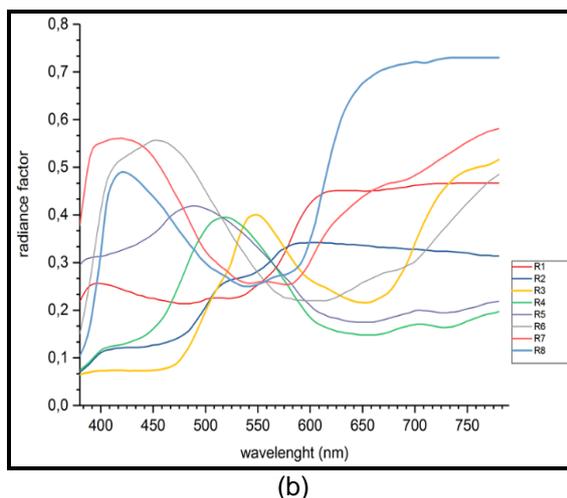
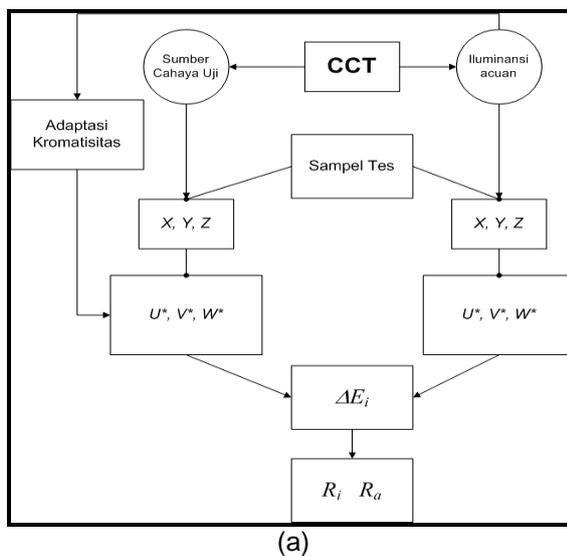
$$R_a = 100 - 4.6 \left(\frac{d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + d_5 + d_6 + d_7 + d_8}{8} \right) \dots\dots(2)$$

dimana:

d_i : jarak koordinat kromatisitas dalam skala $U^*V^*W^*$

d_1-d_8 : jarak koordinat kromatisitas dari masing-masing sampel warna.

Ketidakpastian pengukuran pada *CRI* mengacu pada metode yang digunakan oleh Y. Ohno (Y. Ohno, 2001), di mana nilai-nilai ketidakpastian baku didapatkan secara eksperimental. Diasumsikan semua komponen penyusun ketidakpastian pengukuran tidak saling berkorelasi, dan memiliki *probability distribution function* (PDF) *rectangular*.

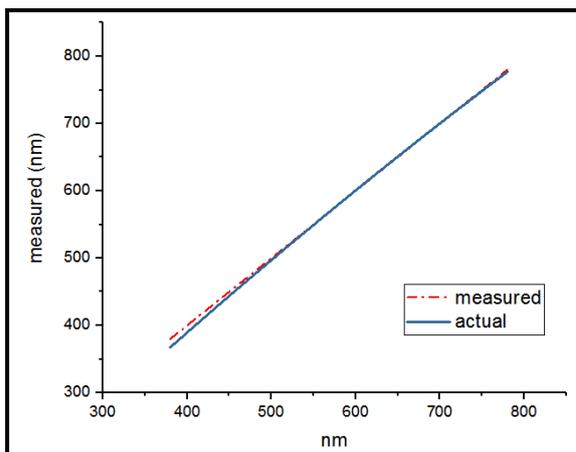


Gambar 3 Kalkulasi nilai *CRI*. a) *Flowchart* kalkulasi nilai *CRI*, b) *Spectral radiance factor* sampel warna Munsell.

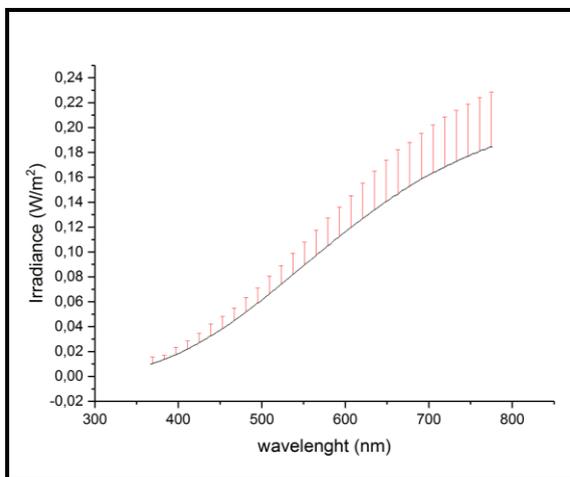
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengukuran penunjukan panjang gelombang *array spectroradiometer* dibanding-

kan dengan puncak-puncak spektrum lampu *atomic* Ne seperti terlihat pada Tabel 2. Hasil pengukuran panjang gelombang menunjukkan perbedaan dengan nilai puncak spektrum Ne, hal ini merupakan indikasi penunjukkan *array spectroradiometer* mengalami pergeseran. Pergeseran puncak panjang gelombang ini dapat mengakibatkan pergeseran penunjukkan nilai *Irradiance* ketika digunakan untuk mengukur SPD sebuah sumber cahaya, dalam hal ini lampu PJU. Hasil *plotting* data pengukuran dapat dilihat pada gambar berikut :



(a)



(b)

Gambar 4 a) *Fitting* hasil pengukuran spektrum Ne (kiri), b) Koreksi penunjukan tingkat *Irradiance* (kanan).

Gambar 4a, dimana terdapat selisih penunjukan panjang gelombang yang signifikan pada daerah panjang gelombang 800 nm dan terutama pada panjang gelombang bawah di sekitar panjang gelombang 400 nm. Kesalahan ini mencapai 1% pada daerah 800 nm dan 4% pada daerah 400 nm atau senilai 13 nm, akibatnya terdapat beberapa penunjukan

panjang gelombang yang hilang. Hilangnya beberapa nominal panjang gelombang ini mengakibatkan data spectra yang seharusnya memiliki interval $\Delta\lambda$ 5 nm menjadi acak atau $\Delta\lambda$ menjadi bervariasi.

Perhitungan nilai CRI diawali dengan perhitungan nilai CCT seperti pada Gambar 3a. Dalam perhitungan CCT, digunakan nilai interval antar panjang gelombang sebesar $\Delta\lambda$ 5 nm. Akan tetapi, karena urutan panjang gelombang menjadi acak karena pergeseran penunjukan *array spectroradiometer* sehingga perhitungan CCT menjadi tidak bisa dilakukan karena panjang gelombang yang diperlukan tidak terukur. Digunakan interpolasi linier terhadap penunjukan panjang gelombang dengan metode *cubic spline* untuk mendapatkan persamaan *curve fitting*, sehingga didapatkan nilai koreksi untuk setiap panjang gelombang. Interpolasi dilakukan dengan interval $\Delta\lambda$ 1 nm dari panjang gelombang 360 nm hingga 780 nm dengan akurasi nilai hingga 0,07%.

Tabel 2 Hasil pengukuran spektrum Ne.

Spektrum Neon (nm)	Penunjukan <i>array spectroradiometer</i> (nm)
588,2	588
614,3	613
640,2	640
653,3	652
671,7	670
693,0	693
703,2	704
724,5	725
743,9	745

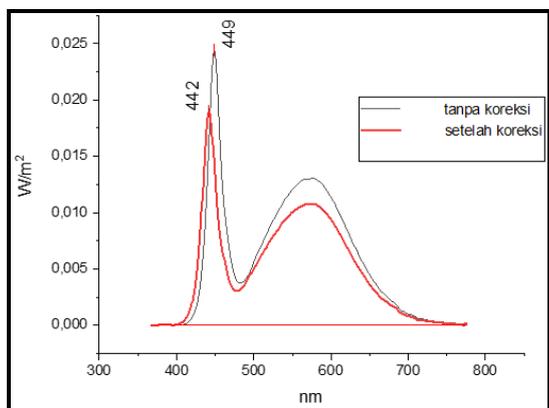
Nilai *Irradiance* didapatkan dari lampu FEL pada setiap panjang gelombang ($W/m^2 \cdot nm$) dengan $\Delta\lambda$ 5 m dari rentang 250 nm hingga 1050 nm. Dalam perhitungan CRI rentang panjang gelombang yang digunakan antara 380 nm hingga 780 nm rentang ini pada umumnya digunakan dalam perhitungan nilai *colorimetry*. Hasil analisa penunjukkan panjang gelombang menggunakan lampu *atomic* Ne menunjukkan bahwa terjadi pergeseran penunjukan panjang gelombang, sehingga penunjukan *array spectroradiometer* tidak dimulai dari panjang gelombang 380 nm tetapi dari 367 nm hingga 776 nm. Oleh karena itu, digunakan nilai

Irradiance dari lampu FEL dari rentang 365 nm hingga 780 nm dengan interval $\Delta\lambda$ 5 nm. Koreksi penunjukkan tingkat *Irradiance* pada setiap panjang gelombang dilakukan dengan menggunakan persamaan (3).

$$mCorrect = \frac{Reading.Inst}{std.lamp} \dots\dots\dots(3)$$

dimana :
 mCorrect : rasio penunjukkan tingkat *Irradiance* ($W/m^2.nm$) dari array *spectroradiometer* dengan tingkat *Irradiance* ($W/m^2.nm$) dari lampu standar FEL, dan merupakan faktor kalibrasi untuk array *spectroradiometer* pada setiap panjang gelombang.

Data hasil interpolasi kemudian divalidasi terhadap lampu standar dengan tingkat kesalahan perhitungan parameter nilai *colorimetry* lebih kecil dari 0,1%. Profil SPD hasil respon pengukuran array *spectroradiometer* ditunjukkan pada Gambar 4b, grafik merupakan nilai setelah dikoreksi sedangkan garis vertikal merupakan nilai kesalahan terhadap nilai SPD hasil pengukuran array *spectroradiometer*.



Gambar 5 SPD lampu PJU LED.

Array *spectroradiometer* digunakan untuk mengukur SPD lampu PJU, dalam penelitian ini digunakan 2 buah sampel lampu PJU jenis HPS berdaya 400 W sedangkan untuk jenis LED digunakan LED-I dengan daya 118 W dan LED-II dengan daya 64 W. Hasil pengukuran profil SPD lampu PJU dilihat pada Gambar 5. Untuk PJU jenis LED 2 sebagai contoh, ketika koreksi tidak dilakukan maka penunjukan puncak maksimum SPD dari LED akan bergeser sejauh 7 nm menjadi 449 nm dari yang seharusnya 442 nm.

Hal ini terjadi karena panjang gelombang yang paling dominan pada LED berada pada panjang gelombang <500 nm, sedangkan dari hasil pengukuran diketahui pada daerah ini mengalami pergeseran panjang gelombang

sebesar 4%. Luasan area SPD juga lebih sempit setelah dibandingkan dengan sebelum dikoreksi nilai *Irradiance*-nya, sehingga bisa dikatakan bahwa ketika nilai *Irradiance* tidak dikoreksi perhitungan nilai CRI akan mengalami *over estimate*.

Hasil pengukuran nilai *colorimetry* lampu PJU dapat dilihat pada Tabel 3 dan 4, data pada table menunjukkan lampu jenis HPS tidak mengalami pergeseran penunjukkan puncak panjang gelombang, karena puncak panjang gelombang berada pada daerah linier. Nilai CCT lampu PJU di hitung menggunakan nilai SPD sehingga pergeseran nilai SPD akan sangat mempengaruhi nilai CCT. Dikarenakan lampu PJU tipe HPS tidak mengalami pergeseran puncak panjang gelombang sehingga nilai perhitungan CCT setelah nilai SPD dikoreksi tidak mengalami perubahan yang signifikan, berbeda dengan lampu PJU jenis LED.

Tabel 3 Nilai *colorimetry* lampu PJU HPS dan LED sebelum koreksi.

Parameter	Lampu PJU			
	HPS-I	HPS-II	LED-I	LED-II
CCT (K)	2062,9	2055,5	6804,1	5363,9
CRI (Ra)	24,72	28,24	79,91	75,12
Peak (nm)	599	599	451	449

Tabel 4 Nilai *colorimetry* lampu PJU HPS dan LED setelah koreksi.

Parameter	Lampu PJU			
	HPS-I	HPS-II	LED-I	LED-II
CCT (K)	2104,5	2097,6	6732,9	5407,5
CRI (Ra)	24,95	28,47	77,35	73,75
Peak (nm)	599	599	444	442

Apabila mengikuti *flowchart* perhitungan nilai CRI pada Gambar 3a diketahui bahwa perubahan nilai CCT memiliki korelasi positif terhadap nilai CRI, dimana semakin besar deviasi nilai CCT maka semakin besar pula deviasi nilai CRI yang didapat. Hal ini dikarenakan nilai CCT digunakan untuk menentukan sumber referensi pada perhitungan CRI, nilai CCT sumber referensi bisa didapatkan dari *Planckian radiator* ataupun dari CIE *D-illuminant*.

Ketika nilai CCT lampu PJU telah diketahui maka sumber referensi diambil sesuai dengan nilai-nilai tristimulus X, Y, Z yang setara.

Nilai CRI dihitung dengan mengkonversi nilai tristimulus ke *color space* U^* , V^* , W^* , sehingga didapatkan nilai respon sumber terhadap delapan buah sample warna Munsell. Perbedaan perhitungan nilai *colorimetry* sebelum dan setelah koreksi pada lampu PJU dapat dilihat pada Tabel 3 dan Tabel 4, perbedaan tingkat CRI pada lampu PJU LED masing-masing sebesar 3% untuk LED 1, 2% untuk LED 2 dan hanya 1% pada lampu PJU jenis HPS.

Ketidakpastian pengukuran dihitung menggunakan metode eskperimental dengan memperhatikan beberapa komponen yang memberi kontribusi terhadap nilai ketidakpastian pengukuran nilai CRI. Komponen *spectral Irradiance standard lamp* ditentukan pada batasan toleransi ketidakpastian dari sertifikat lampu FEL sebesar 2,5 % hingga 1,4 % dengan faktor cakupan $k=2$ pada rentang panjang gelombang dari 365 nm hingga 780 nm.

Perubahan nilai koordinat kromatisitas x , y dan nilai CRI pada perubahan nilai sebesar toleransi digunakan sebagai nilai dari komponen ketidakpastian. Komponen *aging of standard lamp* ditentukan pada batasan toleransi perubahan nilai CCT dari lampu FEL dalam rentang *burning time* 50 jam, yaitu sebesar 3 K. Batasan toleransi komponen *wavelength* didapatkan dari standar deviasi penunjukkan panjang gelombang *array spectroradiometer*. Komponen *ambient temperature* bernilai nol atau *negligible* karena *array spectroradiometer* memiliki kestabilan yang tinggi, dengan toleransi penggunaan pada rentang $10\text{ }^{\circ}\text{C} - 40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tabel 5 Ketidakpastian pengukuran CRI lampu PJU.

Components	$u(\Delta x)$	$u(\Delta y)$	$u(\Delta Ra)$
<i>Spectral Irradiance standard lamp</i>	0.00028	0.00014	0.014
<i>Aging of standard lamp</i>	0.00019	0.00007	0.00016
<i>Wavelength</i>	0.00059	0.00072	1.5
<i>Reproducibility</i>	0.00013	0.00016	0.025
<i>Non-linearity of spectroradiometer</i>	0.00075	0.00029	0.23
<i>Band pass filter</i>	0.00006	0.00012	0.058
<i>Ambient temperature</i>	0.0	0.0	0.0
<i>Current setting</i>	0.0	0.0	0.0

Components	$u(\Delta x)$	$u(\Delta y)$	$u(\Delta Ra)$
<i>combined uncertainty (u_c)</i>	0.002	0.003	1.5
<i>expanded uncertainty, $k=2$ (U)</i>	0.005	0.006	3

Nilai *current setting* bernilai nol, karena nilai ketidakpastiannya sudah termasuk dalam komponen *reproducibility*, komponen ini dicantumkan karena pada umumnya ketidakpastian pengukuran sumber cahaya sangat dipengaruhi oleh arus/tegangan pada lampu. Hasil perhitungan ketidakpastian pengukuran dapat dilihat pada Tabel 5.

5. KESIMPULAN

Lampu PJU tipe LED memiliki nilai efikasi yang lebih tinggi dari lampu HPS. Selain itu lampu tipe ini memiliki nilai *colour rendering index* (R_a) tiga kali lebih tinggi dari jenis lampu HPS. Pada tingkat efikasi yang hampir sama lampu PJU jenis HPS mampu menghasilkan nilai *colour rendering index* pada tingkat 25-29 sedangkan lampu PJU jenis LED mampu menghasilkan nilai *colour rendering* pada tingkat 74-77. PuslitMetrologi LIPI mampu melakukan pengukuran nilai *colorimetry* lampu PJU yang tertelusur melalui lampu *spectral Irradiance FEL* 1000 W, dengan tingkat ketidakpastian pengukuran koordinat kromatisitas sebesar $x : \pm 0,005$; $y : \pm 0,006$ dan *colour rendering index* (CRI) $R_a : \pm 3$.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih Pak Achalik, dan rekan-rekan laboratorium Radiometri Fotometri atas bantuan teknis dan dukungannya.

DAFTAR PUSTAKA

- AI, E. (2011). *ILV: International Lighting Vocabulary*. CIE.
- Badan Standardisasi Nasional (BSN). (2008). *SNI 7391:2008 - Spesifikasi Penerangan Jalan di Kawasan Perkotaan*. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.
- CIE. (2007a). *Colorimetry: Understanding the CIE System*. (J. Schanda, Ed.). Canada: Wiley.
- CIE. (2007b). Road transport lighting for

- developing countries, 50.
<https://doi.org/ISBN 978 3 901 906 61 9>
- CIE Division 1. (1995). *CIE 013.3: Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources*.
- CIE Division 1. (2004). *CIE 15:24 Colorimetry, 3rd edition. CIE Technical Report (Vol. 552)*. <https://doi.org/ISBN 3 901 906 33 9>
- Gaigalas, A. K., Wang, L., He, H.-J., & DeRose, P. (2009). Procedures for Wavelength Calibration and Spectral Response Correction of CCD Array Spectrometers. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 114(4), 215.
<https://doi.org/10.6028/jres.114.015>
- Gigahertz-Optik Inc. (n.d.). Basic of light measurement. Retrieved from <https://www.gigahertz-optik.de/en-us/basics-light-measurement/spectroradiometers/parameters/>
- Hunt, R. W. ., & Pointer, M. . (2011). *Measuring Colour, 4th edition*. (M. A. Kriss, Ed.) (4th ed.). West Sussex: Wiley-IS&T.
- Iesna. (2008). IES Approved Method: Electrical and Photometric Measurements of Solid-State Lighting Products. IES LM-79-80. *IES Subcommittee on Solid-State Lighting of the IES Testing Procedures Committee*, 16. <https://doi.org/ISBN 978-0-87995-226-6>
- JETI Technische Instrumente GmbH. (2005). Basics of Spectral Measurement. *Measurement*, (May), 1–53.
- Lingard, R. (2012). *Energy Efficiency of White LEDs*. Pacific Northwest National Laboratory. Energy Efficiency and Renewable Energy, US Department of Energy.
- Nevas, S., Lindemann, M., Sperling, A., Teuber, A., & Maass, R. (2009). Colorimetry of LEDs with Array Spectroradiometers. *Mapan - Journal of Metrology Society of India*, 24(3), 153–162.
<https://doi.org/10.1007/s12647-009-0019-5>
- Ohno, Y. (1997). Nist Measurement Services : Photometric Calibrations. *NIST Special Publication 250-37*.
- Ohno, Y. (2001). Numerical Method for Colour Uncertainty. *Proceedings CIE Expert Symposium on Uncertainty Evaluation*, 8–11.
- Ohno, Y. (2006). Optical metrology for LEDs and solid state lighting. *Proc. SPIE*, 6046, 604621–604625.
<https://doi.org/10.1117/12.674617>
- Zong, Y., Brown, S. W., Johnson, B. C., Lykke, K. R., & Ohno, Y. (2006). Simple spectral stray light correction method for array spectroradiometers. *Applied Optics*, 45(6), 1111–1119.
<https://doi.org/10.1364/AO.45.001111>