PEMANFAATAN *REMOTE SOURCE SOLAR LIGHTING* (RSSL) UNTUK PENGHEMATAN ENERGI DI GEDUNG KOMERSIAL

Application of Remote Source Solar Lighting for Energy Saving in Commercial Building

Suryo Busono dan Edi Hilmawan

Pusat Teknologi Konversi dan Konservasi Energi (PTKKE)

Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT)

Gedung 625, Kawasan Puspiptek, Tangerang Selatan

Tel. (021) 75791366

e-mail : suryo.busono@bppt.go.id

Diterima: 20 Agustus 2015; Diperiksa: 7 September 2015; Revisi: 22 September 2015; Disetujui: 5 Oktober 2015

Abstract

Remote Source Solar Lighting (RSSL) is an innovation in lighting technology in the building to transfer natural light into areas which are not covered by conventional natural lighting techniques. In this study, RSSL applications in an Office Building in the Puspiptek Area Tangsel has been examined. Measurement and simulation are used evaluate the effectiveness of the use of RSSL in illuminating areas that do not have access to outside light. Advanced simulation was conducted to compare the use of artificial light to produce the same illumination level. The measurement results show that the Solar Light Collector combined with Light Tube is able to transfer light from the outside into the room with a level of efficiency of 39.48%. Utilization of light focusing module can improve the efficiency of light distribution with an efficiency of up to 56.1%. The simulation results show that RSSL with light tube diameter of 35 cm, capable of illuminating an area that does not have access to the outside with illumination level up to 219 Lux at the zenith illumination of 89000 Lux. However, RSSL is no longer effective when the zenith illumination down to 26000 Lux. Comparison between CFL bulbs with RSSL, with the same lighting point, when the zenith illumination level is average or higher, RSSL provide lighting levels on par with CFL bulbs, but still lower than the LED lights. When the zenith illumination is low / minimal then 14 points RSSL only able to provide lighting equivalent to 8 points CFL.

Key Words: *Energy conservation in commercial building, smart building, natural lighting, Remote Source Solar Lighting*

Abstrak

Teknologi *Remote Source Solar Lighting* (RSSL) merupakan inovasi dalam sistem pencahayaan di gedung untuk menyalurkan cahaya alami ke dalam area-area yang dengan teknik konvensional tidak memungkinkan. Dalam penelitian ini dilakukan kajian aplikasi RSSL ke dalam salah satu ruang di Gedung Perkantoran di Kawasan Puspiptek Tangsel. Pengukuran dan simulasi digunakan untuk melihat efektivitas pemanfaatan RSSL dalam menerangi area-area yang tidak memiliki akses terhadap cahaya luar. Simulasi lanjutan dilakukan untuk membandingkan penggunaan cahaya lampu artifisial untuk menghasilkan tingkat pencahayaan yang sama. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa *Solar Light Collector* yang dikombinasikan dengan *Light Tube* mampu menyalurkan cahaya dari luar ke dalam ruangan dengan tingkat efisiensi 39,48%. Pemanfaatan modul penyearah cahaya dapat meningkatkan efisiensi penyaluran cahaya hingga 56,1%. Hasil simulasi menunjukkan bahwa RSSL dengan tabung cahaya berdiameter 35 cm, mampu menerangi area yang tidak memiliki akses terhadap cahaya luar dengan tingkat penerangan sampai dengan 219 Lux pada saat tingkat iluminasi langit sebesar 89000 Lux. Akan tetapi RSSL menjadi tidak lagi efektif pada saat iluminasi langit turun hingga 26000 Lux. Jika dibandingkan antara lampu CFL dengan RSSL, dengan jumlah titik lampu yang sama, maka pada saat kondisi iluminasi langit rata-rata atau tinggi, RSSL memberikan tingkat pencahayaan yang setara dengan lampu CFL, namun masih lebih rendah daripada lampu LED. Pada saat iluminasi langit rendah/minimal maka 14 titik RSSL hanya mampu menyediakan penerangan setara dengan 8 titik CFL.

Kata Kunci: *Konservasi Energi Gedung Komersial, Smart Building, Pencahayaan Alami, Remote Source Solar Lighting*

1. PENDAHULUAN

Sektor komersial mengkonsumsi energi listrik 24% dari total penggunaan energi listrik nasional (Sugiyono, 2015). Tipikal penggunaan energi listrik di sektor komersial dapat dilihat pada Gambar 1 (Hilmawan, 2008). Dapat dilihat pada Gambar 1 bahwa pengguna energi listrik terbesar di sektor komersial adalah untuk Sistem Tata Udara (47-65%) dan disusul untuk Sistem Tata Cahaya (15-26%). Oleh karena itu penghematan energi di sistem tata cahaya memiliki dampak yang signifikan dalam kaitannya dengan melakukan konservasi energi secara nasional.

Pemanfaatan cahaya alami (*natural lighting*) adalah salah satu cara yang umum dilakukan untuk menghemat energi. Disain gedung yang baik, mampu menyalurkan cahaya matahari dari luar secara efektif untuk menerangi ruangan di dalam gedung. Sekalipun demikian, untuk area-area yang secara arsitektural tidak memungkinkan untuk memiliki akses terhadap sumber cahaya alami, seperti kaca jendela, yang berbatasan langsung dengan dinding luar ataupun atrium, sulit untuk dapat memanfaatkan sumber cahaya alami. Setidaknya ada 3 strategi agar cahaya alami dapat dimanfaatkan secara efektif dan inovatif (Mayhoub, 2014), yaitu:

- Memperbaiki teknik pencahayaan alami yang konvensional; melalui pemanfaatan material-material optik, elemen dan perangkat lainnya seperti: *overhangs*, *lightshelves*, *louvres*, *blinds*, *screens*, dan *lightfilters*. Penggunaan teknik-teknik tersebut selain dapat mengurangi masalah-masalah pencahayaan dan mengirim cahaya lebih banyak ke dalam ruangan, dapat juga memperbaiki tingkat keseragaman pencahayaan di dalam ruangan.
- Mengembangkan sistem kaca (*glazing systems*); yang mampu meneruskan cahaya akan tetapi membatasi panas dikirim dari luar ruangan ke dalam ruangan. Hal ini dapat dilakukan dengan cara mengganti komposisi kimia kaca, misalnya *tinted glazing*, *chromogenic glass* (Macrelli, 1998), dan *aerogel* (Schultz, 2005), atau melapisi kaca dengan material pelapis yang selektif dalam meneruskan cahaya (Lee, 1998), atau dengan merakit beberapa jenis kaca dan mengatur jarak di antaranya (Hootman, 2012 and Laar, 2002).
- Mengembangkan sistem pencahayaan alami yang inovatif; dengan fokus pada bagaimana mengirim cahaya ke ruangan yang tidak memiliki jendela atau akses langsung terhadap sinar matahari dari sumber yang terpisah. Teknik ini disebut dengan Pencahayaan Surya Sumber Jarak Jauh, atau *Remote Source Solar Lighting* (RSSL) (Ayers, 1995).

RSSL menggunakan cahaya matahari sebagai sumber untuk menerangi area jauh ke dalam

gedung melalui suatu perangkat pemandu yang biasanya berupa Pipa Cahaya Logam (Metal Light Pipe, MLP) atau Pipa Cahaya Prisma (*Prismatic Light Pipe*, PLP) (Whitehead, 1998). Pemanfaatan RSSL untuk menerangi gedung perkantoran, salah satunya digunakan untuk penerangan di Waterfront House di Kuala Lumpur, Malaysia (Wong, 2011). Sistem yang dibuat menggunakan media pengirim cahaya terdiri dari *Laser Cut Panel Light Deflector* (LCP) dan MLP dengan lebar 2m, tinggi 0,8m dan panjang 20m. LCP mengumpulkan dan mengarahkan cahaya sebelum masuk ke MLP yang kemudian akan mengirim dan mendistribusikan penerangan ke dalam ruangan. Sistem yang serupa diujicobakan juga di Hongkong dengan menggunakan Pipa Cahaya Horizontal (*Horizontal Light Pipe*) (Wong, 2010). Dengan teknik tersebut, cahaya dari luar dapat dikirim masuk untuk menerangi area di kedalaman 5-10 m dengan tingkat pencahayaan mencapai 300 lx tanpa menggunakan lampu listrik selama 4-6 jam. Hasil simulasi lanjutan menunjukkan bahwa sistem RSSL, yang terdiri dari cermin, lensa cembung dan *side-emitting Fiber Optic* (FO) mampu menyalurkan cahaya matahari dengan *overall transmittance efficiency* mencapai 39% dan intensitas cahaya yang dihasilkan mencapai 733 lm/m², jauh di atas nilai 150 lm/m² yang direkomendasikan untuk ruangan lobby (Wong, 2012). Pada saat pengukuran RSSL yang terpasang di lobby mampu menyediakan pencahayaan di kisaran 150 - 300 lm/m² antara pukul 10:30 and 14:30 dengan intensitas cahaya luar minimal 35,000 lm/m².

Gambar 1. Tipikal penggunaan energi listrik di sektor komersial

Beberapa penelitian tentang pemanfaatan Serat Optik (FO) untuk RSSL juga dibahas oleh Kandilli dalam reviewnya terhadap beberapa studi terkait pemanfaatan Serat Optik sebagai media penghantar energy surya terkonsentrasi (Kandilli, 2009). Kandilli menemukan bahwa efisiensi optik sistem dapat mencapai 68% dalam kondisi paling optimal, sedangkan efisiensi sistem total mencapai 59%. Dilihat dari metoda pengumpulan cahaya, maka model *offset paraboloidal disk* lebih mampu mengumpulkan energi dibandingkan dengan yang simetris dengan selisih sekitar 0,82%.

Pada penelitian ini dikaji mengenai pemanfaatan *Remote Source Solar Lighting* (RSSL) untuk menyalurkan cahaya alami ke salah

Gambar 2. Konsep Desain Sistem RSSL

satu ruangan di Gedung Perkantoran di Kawasan Puspipetek Tangsel. Pengukuran dan simulasi digunakan untuk melihat efektifitas pemanfaatan RSSL dalam menerangi area-area yang tidak memiliki akses terhadap cahaya luar. Perbandingan efektifitas pencahayaan dan penghematan energi dilakukan dengan simulasi pencahayaan menggunakan lampu *Compact Fluoresence Lamp* (CFL) dan lampu LED.

2. BAHAN DAN METODE

2.1. Disain dan Instalasi Sistem

Sistem RSSL dalam penelitian ini didisain terdiri dari Pengumpul Cahaya (*Solar Light Collector*, SLC), Modul Penyearah Cahaya (*Light Focusing Module*, LFM), Tabung Cahaya (*Light Tube*, LT) dan Panel Penerangan (*Illumination Panel*, IP), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2. Gambar 3 menunjukkan disain instalasi sistem RSSL yang dipasang di Gedung 625, Kawasan Puspipetek, Tangsel.

Sebagai modul SLC dan LT, digunakan Solatube® (selanjutnya ditulis Solatube) untuk menghantarkan cahaya matahari dari luar ke ruang instalasi di lantai 3 Gd 625, kawasan Puspipetek, Tangsel. Solatube terdiri dari 3 bagian yakni *Dome*, *Extension* dan *Bottom*. Bagian *Dome* berfungsi sebagai modul pengumpul cahaya (SLC), bagian *Extension* (diamater 35cm) berfungsi sebagai tabung cahaya yang meneruskan cahaya yang sudah dikumpulkan di bagian *Dome* ke lokasi yang diinginkan. Bagian *Bottom* hanya terdiri dari Panel Penerangan yang terbuat dari plastik akrilik. Untuk keperluan penelitian, Di bagian *bottom* dipasang modul penyearah cahaya atau *Light Focusing Module*. dihubungkan ke ruang yang diinginkan. Dalam penelitian ini, dilakukan pengukuran.

Gambar 3. Desain dan Instalasi Sistem RSSL di Gedung 625, Puspipetek

Adapun spesifikasi Solatube yang dipakai adalah sebagai berikut.

1. *Dome Type: Solatube® 750 DS Daylighting System*
 - *Size* : 35 cm
 - *Visible Transmission (Vt)*: 60%
 - *Solar Heat Gain Coefficient (SHGC)*: 0,2
 - *Vt/SHGC* : 3,00
2. *Extension Tube (Light tube):*
 - *Tube Diameter* : 35 cm
 - *Specular reflectance for visible spectrum* (400 nm to 760 nm): > 99%;
 - *Total solar spectrum* (400 nm to 2500 nm): < 93%.

Gambar 4. Tampak Instalasi Sistem RSSL di Gedung 625, Puspipstek

2.2. Pengukuran

Pengukuran dilakukan untuk menguji kemampuan sistem RSSL, mulai dari komponen SLC, LT dan LFM, dalam mengirim cahaya dari luar ke dalam ruangan, dengan metodologi sebagai berikut:

2.2.1. Pengkondisian sistem

- Pengukuran intensitas cahaya dilakukan pada sisi indoor (mulut Solatube) dan outdoor (*dome* Solatube).
- Di sisi outdoor pengukuran intensitas cahaya dilakukan tanpa perlakuan khusus.
- Pada sisi indoor, alat ukur dipasang pada tengah-tengah panel yang dilapisi dengan kertas hitam supaya cahaya yang diukur adalah murni cahaya yang berasal dari refleksi oleh dinding.

2.2.2. Pengukuran

- Parameter pengukuran : Intensitas cahaya (lux)
- Titik pengukuran
 - *Indoor*: pada titik tengah garis sumbu keluaran solatube.
 - *Outdoor*: lokasi *dome* Solatube.
- Waktu pengukuran
 - Data intensitas cahaya *indoor* dan *outdoor* diambil pada waktu yang bersamaan
 - Waktu pengukuran pukul 09.00 – 15.00
- Alat ukur
 - Luxmeter Extech 407026, spesifikasi:
Simultaneous disp.
FcRange: 200.0, 2000, 5000 Fc
LuxRange: 2000, 20,000, 50,000Lux
"ZERO" Re-Calibration
Accuracy : $\pm 4\%$

2.3. Simulasi

2.3.1. Perangkat Lunak

Simulasi dilakukan dengan *software Design Builder V 4.5* untuk perhitungan *Daylighting* dan menggunakan *Dialux V. 4.12* untuk perhitungan pencahayaan menggunakan CFL dan LED

2.3.2. Pemodelan Sistem

A. Pemodelan Pencahayaan RSSL

Model dibangun berdasarkan gambar tapak ruangan di Lt 2 Gd 625 (*As Built*) yang disesuaikan

(Gambar 6). Zona yang menjadi obyek simulasi adalah bagian Lorong, dimana tidak memiliki akses terhadap cahaya luar.

Sumber pencahayaan: sebagai sumber cahaya digunakan analogi Solatube dengan Jendela dengan ukuran dan karakteristik SHGC sesuai spesifikasi dan *Visible Light Transmission* menggunakan hasil pengukuran Luxmeter.

Pencahayaan Langit (*Zenith Illumination*) disesuaikan dengan hasil pengukuran di lokasi Solar Light Collector dan diasumsikan seragam untuk semua titik.

Gambar 5. Peletakan alat ukur dan kondisi pengukuran di sisi indoor

Gambar 6. Denah Lt. 2 Gd 625 dan letak titik lampu pada lorong saat ini (14 titik)

B. Pemodelan Pencahayaan CFL dan LED
Pemodelan untuk pencahayaan buatan menggunakan CFL menggunakan spesifikasi lampu sebagai berikut:

- PHILIPS FBS122 1xPL-C/2P13W PG
- Luminous flux (*Luminaire*): 522 lm
- Luminous flux (*Lamps*): 900 lm
- Luminaire Wattage: 17.3 W
- Fitting: 1 x PL-C/2P13W/840 (Correction Factor 1.000).

Adapun pemodelan untuk pencahayaan buatan menggunakan lampu LED sebagai berikut:

- PHILIPS DN450B 1xDLM1100/840
- Luminous flux (*Luminaire*): 1100 lm
- Luminous flux (*Lamps*): 1100 lm
- Luminaire Wattage: 14.0 W
- Fitting: 1 x DLM1100/840/- (Correction Factor 1.000).

2.3.1. Simulasi Sistem

Simulasi dilakukan dengan menghitung tingkat intensitas cahaya pada *working level* 0,75m di dalam lorong pada kondisi:

Pencahayaan alami: intensitas cahaya global maksimum, minimum dan rata-rata dari hasil pengukuran.

Pencahayaan buatan: menggunakan lampu CFL dan LED dengan spesifikasi seperti di atas.

Simulasi dilakukan untuk:

- (1) Lokasi dan jumlah fixture lampu sesuai dengan yang ada sekarang (14 titik)
- (2) Lokasi dan jumlah fixture dikurangi (8 titik)

2.3. Metoda Analisis

Data yang diperoleh dari pengukuran kemudian dilakukan analisis dengan membandingkan antara tingkat pencahayaan di luar dengan tingkat pencahayaan hasil pengukuran di mulut Solatube. Perhitungan efisiensi solar collector modul dilakukan dengan membagi nilai pencahayaan di mulut Solatube (*indoor*) dengan nilai pencahayaan di luar. Nilai efisiensi yang didapat kemudian dilihat korelasinya terhadap perubahan tingkat pencahayaan di luar.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil pengukuran pencahayaan tanpa *Light Focusing Module*

Hasil pengukuran tingkat pencahayaan di luar dan di dalam ruangan setelah melalui Solatube ditunjukkan pada Gambar 7. Dapat dilihat pada gambar bahwa, tingkat penerangan di luar berubah seiring dengan perubahan waktu. Pada pagi hari, pencahayaan di luar mencapai 51200 Lux dan beranjak naik seiring dengan semakin tingginya matahari. Tingkat pencahayaan tertinggi diperoleh pada pukul 9-11 mencapai 90000 Lux di luar. Penerangan kemudian turun hingga di bawah 20000 Lux pada jam 15.30.

Tingkat pencahayaan di dalam ruangan setelah dilewatkan Solatube berubah mengikuti perubahan tingkat penerangan di luar ruangan.

Pada pukul 8.30, ketika pengukuran dimulai tingkat penerangan di mulut keluaran Solatube mencapai 23300 Lux, di mana pada saat yang sama kondisi diluar mencapai 51200 Lux, atau dengan kata lain mencapai tingkat efisiensi sebesar 45,51%. Pada saat penerangan di luarmencapai tingkat tertinggi 89.800 Lux, tingkat pencahayaan di dalam sebesar 38.900 Lux atau memiliki efisiensi sebesar 43,32%. Sedangkan pada saat pencahayaan di luar mencapai nilai terendah 16100 Lux, tingkat penerangan di mulut Solatube mencapai 8290 atau efisiensi sebesar 51,49%.

Gambar 7. Hasil pengukuran tingkat pencahayaan dan efisiensi transfer cahaya tanpa LFM

3.1. Hasil pengukuran dengan *Light Focusing Module*

Hasil pengukuran tingkat pencahayaan di luar dan di dalam ruangan setelah melalui Light Focusing Modul ditunjukkan pada gambar 8.

Seperti juga halnya pada pengukuran sebelumnya, dapat dilihat bahwa, tingkat penerangan di luar berubah seiring dengan kondisi luar. Tingkat penerangan outdoor pada saat pengukuran mencapai maksimum 89000 Lux pada jam 9.30 dan minimum 26000 Lux pada jam 13.30. Pada saat penerangan luar mencapai nilai maksimum tingkat penerangan indoor sebesar 46600 Lux atau efisiensi sebesar 52,36%. Sedangkan pada saat penerangan luar minimum, tingkat penerangan indoor sebesar 14000 Lux, atau efisiensi sebesar 53,03%.

Gambar 8. Hasil pengukuran tingkat pencahayaan dan efisiensi transfer cahaya dengan LFM

3.2. Korelasi tingkat pencahayaan Indoor terhadap outdoor

Untuk melihat korelasi antara tingkat pencahayaan outdoor dan indoor, dilakukan regresi terhadap data tingkat penerangan outdoor terhadap tingkat penerangan indoor. Hasil regresi ditunjukkan pada gambar 9. Hasil regresi tanpa LFM menunjukkan nilai R² sebesar 0,9, yang artinya menunjukkan korelasi yang cukup erat. Atau dengan kata lain tingkat pencahayaan di mulut Solatube sangat bergantung kepada tingkat penerangan di luar ruangan dengan koefisien sebesar 0,3948. Di sisi lain, setelah dipasang modul LFM nilai R² nya meningkat menjadi 0,99 dengan koefisien sebesar 0,561. Terjadi peningkatan sekitar 40%.

Gambar 9. Korelasi tingkat pencahayaan outdoor terhadap indoor

3.2.1. Efisiensi Light Focusing Module

Rata-rata rasio tingkat penerangan indoor dan outdoor, setelah modul LFM sepanjang pengukuran adalah 55,4%. Nilai ini lebih tinggi daripada rasio tingkat penerangan tanpa LFM yang hanya sekitar 31%. Perlu dicatat bahwa modul LFM berfungsi mengumpulkan cahaya dalam diameter tertentu menjadi lebih fokus dengan diameter yang lebih kecil.

Tabel 1. Efisiensi Luminasi dengan dan tanpa LFM

		Nilai Lumen (Lux * m ²)		
		Outdoor	Indoor	Eff (%)
Tanpa LFM				
	max	8.635,4	3.740,7	43,32%
	min	8.635,4	3.740,7	43,32%
	ave	9.298,9	2.884,9	31,02%
Dengan LFM				
	max	8.558,5	381,5	4,46%
	min	2.500,2	109,1	4,36%
	ave	5.155,5	235,2	4,56%

Pada penelitian kali ini cahaya difokuskan dari keluaran *Light Tube* dengan diameter 35 cm, menjadi diameter 10 cm. Sehingga apabila nilai Lumen (Lm = Lux*m²) yang masuk ke modul LFM sama, maka tingkat penerangan yang diukur pada keluaran modul LFM dengan diameter 10 cm

seharusnya naik 12,25 kali lipat. Akan tetapi jika kita lihat dari nilai, maka terjadi penurunan nilai Lumen rata-rata sebesar 31,0 % jika tanpa LFM dengan diameter Light Tube 35 cm, menjadi hanya rata-rata hanya sekitar 4,56% dengan diameter setelah LFM adalah 10 cm. Atau dengan kata lain, modul LFM tidak berfungsi dengan baik dalam mengarahkan cahaya, justru banyak cahaya yang terbangun atau memantul balik ke atas.

3.3. Hasil Simulasi

Simulasi dilakukan untuk melihat efek pencahayaan yang diperoleh apabila cahaya dimasukkan ke area/zona yang tidak mendapatkan akses ke jendela seperti pada lorong di Lt2, Gd 625. Simulasi dilakukan untuk 3 tingkat iluminasi langit (*zenith illuminance*) yang diperoleh pada saat pengukuran, yaitu: maksimum 89000 Lux, minimum 26000 Lux dan rata-rata 54228 Lux.

3.3.1. Kondisi existing

Hasil simulasi tingkat pencahayaan alami (*daylighting*) untuk ruangan di Lt 2, Gd 625 dapat dilihat pada gambar 10 berikut. Warna di gambar menunjukkan distribusi tingkat penerangan (Lux) ruangan tanpa ada pencahayaan buatan seperti lampu dan sejenisnya. Simulasi dilakukan pada nilai iluminasi langit 26000 Lux. Dapat dilihat bahwa area di sekitar jendela yang mendapatkan akses ke luar, memiliki warna kemerahan dibandingkan dengan yang area dalam, di mana tidak ada akses ke luar. Artinya untuk area seperti area lorong, tanpa ada lampu buatan maka akan sangat gelap. Sehingga perlu dipasang lampu buatan untuk menerangi ruangan tersebut.

3.3.2. RSSL dipasang pada titik lampu ada sekarang (14 titik)

Hasil simulasi tingkat penerangan apabila RSSL dipasang pada titik lampu yang ada di lorong sekarang (14 titik) ditunjukkan pada Gambar 11. Dari gambar dapat dilihat bahwa pada nilai iluminasi langit maksimum tingkat penerangan yang dihasilkan oleh RSSL di lorong maksimum 268 Lux, yaitu di area dekat toilet bagian utara. Sedangkan di sisi lorong tingkat penerangan berkisar antara 134-201 Lux, khususnya di area tepat di bawah titik RSSL. Masih ada beberapa area yang tidak mendapat penerangan yang cukup, khususnya di area tangga di sisi selatan dan di antara titik-titik RSSL.

Tingkat pencahayaan menurun seiring dengan menurunnya nilai iluminasi langit. Pada nilai iluminasi langit rata-rata, tingkat penerangan di lorong maksimum 177 Lux dengan tingkat penerangan rata-rata 37,58 Lux. Tingkat penerangan maksimum menurun menjadi 83,7 Lux dengan tingkat penerangan rata-rata 18,32 Lux, pada nilai iluminasi langit minimum. Hal ini menunjukkan bahwa jika tingkat cahaya di luar turun hingga angka minimum, maka RSSL tidak lagi efektif dalam memberi penerangan di lorong.

Gambar 10. Distribusi tingkat penerangan pada ruangan existing

3.3.3. RSSL dipasang pada titik lampu yang dimodifikasi (8 titik)

Hasil simulasi tingkat pencahayaan apabila RSSL dipasang pada titik lampu yang lebih sedikit dari yang ada sekarang (8 titik) ditunjukkan pada Gambar 12. Dari gambar dapat dilihat bahwa pada nilai iluminasi langit maksimum tingkat penerangan yang dihasilkan oleh RSSL di lorong maksimum 219 Lux, yaitu di area dekat toilet bagian utara. Sedangkan di sisi lorong tingkat penerangan berkisar antara 110-164 Lux, khususnya di area tepat di bawah titik RSSL. Secara keseluruhan rata-rata tingkat penerangan di lorong terhitung 35,85 lux. Masih ada beberapa area yang tidak mendapat penerangan yang cukup, khususnya di area tangga di sisi selatan dan di antara titik-titik RSSL.

Tingkat penerangan menurun seiring dengan menurunnya nilai iluminasi langit. Pada nilai iluminasi langit rata-rata, tingkat penerangan di lorong maksimum 130 Lux dengan tingkat penerangan rata-rata 21,63 Lux. Tingkat penerangan maksimum menurun menjadi 64 Lux dengan tingkat penerangan rata-rata 10,44, pada nilai iluminasi langit minimum atau dapat dikatakan bahwa RSSL tidak lagi efektif dalam memberi penerangan di lorong.

3.3.4. Simulasi pencahayaan menggunakan CFL

Hasil simulasi tingkat pencahayaan menggunakan CFL 17 W pada 8 titik dan 14 titik lampu, ditunjukkan pada Gambar 13 (a) dan (b). Rangkuman hasil perhitungan ditunjukkan pada Tabel 2 berikut. Total daya lampu yang dibutuhkan

untuk 8 dan 14 titik lampu, masing-masing sebesar 138,4 W dan 242,2 W, dengan iluminasi yang dihasilkan sebesar 4716 lm dan 7308 lm. Tingkat pencahayaan untuk 8 titik lampu rata-rata adalah 21 Lux dan maksimum sebesar 70 Lux. Sedangkan pencahayaan untuk 14 titik lampu rata-rata sebesar 37 dan maksimum sebesar 102 Lux. Jika dibandingkan antara lampu CFL dengan RSSL, dengan jumlah titik lampu yang sama, maka pada saat kondisi iluminasi langit rata-rata atau tinggi, RSSL memberikan tingkat pencahayaan yang setara dengan lampu CFL. Sehingga mampu memberikan penghematan sejumlah 242 W untuk 14 titik lampu atau 138,4 W untuk 8 titik lampu yang digantikan. Sedangkan pada saat iluminasi langit rendah, maka 14 titik RSSL hanya mampu memberikan tingkat pencahayaan setara dengan 8 titik CFL, maka efek penghematannya hanya sebesar 104 W, karena masih diperlukan 6 titik lampu CFL menyala untuk mendapatkan nilai lux yang setara.

Tabel. 2 Rangkuman hasil simulasi pencahayaan menggunakan CFL

Jumlah Titik Lampu	Tingkat pencahayaan (Lux)			Total Iluminasi (lm)	Total Daya Lampu (W)
	Ave	Min	Max		
8	21	2,27	70	4716	138,4
14	37	4,126	102	7308	242,2

Gambar 11. Hasil simulasi penerangan menggunakan RSSL dipasang pada titik lampu yang ada sekarang (14 titik)

Gambar 12. Hasil simulasi penerangan menggunakan RSSL dipasang pada titik lampu yang dimodifikasi (8 titik)

3.3.5. Simulasi pencahayaan menggunakan LED

Hasil simulasi tingkat pencahayaan menggunakan LED 14 W pada 8 titik dan 14 titik lampu, ditunjukkan pada Gambar 14 (a) dan (b). Rangkuman hasil perhitungan ditunjukkan pada Tabel 3 berikut. Total daya lampu yang dibutuhkan untuk 8 dan 14 titik lampu, masing-masing sebesar 112 W dan 196 W, dengan iluminasi yang dihasilkan sebesar 8800 lm dan 15400 lm. Tingkat pencahayaan untuk 8 titik lampu rata-rata adalah 48 Lux dan maksimum sebesar 164 Lux. Sedangkan pencahayaan untuk 14 titik lampu rata-rata sebesar 85 dan maksimum sebesar 220 Lux. Jika dibandingkan antara lampu LED dengan RSSL, dengan jumlah titik lampu yang lebih sedikit sekalipun (8 titik), LED memberikan tingkat pencahayaan yang lebih tinggi daripada dengan RSSL pada saat kondisi iluminasi langit tinggi. Artinya dari sisi efektifitas, maka pemakaian LED jauh lebih efektif dibandingkan dengan RSSL.

Tabel. 3 Rangkuman hasil simulasi pencahayaan menggunakan LED

Jumlah Titik Lampu	Tingkat pencahayaan (Lux)			Total Iluminasi (lm)	Total Daya Lampu (W)
	Ave	Min	Max		
8	48	4,44	164	8800	112
14	85	8,50	220	15400	196,0

4. KESIMPULAN

Pemanfaatan RSSL untuk penghematan energi di gedung komersial telah dikaji melalui pengukuran dan simulasi hasil pemodelan pencahayaan. Dari hasil pengukuran didapatkan efisiensi transfer cahaya dengan menggunakan RSSL tanpa LFM

Gambar 13. Hasil simulasi penerangan menggunakan CFL 17 W

(a) Jumlah titik lampu: 8 titik

(b) Jumlah titik lampu: 14 titik

Gambar 14. Hasil simulasi penerangan menggunakan LED 14 W

sekitar 39,48%. Jika menggunakan LFM rasio tingkat pencahayaan rata-rata di titik fokus LFM mencapai 56,1% dan cenderung tetap tidak berubah oleh perubahan tingkat cahaya di luar. Akan tetapi jika dilihat dari lumen-nya, maka tingkat efisiensi lumen hanya mencapai 4,56% saja.

Dengan tingkat efisiensi seperti di atas, maka dengan menggunakan 8 titik RSSL di lorong dapat memberikan pencahayaan alami maksimal sebesar 219 Lux pada saat tingkat iluminasi langit sebesar 89000 Lux. Akan tetapi RSSL menjadi tidak lagi efektif pada saat iluminasi langit turun hingga 26000 Lux. Jika dibandingkan antara lampu CFL dengan RSSL, dengan jumlah titik lampu yang sama, maka pada saat kondisi iluminasi langit rata-rata atau tinggi, RSSL memberikan tingkat pencahayaan yang setara dengan lampu CFL, namun masih lebih rendah daripada lampu LED. Pada saat iluminasi langit rendah/minimal maka 14 titik RSSL hanya mampu menyediakan penerangan setara dengan 8 titik CFL.

DAFTAR PUSTAKA

- Ayers MJ, Carter DJ. (1995), Remote source electric lighting system: a review. *Light Res Technol*. Vol 27(1):11–5.
- Hilmawan, E., Palaloi, S. dan Rosmawar, E. (2008), The Study on Energy Conservation and Efficiency Improvement in the Republic of Indonesia, JICA Project Report
- Hilmawan, E., Yurismo, H. dan Surahman, H. (2010), Pengembangan Dan Penerapan Teknologi Efisiensi Energi Untuk Menurunkan Elastisitas Energi Nasional Dan Power Quality, Program Document, DIPAB2TE BPPT
- Hootman T. (2012), *Net Zero Energy Design: A Guide for Commercial Architecture*, John Wiley & Sons,.
- Kandilli, C. and Ulgen, K. (2009), Review and modelling the systems of transmission concentrated solar energy via optical fibres, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, pp 67–84
- Lee, E.S. (1998), *Spectrally Selective Glazings*; DOE/EE-0173, Federal Energy Management Program,
- Laar, M. and Grimme F.W. (2002), German developments in daylight guidance systems: an overview, *Building Research & Information* Vol. 30 (4) pp 282–301
- Mayhoub, M.S. (2014), Innovative daylighting systems' challenges: A critical study, *Energy and Buildings*, Vol 80, pp 394–405

- Macrelli G., (1998), Electrochromic windows, *Renewable Energy* Vol 15 (1–4), pp 306–311.
- Schultz, J.M., Jensen, K.I., Kristiansen, F.H. (2005), Super insulating aerogel glazing, *Solar Energy Materials and Solar Cells* Vol.89 (2–3) pp 275–285.
- Sugiyono, A.,eds. (2015), *Outlook Energi Indonesia 2015*, BPPT
- Whitehead LA. (1998), Overview of hollow light guide technologies and application. In: *Proceedings in international conference on daylighting technologies for energy efficiency in buildings*;
- Wong I, Yang H.. (2011), Introducing natural lighting into the enclosed lift lobbies of highrise residential buildings by remote source lighting system., *Appl Energy*..
- Wong I., Yang H. (2010), Application of remote source lighting system in different layouts of enclosed lift lobbies in highrise residential buildings of central core design. In: *Proceedings in the 5th international green energy conference 2010 in Waterloo, Canada*;
- Wong I., Choi, H.L., Yang, H. (2012), Simulation and experimental studies on natural lighting in enclosed lift lobbies of highrise residential buildings by remote source solar lighting, *Applied Energy* Vol. 92, pp 705–713