



UNIVERSITAS ATMA JAYA YOGYAKARTA

**EFEKTIVITAS RAK CAHAYA DI DALAM KONTEKS RUANG KOTA TROPIS
DI DAERAH KATULISTIWA**

TEMA PENELITIAN UNIVERSITAS
Kebencanaan

TOPIK PENELITIAN UNIT
Kelestarian Lingkungan

Ketua

Floriberta Binarti, ST., Dipl. NDS Arch.
(NPP.07.94.520/NIDN.0520096901)

LAPORAN

PENELITIAN INTERNAL PERORANGAN

Laboratorium Perencanaan dan Perancangan Teknologi Arsitektural
Program Studi Arsitektur
Fakultas Teknik

Maret 2015

(Berdasarkan SK Rektor Nomor 101/HP/Per.Pen/2012)

LEMBAR PENGESAHAN PROPOSAL PENELITIAN INTERNAL PERORANGAN			
1	Judul Proposal Penelitian	Efektivitas Rak Cahaya di dalam Konteks Ruang Kota Tropis di Daerah Katulistiwa	
2	Kategori Penelitian	Penelitian diorientasikan pada penerbitan artikel jurnal ilmiah	
3	Tema Penelitian Universitas	Kebencanaan	
4	Topik Penelitian Unit	Kelestarian Lingkungan	
5	Bebas SKS Penelitian	(3) sks	Berlaku semester Gasal 2014/2015
IDENTITAS PENELITI			
6	Nama Peneliti (Pengusul)		
	Jabatan/Golongan	Lektor / III-D	
	NPP/NIDN	07.94.520	0520096901
	Bidang Keahlian	Arsitektur	
	Unit/Fakultas/Jurusan	Unit	Jurusan/Program Studi
		Fakultas Teknik	Arsitektur
	Alamat Rumah	Jl. Jogokariyan no. 4 Yogyakarta	
	No. Telp/Faks/Email Peneliti	62-274-387155	Email: binarti@mail.uajy.ac.id
7	Lokasi Penelitian	Laboratorium Perencanaan dan Perancangan Teknologi Arsitektural, Fakultas Teknik UAJY	
	Waktu Pelaksanaan	6 bulan	
8	Dana yang disetujui	Dana UAJY	
		Rp. 7.500.000,00	
	Jumlah Total	Rp. 7.500.000,00	
9	Terbilang	Tujuh juta lima ratus ribu rupiah	
10	Spesifikasi <i>outcome</i> penelitian	Memberikan <i>design guidelines</i> fenestrasi di dalam konteks ruang kota tropis di daerah katulistiwa. Memberikan masukan perencanaan dan perancangan ruang kota tropis di daerah katulistiwa yang berkelanjutan.	

Mengetahui dan Menyetujui
Dekan Fakultas Teknik



Prof. Dr. Yoyong Arfiadi, M.Eng
NPP:01.88.265 / NIDN:0522026201

Yogyakarta, 12 Maret 2015
Ketua Peneliti:



Floriberta Binarti, ST., Dipl. NDS. Arch.
NPP:07.94.520 / NIDN:0520096901

Mengetahui dan Menyetujui
Ketua LPPM



Dr. Ir. Y. Djarot Purbadi, MT
NPP:08.87.217/NIDN: 0516065701

KATA PENGANTAR

Fenestrasi membutuhkan energi dengan prosentase terbesar pada bangunan. Perhatian terhadap fenestrasi akan menentukan keberhasilan efisiensi energi pada bangunan. Rak cahaya merupakan model fenestrasi yang sudah dikenal dalam beberapa dekade dan diterapkan secara luas. Studi tentang rak cahaya banyak dilakukan dalam konteks bangunan tunggal. Di dalam studi ini rak cahaya dikaji dalam konteks kota tropis di katulistiwa.

Puji syukur kepada Tuhan dan ucapan terima kasih kepada Yayasan Slamet Riyadi, LPPM, Fakultas Teknik dan Program Studi Arsitektur UAJY atas dukungan finansialnya sehingga peneliti berkesempatan mengidentifikasi beberapa fenomena menarik aplikasi rak cahaya yang dapat menjadi masukan di dalam perencanaan dan perancangan ruang kota. Terima kasih juga kepada surveyor, staf laboratorium Perencanaan dan Perancangan Teknologi Arsitektur maupun pihak lain yang tidak bisa disebutkan di sini yang membantu mempersiapkan peralatan untuk pengukuran di lapangan.

Tentunya masih diperlukan studi lebih lanjut untuk menyempurnakan hasil penelitian ini sebagaimana yang dituliskan di dalam V.2 Saran. Masukan dan kritik yang konstruktif akan sangat dibutuhkan sebagai pelengkap maupun pengarah bagi penelitian berikutnya.

Yogyakarta, 12 Maret 2015

ABSTRAKSI

Rak cahaya dikenal sebagai elemen fenestrasi yang berfungsi untuk menciptakan distribusi cahaya alami yang lebih beragam melalui peningkatan tingkat terang pada area terdalam dan menurunkan tingkat terang pada area di dekat jendela. Permasalahan yang dihadapi daerah tropis akibat aplikasi rak cahaya adalah penurunan efektivitas rak cahaya pada kondisi langit mendung dan radiasi panas yang masuk melalui bidang jendela atas pada saat langit cerah yang akan meningkatkan beban penyejukan ruangan. Keberadaan ruang kota dapat menurunkan maupun memperbaiki kinerja pencahayaan alami maupun kinerja energi.

Untuk mengetahui pengaruh ruang kota pada efektivitas rak cahaya dilakukan studi simulasi dengan menggunakan program Radiance (plugged in Ecotect v. 5.5) dan Design Builder v.2. Kedua program dipilih karena dinilai andal di dalam melakukan analisis kinerja pencahayaan alami untuk Radiance (plugged in Ecotect) dan analisis kinerja energi untuk Design Builder berdasarkan beberapa hasil studi yang dilakukan sebelumnya. Model rak cahaya diterapkan pada bangunan pendidikan (ruang kelas) berlantai 5. Model bangunan ditempatkan pada ruang kota dengan variasi morfologi ruang kota yang teratur dan variasi koefisien pantul permukaan. Hasil simulasi ruang dengan rak cahaya dikomparasikan dengan hasil simulasi ruangan yang sama dengan model elemen peneduh yang berbeda.

Validasi komponen langit (SC) dan faktor cahaya alami (DF) dilakukan untuk meyakinkan akan keandalan program Radiance (plugged in Ecotect v. 5.5). Hasil validasi menunjukkan pergeseran nilai SC hasil pengukuran selama 5 hari di bulan Juni dan hasil simulasi rata-rata kurang dari 5%. Beberapa fenomena menarik yang dapat diidentifikasi dari hasil studi ini adalah: morfologi ruang kota yang mampu meningkatkan kinerja rak cahaya, koefisien pantul permukaan ruang kota yang dapat mengurangi potensi silau, dan posisi aplikasi rak cahaya pada lantai bangunan tertentu secara tepat sesuai dengan morfologi ruang kota untuk menurunkan beban penyejukan dan listrik untuk lampu.

Kata kunci: kinerja energi, kinerja pencahayaan alami, rak cahaya, ruang kota, tropis

DAFTAR ISI

LEMBAR IDENTITAS DAN PENGESAHAN.....	i
KATA PENGANTAR	iii
ABSTRAKSI	iv
DAFTAR ISI.....	v
I. PENDAHULUAN.....	1
I.1 LATAR BELAKANG.....	1
I.2 RUMUSAN MASALAH	2
I.3 TUJUAN PENELITIAN	2
I.4 BATASAN MASALAH	2
I.5 URGENSI PENELITIAN	3
II. TINJAUAN PUSTAKA	4
II.1 PENELITIAN TERKAIT.....	4
II.2 DASAR TEORI.....	5
II.2.1 Prinsip-prinsip desain rak cahaya	5
II.2.2 Kinerja pencahayaan alami dan energi di dalam konteks ruang kota.....	7
III. METODE PENELITIAN.....	9
III.1 BAGAN ALIR PENELITIAN	9
Penelitian ini dilakukan dengan susunan langkah sebagai berikut:.....	9
III.2 TOLOK UKUR KINERJA RAK CAHAYA.....	10
III.3 MODEL SIMULASI.....	10

III.4	METODE SIMULASI	11
III.5	VALIDASI.....	13
IV.	HASIL DAN PEMBAHASAN	16
IV.1	STUDI VALIDASI	16
IV.1.1	Validasi komponen langit (SC)	16
IV.2	MODEL SIMULASI.....	17
IV.3	KINERJA PENCAHAYAAN ALAMI.....	19
IV.3.1	Pengaruh geomorfologi ruang kota pada kinerja pencahayaan alami	19
IV.3.2	Pengaruh daya pantul permukaan eksternal pada kinerja pencahayaan alami	26
IV.3.3	Tingkat silau	32
IV.4	KINERJA ENERGI	33
V.	KESIMPULAN DAN SARAN	37
V.1	KESIMPULAN	37
V.2	SARAN.....	38
VI.	DAFTAR PUSTAKA	39
	LAMPIRAN.....	42

DAFTAR GAMBAR

Gambar II-1. Morfologi Ruang Kota Secara Skematik (diadopsi dari Harman, 2003).....	7
Gambar III-1. Diagram Tulang Ikan Penelitian	9
Gambar III-2. Posisi titik pengukuran (kiri) dan model validasi SC saat berada di lokasi pengukuran (kanan).	14
Gambar IV-1. Tingkat terang langit selama pengukuran SC	16
Gambar IV-2. Grafik hasil pengukuran dan simulasi SC	16
Gambar IV-3. Model bangunan dengan rak cahaya dengan h/w: 2 dan le/L: 0,5 dalam Design Builder	17
Gambar IV-4. Model bangunan dengan teritisan dengan h/w: 2 dan le/L: 0,5 dalam Design Builder	18
Gambar IV-5. Model bangunan tanpa elemen peneduh dengan h/w: 2 dan le/L: 0,5 dalam Design Builder.....	18
Gambar IV-6. Peta tingkat terang ruangan dengan lebar 6 m dengan bukaan menghadap ke utara(kota Yogyakarta)pada 21 Juni pk. 12.00 dan kondisi langit cerah dan dilengkapi dengan elemen peneduh tanpa tanpa rak cahaya internal (a), dengan rak cahaya (b) dan dengan teritisan lebar (c); peta tingkat terang ruangan dengan lebar 9 m dengan bukaan menghadap ke utara pada 21 Juni pk. 12.00 dan kondisi langit cerah dan dilengkapi dengan elemen peneduh tanpa tanpa rak cahaya internal (d), dengan rak cahaya (e) dan dengan teritisan lebar (f); peta tingkat teang ruangan dengan lebar 12 m dengan bukaan menghadap ke utara pada 21 Juni pk. 12.00 dan kondisi langit cerah dan dilengkapi dengan elemen peneduh tanpa tanpa rak cahaya internal (g), dengan rak cahaya (h) dan dengan teritisan lebar (i). 20	
Gambar IV-7. Peta tingkat terang ≥ 200 lux ruangan dengan lebar 6 m dengan bukaan menghadap ke utara (kota Yogyakarta) pada 21 Juni pk. 12.00 dan kondisi langit cerah dan dilengkapi dengan: elemen peneduh tanpa tanpa rak cahaya internal (a), dengan rak cahaya (b) dan dengan teritisan lebar (c); peta tingkat terang ≥ 200 lux ruangan dengan lebar 9 m dengan bukaan menghadap ke utara pada 21 Juni pk. 12.00 dan kondisi langit cerah dan dilengkapi dengan elemen peneduh: tanpa rak cahaya internal (d), dengan rak cahaya (e) dan dengan teritisan lebar (f); peta tingkat terang ≥ 200 lux ruangan dengan lebar 12 m dengan bukaan menghadap ke utara pada 21 Juni pk. 12.00 dan kondisi langit cerah dan dilengkapi dengan elemen peneduh: tanpa rak cahaya internal (g), dengan rak cahaya (h) dan dengan teritisan lebar (i).	21

Gambar IV-8. Peta tingkat terang horisontal ruangan dengan lebar 9 m pada bangunan tunggal 21 Juni pkl. 12.00 dengan kondisi langit cerah: tanpa rak cahaya internal (a), dengan rak cahaya (b), dengan teritisan (c) di dalam ruang kota Yogyakarta dengan h/w: 4 dan le/L: 0,25.	22
Gambar IV-9. Tingkat terang pada jarak tertentu dari bukaan yang menghadap ke Utara pada 21 Juni pkl. 12.00 dengan kondisi langit cerah di lantai I di dalam ruang kota Yogyakarta dengan h/w: 4 dan le/L: 0,25.	22
Gambar IV-10. DF pada jarak tertentu dari bukaan yang menghadap ke Utara pada 21 Juni pkl. 12.00 di lantai I di dalam ruang kota Yogyakarta dengan h/w: 4 dan le/L: 0,25.	23
Gambar IV-11. Tingkat terang (kiri) dan DF (kanan) ruangan lebar 12 m dengan rak cahaya yang menghadap ke Utara pada lantai I pada berbagai variasi geometri ruang kota (kasus kota Yogyakarta). Tingkat terang diukur pada 21 Juni pkl. 12.00 dengan kondisi langit cerah.	23
Gambar IV-12. Tingkat terang (kiri) dan DF (kanan) ruangan ruangan lebar 12 m dengan rak cahaya yang menghadap ke Utara pada lantai III pada berbagai variasi geometri ruang kota (kasus kota Yogyakarta). Tingkat terang diukur pada 21 Juni pkl. 12.00 dengan kondisi langit cerah.	24
Gambar IV-13. Tingkat terang (kiri) dan DF (kanan) ruangan lebar 12 m dengan rak cahaya yang menghadap ke Utara pada lantai V pada berbagai variasi morfologi ruang kota (kasus kota Yogyakarta). Tingkat terang diukur pada 21 Juni pkl. 12.00 dengan kondisi langit cerah.	25
Gambar IV-14. Prosentase tingkat terang ≥ 200 lux ruangan dengan bukaan yang menghadap ke Utara di lantai I pada 21 Juni pkl. 12.00 di dalam ruang kota dengan h/w: 4 dan le/L: 0,25.	25
Gambar IV-15. <i>Daylight Autonomy</i> atau prosentasi area dengan tingkat terang ≥ 200 lux untuk ruang dengan lebar 12 m dengan bukaan menghadap ke Utara di kota Yogyakarta	26
Gambar IV-16. Tingkat terang (kiri) dan DF (kanan) ruangan dengan lebar 9 m dengan rak cahaya dan bukaan menghadap ke Utara dengan variasi koefisien pantul halaman ruang kota Yogyakarta dengan h/w: 4 dan le/L: 0,25.	27
Gambar IV-17. Tingkat terang (kiri) dan DF (kanan) ruangan dengan lebar 9 m dengan rak cahaya dan bukaan menghadap ke Utara dengan variasi koefisien pantul halaman kota Yogyakarta dengan h/w: 2 dan le/L: 0,25.	27
Gambar IV-18. Tingkat terang (kiri) dan DF (kanan) ruangan dengan lebar 9 m dengan rak cahaya dan bukaan menghadap ke Utara dengan variasi koefisien pantul halaman kota Yogyakarta dengan h/w: 0,75 dan le/L: 0,25.	28

Gambar IV-19. Tingkat terang (kiri) dan DF (kanan) ruangan dengan lebar 9 m dengan rak cahaya dan bukaan menghadap ke Utara dengan variasi koefisien pantul permukaan dinding kota Yogyakarta dengan h/w: 4 dan le/L: 0,25.....	29
Gambar IV-20. Tingkat terang (kiri) dan DF (kanan) ruangan dengan lebar 9 m dengan rak cahaya dan bukaan menghadap ke Utara dengan variasi koefisien pantul permukaan dinding kota Yogyakarta dengan h/w: 2 dan le/L: 0,25.....	29
Gambar IV-21. Tingkat terang (kiri) dan DF (kanan) ruangan dengan lebar 9 m dengan rak cahaya dan bukaan menghadap ke Utara dengan variasi koefisien pantul permukaan dinding kota Yogyakarta dengan h/w: 0,75 dan le/L: 0,25.....	30
Gambar IV-22. Tingkat terang (kiri) dan DF (kanan) ruangan dengan lebar 9 m dengan rak cahaya dan bukaan menghadap ke Utara dengan variasi koefisien pantul permukaan atap kota Yogyakarta dengan h/w: 4 dan le/L: 0,25.....	30
Gambar IV-23. Tingkat terang (kiri) dan DF (kanan) ruangan dengan lebar 9 m dengan rak cahaya dan bukaan menghadap ke Utara dengan variasi koefisien pantul permukaan atap kota Yogyakarta dengan h/w: 2 dan le/L: 0,25.....	31
Gambar IV-24. Tingkat terang (kiri) dan DF (kanan) ruangan dengan lebar 9 m dengan rak cahaya dan bukaan menghadap ke Utara dengan variasi koefisien pantul permukaan atap kota Yogyakarta dengan h/w: 0,75 dan le/L: 0,25.	31
Gambar IV-25. Hasil analisis silau berbagai elemen peneduh pada bukaan yang menghadap ke Utara yang diambil dengan kamera berlensa mata ikan pada 21 Juni pkl. 15.00. Dari kiri atas sesuai putaran jarum jam: rak cahaya internal, elemen peneduh, teritisan, tanpa elemen peneduh, internal, elemen peneduh, teritisan, tanpa elemen peneduh.....	32
Gambar IV-26. DGP ruang pada lantai III dengan bukaan menghadap ke Utara pada 21 Juni pkl. 12.00 dengan kondisi langit cerah.....	33
Gambar IV-27. Jumlah beban penyejukan dan energi untuk pencahayaan buatan yang dibutuhkan selama satu tahun oleh ruangan dengan lebar 9 m dengan bukaan menghadap ke Utara pada ruang kota Singapura dengan h/w: 4.....	34
Gambar IV-28. Jumlah beban penyejukan dan energi untuk pencahayaan buatan yang dibutuhkan selama satu tahun oleh ruangan dengan lebar 9 m dengan bukaan menghadap ke Utara pada ruang kota Singapura dengan h/w: 2.....	34
Gambar IV-29. Jumlah beban penyejukan dan energi untuk pencahayaan buatan yang dibutuhkan selama satu tahun oleh ruangan dengan lebar 9 m dengan bukaan menghadap ke Utara pada ruang kota Singapura dengan h/w: 0,75.....	34

Gambar IV-30. Beban penyejukan dan listrik untuk lampu yang dibutuhkan oleh sebuah ruangan dengan variasi elemen peneduh dan orientasi bukaan yang terletak di ruang kota dengan kombinasi h/w: 4 dan le/L: 0,25 (kiri) h/w: 2 dan le/L: 0,5 (kanan).....35

Gambar IV-31. Beban penyejukan dan energi untuk lampu yang dibutuhkan selama satu tahun oleh ruangan dengan lebar 9 m dengan variasi orientasi bukaan pada ruang kota Singapura dengan h/w: 4 dan le/L: 0,25.....36

Gambar IV-32. Beban penyejukan dan energi untuk lampu yang dibutuhkan selama satu tahun oleh ruangan dengan lebar 9 m dengan variasi orientasi bukaan pada ruang kota Singapura dengan h/w: 2 dan le/L: 0,5.....36

DAFTAR TABEL

Tabel III-1. Daftar instrumen pengukuran dan spesifikasinya.....15

I. PENDAHULUAN

I.1 LATAR BELAKANG

Rak cahaya merupakan salah satu *light guiding system* yang diterapkan sebagai solusi akan keterbatasan penyediaan cahaya alami melalui bukaan samping (*side lighting*). *Light guiding system* sendiri adalah inovasi sistem pencahayaan dengan memanfaatkan pemantulan, refraksi dan pembelokan gelombang cahaya langsung maupun difus hingga mampu mencapai sisi ruang bagian dalam. Rak cahaya membagi area bukaan menjadi dua, yakni: bagian atas (*clerestory*) dan bidang pandang pada sisi bawah (*view window*).

Penetrasi cahaya alami melalui bukaan samping hanya mampu mencapai kedalaman ruang hingga 2 kali tinggi bukaan tersebut dengan distribusi tingkat terang yang tidak seragam (Hansen dan Edmonds, 2003). Pemasangan elemen peneduh membantu menurunkan beban panas ruangan dari radiasi matahari, tetapi menurunkan tingkat terang serta penetrasi cahaya alami secara signifikan (Binarti, 2005). Dibandingkan dengan aplikasi elemen peneduh konvensional, rak cahaya efektif di dalam meningkatkan keseragaman tingkat terang terutama pada ruang yang lebar. Keberadaan panel horisontal internal di antara kedua bagian berfungsi untuk memantulkan cahaya alami ke interior hingga sekitar 2,5 kali tinggi *clerestory* (Hansen dan Edmonds, 2003). Distribusi merata dengan tingkat terang yang cukup tinggi akan menciptakan ambien yang menyenangkan. Kondisi ini berpotensi meningkatkan produktivitas pada ruang kelas maupun ruang kerja (Heschong dkk., 2003).

Efektivitas kinerja rak cahaya telah distudi untuk berbagai wilayah iklim, seperti: mediterania (Beltran dkk., 1994), sub tropis (Floyd dan Parker, 1998; Ochoa dan Capeluto, 2006; Ho dkk., 2008; Hirning dkk., 2010), tropis lembab (Wong dan Istiadji, 2004; Binarti, 2005; Franco, 2007; Joarder dkk., 2009), iklim sedang (Altomonte, 2008), dan daerah beriklim gurun (Abboushi, 2013). Sebagian besar mengkaji dari aspek kinerja pencahayaan alami pada kondisi langit cerah. Studi yang dilakukan oleh Floyd dan Parker (1998), Ho dkk. (2008) dan Abboushi (2013) juga mencakup aspek kinerja energi dari aplikasi rak cahaya.

Sebagian besar studi tentang rak cahaya dilakukan pada skala bangunan secara individual. Hingga kini belum ada studi aplikasi rak cahaya yang dilakukan dengan mempertimbangkan konteks ruang kota. Keberadaan bangunan di sekitarnya maupun elemen ruang kota lainnya juga akan mengurangi tingkat terang cahaya yang dapat dipantulkan ke dalam ruangan. Di sisi lain, efek pembayangan oleh elemen ruang kota berpotensi menurunkan beban penyejukan yang dibutuhkan bangunan di daerah tropis. Aplikasi rak cahaya di dalam konteks ruang kota perlu dikaji lebih dalam mengingat dampaknya pada performa pencahayaan dan energi bangunan mungkin sangat berbeda dari dampak aplikasi rak cahaya pada bangunan secara individual.

I.2 RUMUSAN MASALAH

1. Variabel ruang kota apa saja yang mungkin menentukan efektivitas kinerja rak cahaya?
2. Bagaimana tingkat efektivitas kinerja rak cahaya di dalam konteks ruang kota tropis di daerah katulistiwa jika dikomparasikan dengan model elemen pembayang yang lain?

I.3 TUJUAN PENELITIAN

- a) Mengidentifikasi elemen-elemen ruang kota tropis di katulistiwa yang menentukan kinerja rak cahaya.
- b) Mengukur efektivitas kinerja rak cahaya di dalam konteks ruang kota tropis di katulistiwa.

I.4 BATASAN MASALAH

Studi tentang efektivitas rak cahaya ini hanya mencakup aspek kinerja pencahayaan alami dan kinerja termal yang menentukan kinerja energi bangunan atau ruang yang menerapkan rak cahaya tersebut. Yogyakarta dan Singapura dipilih sebagai lokasi studi yang mewakili kota tropis di daerah katulistiwa.

I.5 URGENSI PENELITIAN

- Sebagai *design guidelines* aplikasi rak cahaya di dalam konteks ruang kota tropis di daerah katulistiwa.
- Sebagai masukan bagi perencanaan dan perancangan ruang kota tropis di daerah katulistiwa.



II. TINJAUAN PUSTAKA

II.1 PENELITIAN TERKAIT

Rak cahaya merupakan solusi permasalahan distribusi pencahayaan alami yang tidak merata yang sering terjadi pada ruang yang lebar. Beberapa studi membuktikan efektivitas rak cahaya di dalam memperbaiki distribusi tingkat terang pada ruang yang lebar di daerah mediterania (Beltran dkk., 1994), sub tropis (Floyd dan Parker, 1998; Ochoa dan Capeluto, 2006; Ho dkk., 2008; Hirning dkk., 2010), tropis lembab (Wong dan Istiadji, 2004; Binarti, 2005; Franco, 2007; Joarder dkk., 2009), iklim sedang (Altomonte, 2008), dan daerah beriklim gurun (Abboushi, 2013). Distribusi tingkat terang yang merata tersebut dicapai melalui pemantulan cahaya alami oleh rak cahaya internal hingga ke sisi ruang paling dalam.

Interior dengan tingkat terang yang cukup dan distribusi yang seragam akan mengurangi konsumsi energi untuk pencahayaan buatan yang perlu ditambahkan untuk mencapai tingkat terang ruangan yang dibutuhkan. Pengurangan kebutuhan pencahayaan buatan tambahan akan menurunkan beban panas yang dihasilkan oleh lampu tersebut. Penerapan rak cahaya ganda dengan panel vertikal yang dipasang pada panel internal sisi atas mengindikasikan adanya perbaikan pada kondisi terang ruang kelas dan penghematan energi sekitar 70% (Ho dkk., 2008). Franco (2007) mengusulkan rak cahaya yang dinamis dan otomatis untuk daerah tropis untuk menciptakan pencahayaan alami yang lebih difus. Aplikasi rak cahaya pada bangunan kantor di Florida jauh lebih menghemat penggunaan energi untuk sistem pencahayaan buatan dengan dimmer dibandingkan aplikasi tirai horizontal pada bangunan yang sama (Floyd dan Parker, 1998). Sementara Abboushi (2013) melakukan studi yang lebih komprehensif mengenai dampak elemen peneduh, termasuk rak cahaya, pada konsumsi energi untuk pemanasan, penyejukan, kipas dan pencahayaan.

Sebagian besar studi tentang rak cahaya dilakukan pada kondisi langit cerah. Pada kondisi langit berawan tingkat terang cahaya alami yang rendah akan sulit dipantulkan oleh rak cahaya internal, sehingga tingkat terang pada sisi dalam ruangan menjadi kurang

memadai. Aplikasi rak cahaya secara efektif pada kondisi tersebut membutuhkan desain dan penempatan yang tepat (Joarder dkk., 2009).

II.2 DASAR TEORI

II.2.1 Prinsip-prinsip desain rak cahaya

Rak cahaya adalah panel horizontal yang membagi bidang jendela menjadi *clerestory* (jendela bagian atas) dan jendela pandang (bagian bawah). Bagian luar berupa elemen pembayang berfungsi melindungi jendela pandang terhadap radiasi matahari dan silau untuk menyediakan bidang pandang keluar yang nyaman. Silau dari *clerestory* dapat dicegah melalui penempatan dan lebar rak cahaya internal secara tepat. Daya pantul permukaan atas rak cahaya internal menentukan kemampuan memantulkan cahaya alami ke dalam ruangan.

Tinggi *clerestory* menentukan jangkauan penetrasi cahaya pantulan yang melalui *clerestory* tersebut. Aturan praktis tentang rak cahaya menyebutkan jangkauan penetrasi pantulan cahaya alami (yang menentukan lebar ruangan) sebaiknya 2,5 kali tinggi sisi atas *clerestory* (Stein dkk., 2009). Hasil pengukuran lapangan sebuah bangunan yang menerapkan rak cahaya di Oregon pada kondisi langit agak mendung (Emerald People, 1999) menunjukkan jangkauan penetrasi cahaya alami dapat mencapai lebih dari 2,5 kali tinggi jendela.

Tinggi rak cahaya internal sebaiknya dipertimbangkan terhadap otonomi pencahayaan alami atau *daylight autonomy* (DA) dan efek silau yang dihasilkan. Otonomi pencahayaan alami adalah prosentase tingkat terang cahaya alami yang mencapai minimal 500 lux atau tingkat terang minimal yang disyaratkan. Hasil studi yang dilakukan oleh Joarder dkk.(2009) menunjukkan bahwa rak cahaya internal setinggi 2 m di atas permukaan lantai pada ruang dengan tinggi plafond 3 m di daerah tropis pada kondisi langit mendung menghasilkan kinerja yang terbaik. Tinggi rak cahaya lebih dari 2 m memungkinkan penghuni terhindar dari silau yang dihasilkan oleh *clerestory*.

Orientasi rak cahaya yang terbaik bersifat spesifik untuk setiap wilayah. Beberapa studi tidak menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan dari kinerja rak cahaya dengan

orientasi yang berbeda pada lokasi yang sama (Beltran dkk., 1994; Binarti, 2005). Untuk mengoptimalkan kinerja rak cahaya sudut kemiringan rak cahaya dapat diatur sesuai dengan posisi matahari pada saat itu. Studi rak cahaya di daerah tropis lembab yang dilakukan oleh Binarti (2005) mengindikasikan bahwa dengan memiringkan rak cahaya internal sebesar 10^0 berlawanan arah jarum jam akan menghasilkan distribusi tingkat terang yang lebih baik dibandingkan dengan posisi normal pada jendela yang menghadap ke utara pada kondisi langit cerah maupun mendung saat matahari ada di $23,5^0$ LU. Beltran dkk. (1994) mengembangkan permukaan melengkung sebagai reflektor rak cahaya di Los Angeles untuk memantulkan cahaya alami secara lebih baik sesuai dengan perubahan sudut jatuh matahari.

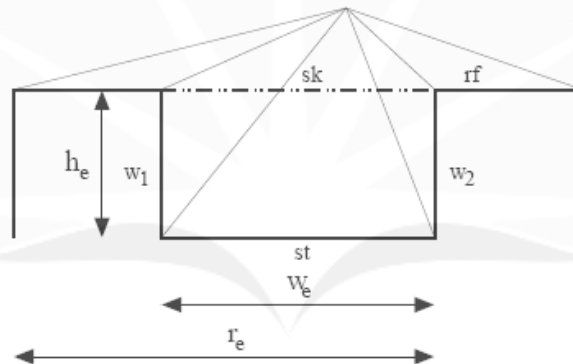
Studi yang dilakukan oleh Franco (2007) menunjukkan bahwa panas yang terkumpul di dalam ruang dengan aplikasi rak cahaya justru lebih tinggi dibandingkan dengan ruang dengan elemen pembayang horizontal saja. Franco (2007) mengusulkan rak cahaya eksternal yang dapat diputar otomatis untuk mencegah masuknya radiasi matahari secara berlebihan pada saat matahari ada di altitude tertinggi di Brasilia. Dengan cara ini akan diperoleh penetrasi cahaya alami yang lebih difus. Untuk menyesuaikan posisi matahari rak cahaya yang dilengkapi dengan elemen pembayang yang adaptif pada sisi atas *clerestory* akan meningkatkan tingkat terang interior secara efektif di daerah beriklim gurun. Rak cahaya dua lapis dikembangkan untuk jendela yang lebar di Taiwan untuk mencapai tingkat terang interior yang optimal dan mengurangi konsumsi energi untuk lampu fluorescent (Hodkk., 2008). Hanya saja pemasangan rak cahaya internal pada lapis bawah akan mengganggu pandangan penghuni keluar ruangan. Elemen pembayang adaptif juga mampu mengurangi pemakaian energi untuk penyejukan (Abboushi, 2013).

Material berdaya pantul tinggi menjadi kunci kinerja rak cahaya. Beltran dkk. (1994) di dalam studinya menggunakan lapisan tipis berdaya pantul 88% dan lapisan spekular berdaya pantul 95% untuk menciptakan rak cahaya berkinerja tinggi. Bahan berdaya pantul selektif pada sisi bawah rak cahaya diaplikasikan untuk meningkatkan tingkat terang interior sekaligus mengurangi beban penyejukan di daerah beriklim gurun (Abboushi, 2013).

II.2.2 Kinerja pencahayaan alami dan energi di dalam konteks ruang kota

Morfologi ruang kota menghasilkan *urban canyon* yang memodifikasi iklim kota dan berkontribusi pada efek pemanasan ruang kota (*urban heat island* disingkat UHI). *Urban canyon* merupakan permukaan kota dasar yang terdiri dari kombinasi geometris permukaan horizontal (jalan dan ruang terbuka) serta vertical (bangunan). Tolok ukur *urban canyon* yang utama adalah *aspect ratio* (h_e/w_e) and *sky view factor* (Nunez dan Oke, 1977).

Aspect ratio adalah rasio tinggi rata-rata bangunan pada kedua sisi dan lebar pemisah (jalan). *Canyon aspect ratio* dapat dikelompokkan menjadi 3 (tiga) berdasarkan rejim aliran udara, yakni: *isolated flow regime* ($h_e/w_e \leq 0.3$), *wake interference regime* ($0.3 < h_e/w_e < 0.7$), *skimming flow regimes* ($h_e/w_e \geq 0.7$). *Skimming flow regimes* sering muncul di pusat kota yang kadang mencapai lebih dari 1,5 (Harman, 2003).



Gambar II-1. Morfologi Ruang Kota Secara Skematik (diadopsi dari Harman, 2003)

Faktor lain yang dapat memodifikasi keseimbangan energi adalah albedo permukaan atau emisivitas. Albedo adalah rasio antara radiasi matahari gelombang pendek yang dipantulkan permukaan dan radiasi yang jatuh pada permukaan. Bahan dengan albedo tinggi akan mengurangi jumlah radiasi matahari yang diserap oleh kulit bangunan (Akbari dkk., 2009).

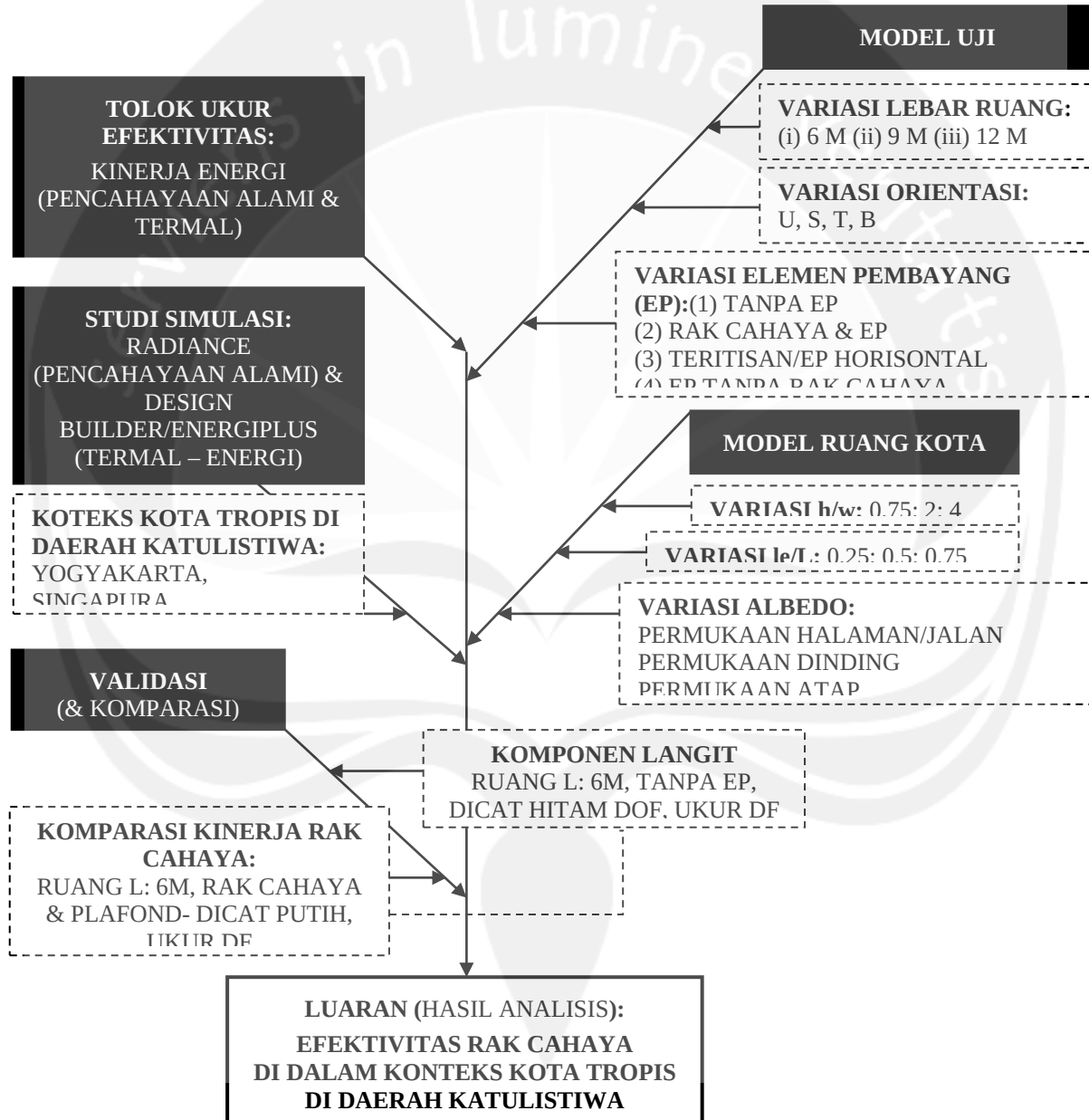
Sabry dkk. (2010) menyelidiki efek perubahan jarak penghambat eksternal (elemen ruang kota di sekitar bangunan yang diamati) dan pantulan permukaan pada kinerja pencahayaan alami di dalam bangunan tersebut. Efek ini akan berbeda untuk orientasi jendela yang berbeda. Kesten dkk. (2010) melakukan kajian tentang kinerja energi pada area kota di

pusat kota Stuttgart. Dua tipe ruang kota generik, yakni: unit terpisah dan menyambung, dikembangkan ke dalam 5 (lima) variasi jarak antar bangunan (L/L), 4 (empat) variasi kedalaman bangunan (D/L) dan 4 variasi *aspect ratio* (h_e/w_e). Hasil studi menunjukkan bahwa geometri ruang kota berdampak signifikan pada kinerja energi bangunan, khususnya kebutuhan energi untuk pencahayaan buatan. Pengaruh ini lebih dominan pada lantai 1 hingga 5. Studi di kota Milan (Morello dkk., 2009) menunjukkan ruang kota berkepadatan tinggi memiliki pengaruh yang tidak signifikan pada konsumsi energi untuk pemanasan. Akan tetapi, lingkungan kota yang semakin padat akan semakin tinggi kebutuhan energi untuk pencahayaan buatan.

III. METODE PENELITIAN

III.1 BAGAN ALIR PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan susunan langkah sebagai berikut:



Gambar III-1. Diagram Tulang Ikan Penelitian

III.2 TOLOK UKUR KINERJA RAK CAHAYA

Penelitian eksperimental ini menggunakan studi simulasi komputer untuk menguji efektivitas rak cahaya di dalam konteks ruang kota. Model dikembangkan untuk mencapai kinerja yang optimum dengan menerapkan prinsip-prinsip desain rak cahaya. Meskipun demikian, studi ini tidak bertujuan untuk menghasilkan desain rak cahaya yang optimum. Tolok ukur efektivitas rak cahaya didasarkan pada kinerja pencahayaan alami dan energi pada tahap operasional. Tingkat efektivitas rak cahaya dianalisis dengan metoda komparasi antara bangunan yang menerapkan rak cahaya dengan bangunan yang menerapkan elemen pembayang lainnya, yaitu: tanpa elemen pembayang, elemen pembayang horizontal, dan elemen pembayang eksternal tanpa rak cahaya internal.

III.3 MODEL SIMULASI

Model-model rak cahaya dikembangkan berdasarkan aplikasi rak cahaya pada ruang kelas di gedung kampus di Yogyakarta. Ruang kelas tersebut memiliki panjang 11 m dan lebar 9 m dengan tata ruang satu lapis. Dari ruang kelas ini dibuat model ruang kelas dengan 3 (tiga) variasi lebar, yaitu: 6 m, 9 m dan 12 m untuk mengamati kemampuan rak cahaya di dalam memantulkan cahaya alami ke sisi terdalam ruang. Semua model ruang kelas memiliki daya pantul yang sama, yaitu: 90% untuk plafond atau lantai atas/atap dari beton bertulang, 80% untuk dinding dari pasangan bata yang diplester dan 50% untuk lantai yang dilapisi keramik. Tinggi model ruang kelas disesuaikan dengan kebutuhan jangkauan pantulan cahaya alami yang berbeda untuk setiap variasi lebar ruang. Ruang kelas terletak pada bangunan berlantai 5. Jumlah lantai ini dipertimbangkan rasional untuk dikembangkan pada bangunan pendidikan di kota sedang maupun kota besar. Simulasi ruang kelas di lantai 1, 3 dan 5 dianggap cukup mewakili semua lantai pada bangunan berlantai 5.

Setiap variasi lebar ruang memiliki jendela dengan *window to floor area ratio* (WFR) sebesar minimum 15% sesuai dengan persyaratan LEED. Semua jendela ditutup kaca bening 6 mm. Semua model memiliki tinggi jendela pandang 1 m dengan tinggi ambang bawah 1 m dari permukaan lantai. Jendela tersebut dilengkapi dengan elemen pembayang dengan model dan ukuran yang sama untuk seluruh aplikasi rak cahaya. Tinggi ambang atas

clerestory bervariasi sesuai lebar ruangnya dengan ketentuan maksimal $2/5$ atau $1/3$ kali lebar ruang. Gabungan antara jendela pandang dan *clerestory* ini menghasilkan *window to wall area ratio* (WWR) diupayakan kurang dari 20% agar panas yang mengalir ke dalam ruang melalui jendela yang tidak tinggi.

Rak cahaya internal dipasang pada ketinggian minimum 2,2 m. Ketinggian ini dianggap cukup untuk menghasilkan kinerja terbaik rak cahaya di daerah tropis (Joarder dkk., 2009) dan mencegah silau dari pandangan penghuni (Hirning dkk., 2010). Permukaan atas rak cahaya dilapisi dengan bahan berdaya pantul 95%. Untuk menghindari silau lebar rak cahaya internal dibuat 1,5 kali tinggi *clerestory*.

Model dengan elemen pembayang horizontal dalam bentuk teritisan juga dikembangkan untuk dikomparasikan dengan model dengan rak cahaya maupun model tanpa elemen pembayang. Teritisan pada setiap lantai dibuat miring 30^0 seperti yang banyak diterapkan di daerah tropis lembab dengan lebar yang menciptakan sudut pembayang horizontal yang sama dengan sudut pembayang horizontal pada model dengan rak cahaya. Elemen pembayang horizontal dan permukaan bawah rak cahaya internal dilapisi dengan bahan berdaya pantul 90%.

Konteks ruang kota dibuat dengan 3 variasi tinggi bangunan terhadap lebar jalan (h_e/w_e atau disingkat dengan h/w), yakni: 0,5; 1 dan 2; dan 3 variasi lebar jalan terhadap panjang bangunan (l_e/L), yaitu: 0,25; 0,5 dan 0,75 yang mewakili geometri ruang kota berkepadatan menengah. Untuk mengamati pengaruh albedo permukaan lingkungan di sekitar obyek studi dibuat dengan 2 variasi material halaman/jalan, 2 variasi material dinding dan 2 variasi material atap bangunan. Variasi material dipilih berdasarkan perbedaan yang cukup besar pada daya pantul terhadap cahaya dan daya serap radiasi matahari.

III.4 METODE SIMULASI

Metode penelitian menggunakan studi simulasi komputer yang divalidasi dengan hasil pengukuran di lapangan. Analisis kinerja pencahayaan alami menggunakan Radiance (*plugged in* Ecotect). Design Builder v. 2.4.2.026 digunakan untuk pemodelan dengan EnergyPlus untuk menganalisis kinerja energi. Design Builder v.3 juga mampu menganalisis

pencahayaan alami dengan metode *ray-tracing*. Metode yang sama dengan yang digunakan oleh Radiance. Tetapi, karena pada Design Builder v. 2.4.2.026 analisis pencahayaan alami menggunakan DELight yang terintegrasi dengan EnergyPlus dengan durasi simulasi yang jauh lebih lama dan *illuminance map* yang jauh di bawah Radiance, maka studi pencahayaan alami menggunakan Radiance (*plugged in* Ecotect). Sudah banyak studi yang dilakukan yang menunjukkan tingkat akurasi Radiance, bahkan untuk analisis pencahayaan alami pada sistem fenestrasi yang kompleks (Andersen dkk., 2003; Andersen dkk., 2005; Reinhart dan Andersen, 2006; McNeil dan Lee, 2012; Ochoa dkk., 2012).

Pada EnergyPlus input kebutuhan energi untuk pencahayaan buatan sebagai pelengkap pencahayaan alami maupun panas yang dihasilkan oleh pemakaian pencahayaan buatan didasarkan hasil analisis DELight. DELight menggunakan metode Radiosity. Studi awal yang dilakukan Ellis dkk.(2004)mengindikasikan bahwa simulasi DELight untuk model-model dengan rak cahaya dapat diharapkan memberikan hasil yang masuk akal. Integrasi EnergyPlus-DELight telah dibuktikan oleh Carroll and Hitchcock (2005) sebagai program yang mampu menghasilkan simulasi kinerja sistem pencahayaan alami secara tidak langsung seperti rak cahaya dengan akurat.

Simulasi pencahayaan alami dilakukan pada tanggal 21 Juni pkl. 12.00 dan pkl. 15.00 pada kondisi langit cerah. Yogyakarta (7.8°LS and 110°BT)dipilih sebagai lokasi karena mewakili wilayah beriklim tropis lembab yang terletak di daerah katulistiwa. Untuk model dengan arah hadap jendela ke utara, pada pkl. 12.00 ruangan akan menerima cahaya alami dengan intensitas maksimum. Sedangkan pada pkl. 15.00 posisi cahaya matahari berpotensi menghasilkan silau pada penghuni di dalam ruangan. Simulasi faktor cahaya alami atau *daylight factor* (DF) dilakukan pada kondisi langit berawan. Pada kondisi ini perubahan arah hadap jendela tidak berpengaruh pada nilai DF. Semua simulasi dengan Radiance dilakukan dengan tingkat akurasi tinggi, baik dari aspek detail model, keragaman pencahayaan dan kualitas gambar dan dengan 4 pantulan tidak langsung.

Singapura dipilih sebagai area studi simulasi energi karena mewakili wilayah beriklim tropis lembab yang terletak di daerah katulistiwa ($1^{\circ}22'\text{LU}$). Dua lokasi terpilih (Yogyakarta dan Singapura) mampu mewakili wilayah beriklim tropis lembab dengan dua variasi posisi

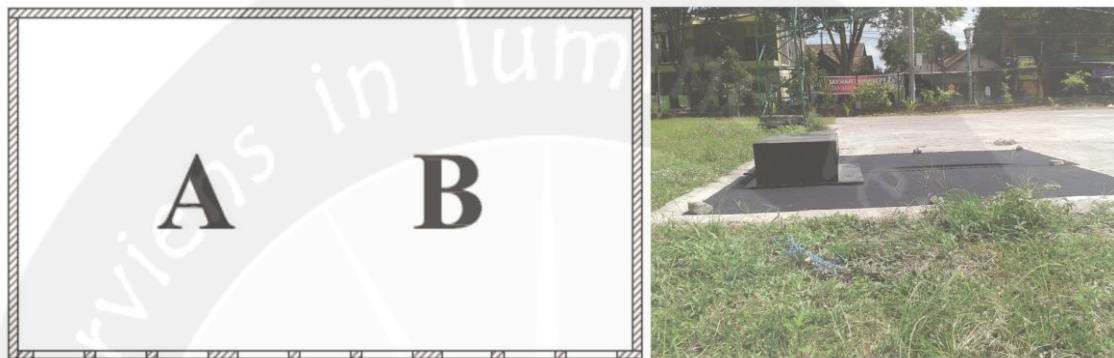
terhadap garis katulistiwa. Di samping itu, ada dua studi validasi EnergyPlus yang dilakukan untuk area Singapura. Studi yang dilakukan Miller (2011) menghasilkan kesimpulan bahwa hasil simulasi aliran udara di luar bangunan secara keseluruhan hanya bergeser 2% lebih tinggi dibandingkan dengan hasil pengukuran lapangan. Sementara itu, studi yang dilakukan Xiangjing (2011) menghasilkan pergeseran antara hasil simulasi dan pengukuran lapangan yang kecil di dalam memperkirakan beban penyejukan tahunan pada tingkat bangunan dan zona individual jika beban panas internalnya dominan. Tingkat pergeseran yang tinggi (> 5%) terjadi pada bangunan dengan beban panas yang melalui kulit bangunan yang dominan. Ada beberapa studi lain yang telah dilakukan untuk menguji keandalan EnergyPlus. Kasus 195 hingga 960 ANSI/ASHRAE Standard 140-2011 (Henninger dan Witte, 2011) merupakan uji keandalan EnergyPlus yang dilakukan pada selubung termal bangunan. Beberapa kasus dimaksudkan untuk pengujian bangunan dengan konstruksi selubung yang ringan sebagaimana banyak diterapkan di daerah tropis lembab. Hanya saja area studi ini tidak berada di wilayah beriklim tropis lembab.

Simulasi energi dilakukan untuk rentang waktu satu tahun untuk menghasilkan DF, beban penyejukan secara rinci dan kebutuhan energi untuk pencahayaan buatan dalam satu tahun. Selain variasi sebagaimana yang dilakukan pada simulasi pencahayaan alami, model juga disimulasikan dengan empat variasi orientasi jendela. Model ruang kelas menggunakan sistem AC split tanpa udara segar. Jadwal operasional menggunakan tipe penyejukan untuk ruang kelas (*educational classroom cooling*). Sedangkan sistem pencahayaan buatan menerapkan jadwal untuk ruang kelas (*educational classroom light*), jenis lampu gantung dengan *standard lighting power density*, tipe pengendalian secara linier dan tingkat silau maksimum (*daylight glare index* atau DGI) untuk ruang kelas.

III.5 VALIDASI

Meskipun banyak studi yang telah membuktikan keandalan dan akurasi kedua program simulasi, pengukuran di lapangan dilakukan untuk memvalidasi faktor tingkat terang langit yang sangat menentukan kinerja pencahayaan alami dan bersifat kontekstual (tergantung area studi). Validasi menggunakan model ruang kelas dengan lebar 6 m, terdiri dari 1 lantai dengan geometri jendela yang sama dengan model yang disimulasikan. Jendela tidak ditutup

kaca karena validasi hanya dilakukan untuk membandingkan faktor terang langit atau *Sky Component* (SC) Model fisik dibuat berskala 1:10. Interior model dicat hitam dof agar faktor pemantulan internal atau *internal reflected component* (IRC) mendekati 0. Model diletakkan di halaman dengan tingkat hambatan eksternal sebesar 0 dan dialasi dengan kain berwarna hitam.



Gambar III-2. Posisi titik pengukuran (kiri) dan model validasi SC saat berada di lokasi pengukuran (kanan).

Menurut Marsh (Ecotect, 2005) SC merupakan perbandingan antara tingkat terang di dalam ruangan dengan $IRC = 0$ dengan bukaan cahaya terhadap tingkat terang langit dalam kondisi berawan (*overcast sky*) pada pertengahan musim dingin (di Inggris) pada jam 12.00. Oleh karenanya, pengukuran SC untuk kota Yogyakarta yang ideal dilakukan pada 21 Juni jam 12.00 (jam matahari). Untuk itu pengukuran SC dilakukan pada 21 Juni jam 12.00 (jam matahari) dan juga pada 4 hari yang mendekati tanggal tersebut untuk mendapatkan 5 data tingkat terang. Diupayakan data tingkat terang diambil pada kondisi langit berawan. Pengukuran dilakukan dengan menempatkan sebuah digital luxmeter di luar model (Hobo Hobo U12-012) dan dua buah digital luxmeter di dalam model (Hobo UA 002-08) yang mewakili area kerja model. Luxmeter ditempatkan pada ketinggian bidang kerja 7,5 cm pada skala 1:1 atau 0,75 cm pada skala 1:10. Hasil pengukuran akan otomatis terekam mulai pkl. 08.00 hingga 16.00 dengan interval waktu 5 menit.

Tabel III-1. Daftar instrumen pengukuran dan spesifikasinya

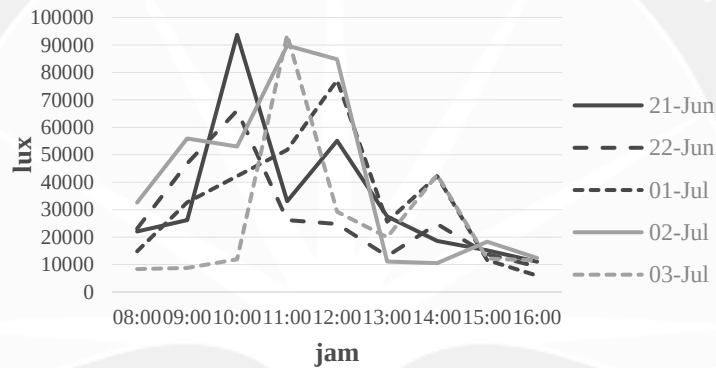
Nama Alat	Jangkauan Pengukuran	Tingkat Akurasi
Hobo U12-012 	Suhu: -20 – 70 °C Kelembaban relatif: 5-95 % Intensitas cahaya: 1-3000 lm/ft²	Suhu: ± 0,35 °C Kelembaban relatif: ± 2,5% Intensitas cahaya: bervariasi sesuai panjang gelombang cahaya
Hobo UA 002-08 	Suhu: -20 – 70 °C Intensitas cahaya: 0-320000 lm/ft²	Suhu: ± 0,47 °C pada 25 °C Intensitas cahaya: bervariasi sesuai panjang gelombang cahaya

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

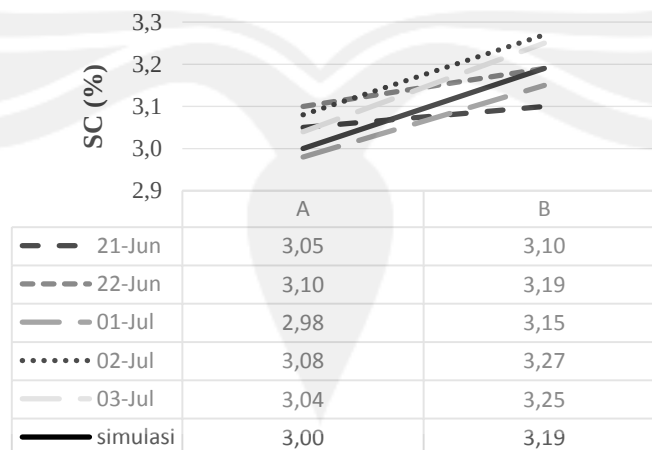
IV.1 STUDI VALIDASI

IV.1.1 Validasi komponen langit (SC)

Pengukuran tingkat terang untuk validasi SC dilakukan selama 5 hari pada jam 12.00 (jam matahari). Kondisi langit pada 21 Juni, 1 Juli dan 2 Juli pada jam 12.00 memiliki tingkat terang yang cukup tinggi, sedangkan pada 22 Juni dan 3 Juli tingkat terang langit cenderung rendah.



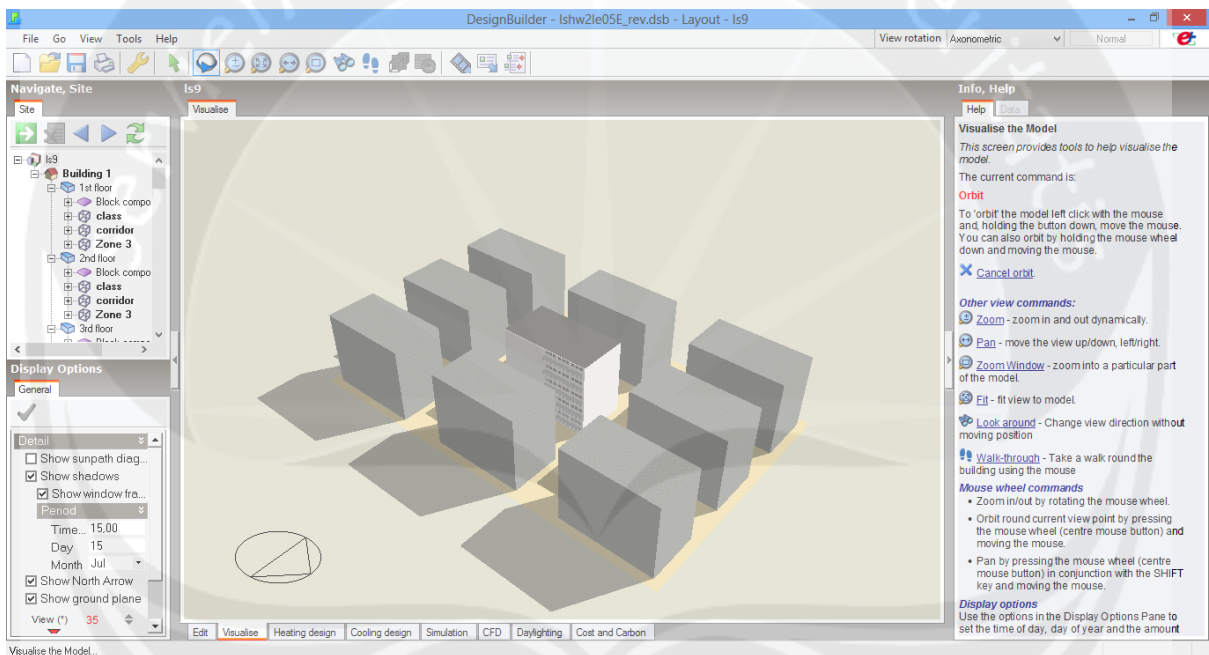
Gambar IV-1. Tingkat terang langit selama pengukuran SC



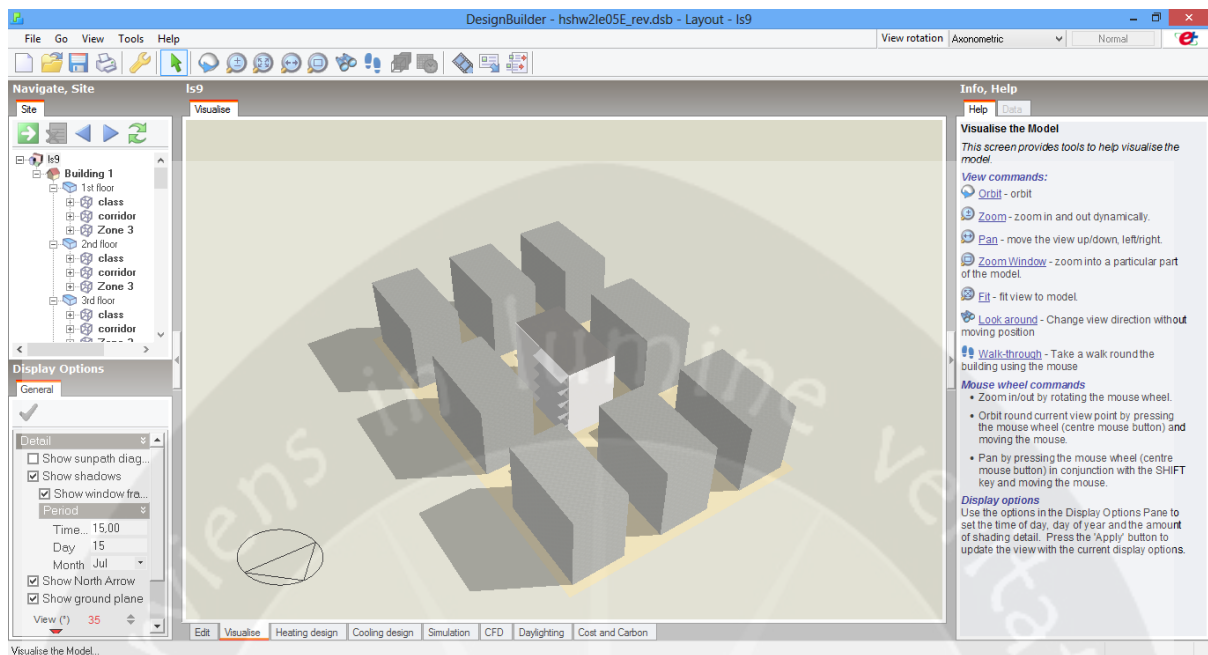
Gambar IV-2. Grafik hasil pengukuran dan simulasi SC

Gambar IV-2 menunjukkan hasil simulasi bergeser tidak terlalu jauh dari hasil pengukuran, meskipun standard deviasinya (4,68% pada titik A dan 6,27% pada titik B) sudah melebihi standard deviasi yang dapat diterima (5%). Hanya hasil pengukuran pada 1 Juli yang memiliki standard deviasi < 5%, yakni: 2% pada titik A dan 4% pada titik B. Secara umum dapat disimpulkan bahwa Radiance (plugged in Ecotect) cukup valid untuk simulasi kinerja pencahayaan alami jika melihat tingkat terang langit yang memiliki pola yang tidak teratur atau konsisten.

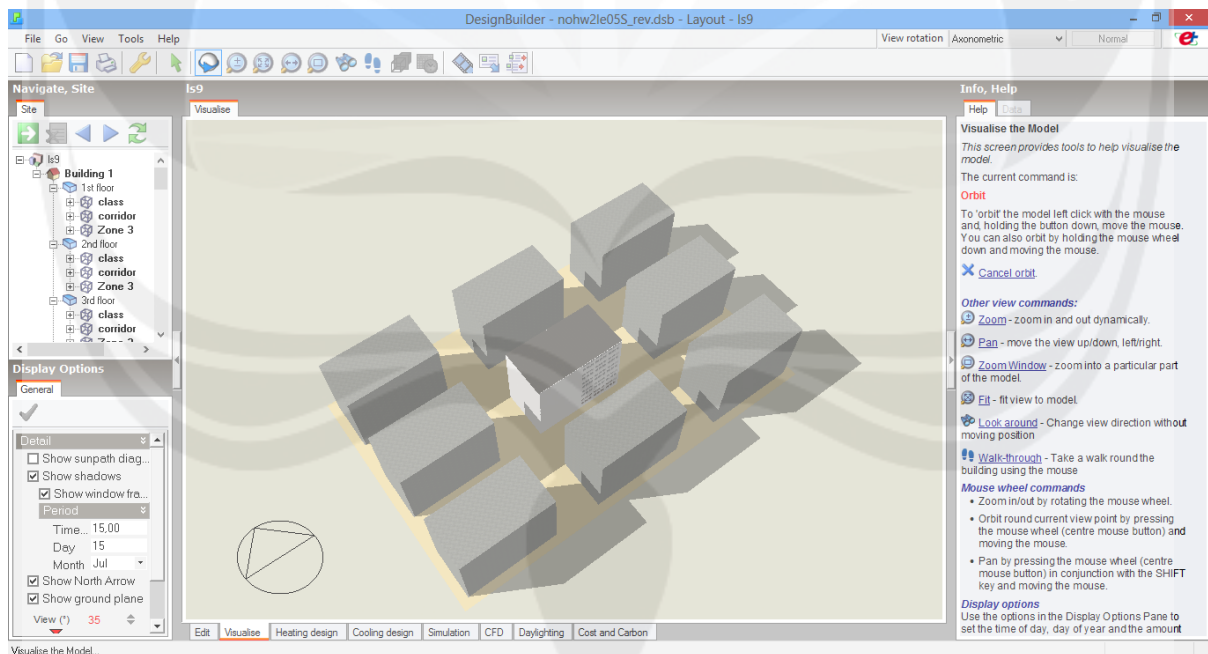
IV.2 MODEL SIMULASI



Gambar IV-3. Model bangunan dengan rak cahaya dengan h/w: 2 dan le/L: 0,5 dalam Design Builder



Gambar IV-4. Model bangunan dengan teritisan dengan h/w : 2 dan l_e/L : 0,5 dalam Design Builder



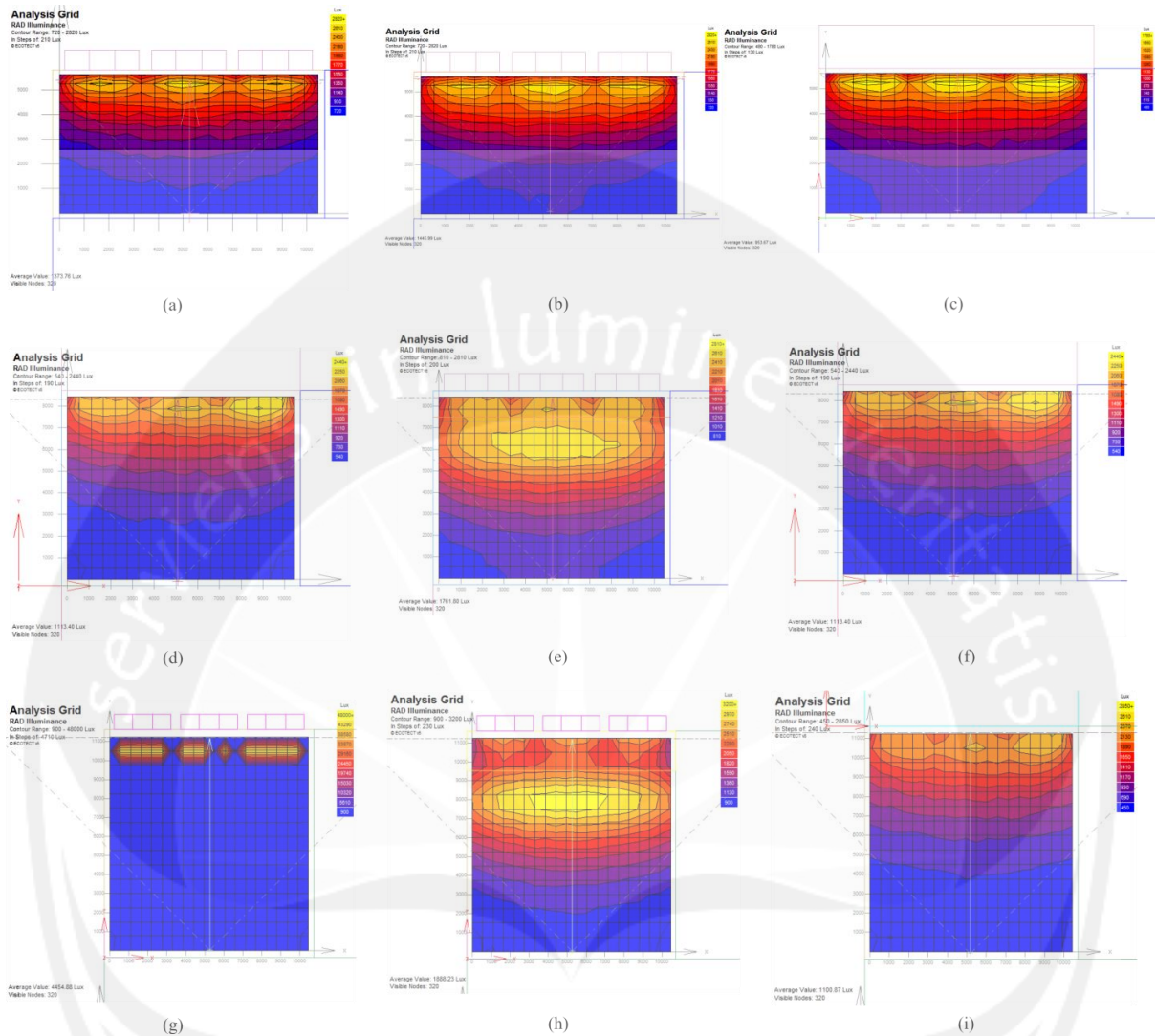
Gambar IV-5. Model bangunan tanpa elemen peneduh dengan h/w : 2 dan l_e/L : 0,5 dalam Design Builder

IV.3 KINERJA PENCAHAYAAN ALAMI

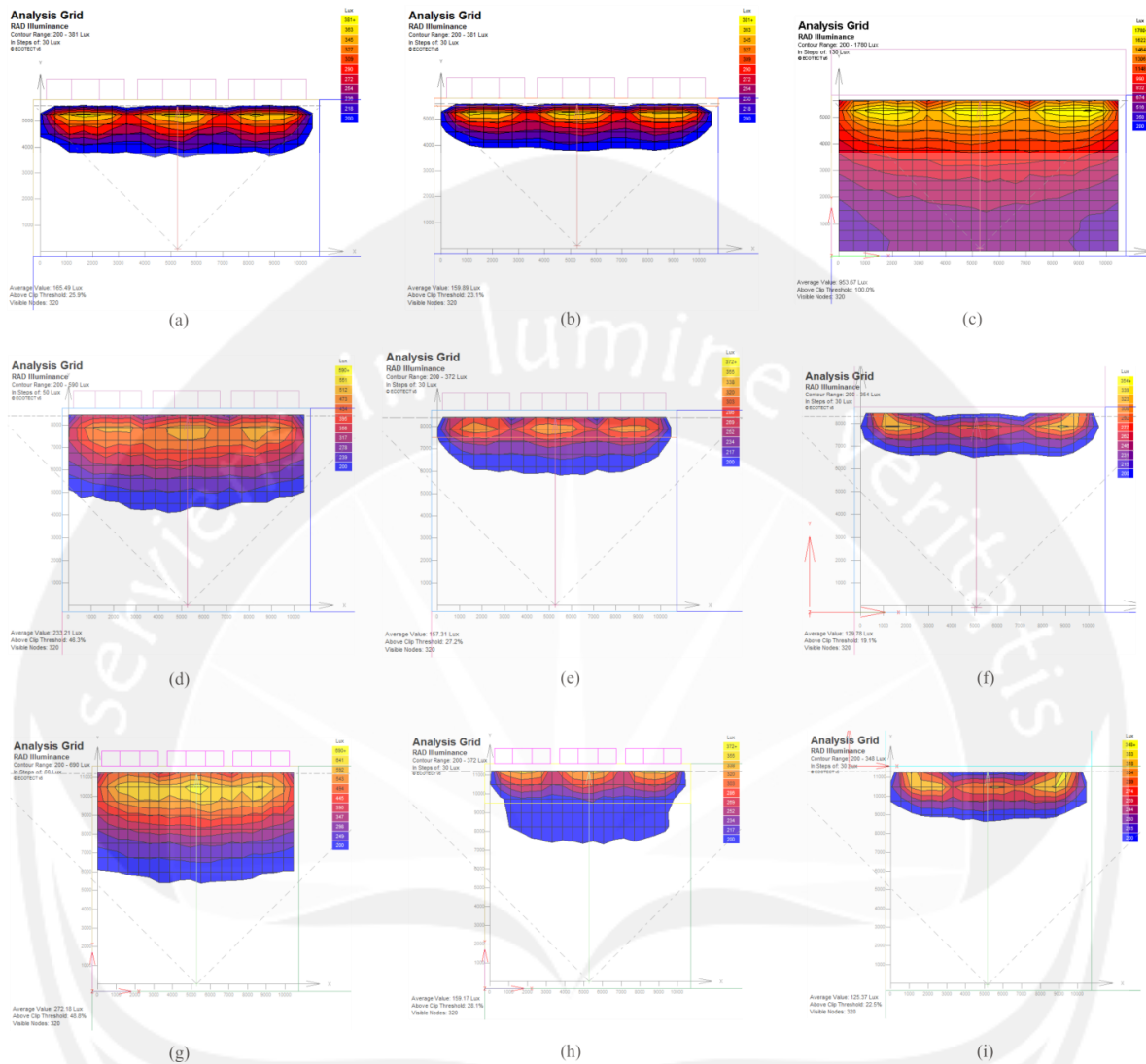
IV.3.1 Pengaruh geomorfologi ruang kota pada kinerja pencahayaan alami

Gambar IV-6 menunjukkan tingkat terang yang tinggi yang diciptakan pada bidang kerja di dalam bangunan tunggal tanpa lingkungan sekitar. Secara umum cahaya alami yang berlimpah tersedia di dalam ruangan dengan bukaan menghadap ke matahari pada kondisi langit cerah. Tingkat terang terendah sebesar 450 lux terjadi di dalam ruangan dengan lebar 12 m yang dilengkapi dengan teritisan yang cukup lebar. Tingkat terang sebesar ini cukup untuk kegiatan menggambar. Silau yang berlebihan potensial dihasilkan oleh bukaan yang hanya dilengkapi dengan elemen peneduh eksternal saja maupun yang dilengkapi dengan elemen peneduh eksternal dengan rak cahaya internal. Teritisan yang lebar mampu mengurangi potensi silau. Untuk ruangan dengan lebar 6 m teritisan yang lebar memiliki kinerja pencahayaan alami yang terbaik. Kemampuan rak cahaya internal untuk memantulkan lebih banyak cahaya alami ke sisi terdalam ruangan dapat menciptakan distribusi tingkat terang horisontal yang lebih seragam dibandingkan dengan distribusi tingkat terang yang diciptakan oleh teritisan lebar.

Pada kondisi tingkat terang langit yang rendah (*overcast sky*), untuk bukaan ruangan yang lebar yang menghadap ke selatan pada 21 Juni pkl. 08.00, rak cahaya memiliki kinerja pencahayaan alami yang lebih baik daripada teritisan lebar (Gambar IV-7). Secara umum aplikasi rak cahaya membutuhkan perbaikan yang cermat untuk mengurangi efek silau pada kondisi langit cerah dan untuk meningkatkan kemampuan memantulkan cahaya alami ke sisi terdalam ruangan pada kondisi langit mendung pada bangunan tunggal tanpa penghalang eksternal.



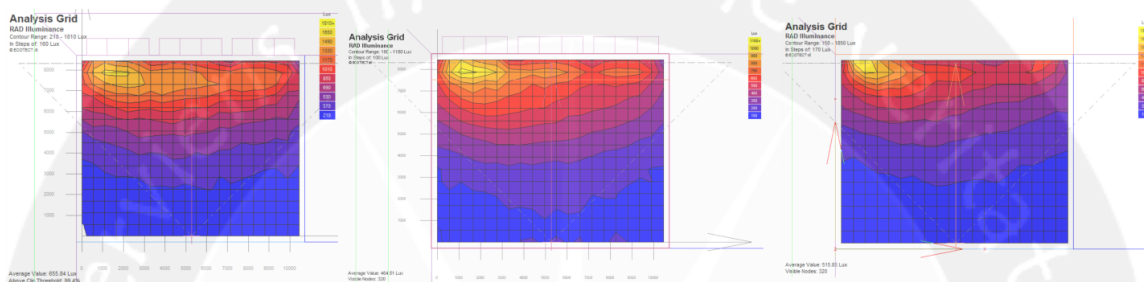
Gambar IV-6. Peta tingkat terang ruangan dengan lebar 6 m dengan bukaan menghadap ke utara(kota Yogyakarta)pada 21 Juni pkl. 12.00 dan kondisi langit cerah dan dilengkapi dengan elemen peneduh tanpa tanpa rak cahaya internal (a), dengan rak cahaya (b) dan dengan teritisan lebar (c); peta tingkat terang ruangan dengan lebar 9 m dengan bukaan menghadap ke utara pada 21 Juni pkl. 12.00 dan kondisi langit cerah dan dilengkapi dengan elemen peneduh tanpa tanpa rak cahaya internal (d), dengan rak cahaya (e) dan dengan teritisan lebar (f); peta tingkat teang ruangan dengan lebar 12 m dengan bukaan menghadap ke utara pada 21 Juni pkl. 12.00 dan kondisi langit cerah dan dilengkapi dengan elemen peneduh tanpa tanpa rak cahaya internal (g), dengan rak cahaya (h) dan dengan teritisan lebar (i).



Gambar IV-7. Peta tingkat terang ≥ 200 lux ruangan dengan lebar 6 m dengan bukaan menghadap ke utara (kota Yogyakarta) pada 21 Juni pkl. 12.00 dan kondisi langit cerah dan dilengkapi dengan: elemen peneduh tanpa tanpa rak cahaya internal (a), dengan rak cahaya (b) dan dengan teritisan lebar (c); peta tingkat terang ≥ 200 lux ruangan dengan lebar 9 m dengan bukaan menghadap ke utara pada 21 Juni pkl. 12.00 dan kondisi langit cerah dan dilengkapi dengan elemen peneduh: tanpa rak cahaya internal (d), dengan rak cahaya (e) dan dengan teritisan lebar (f); peta tingkat terang ≥ 200 lux ruangan dengan lebar 12 m dengan bukaan menghadap ke utara pada 21 Juni pkl. 12.00 dan kondisi langit cerah dan dilengkapi dengan elemen peneduh: tanpa rak cahaya internal (g), dengan rak cahaya (h) dan dengan teritisan lebar (i).

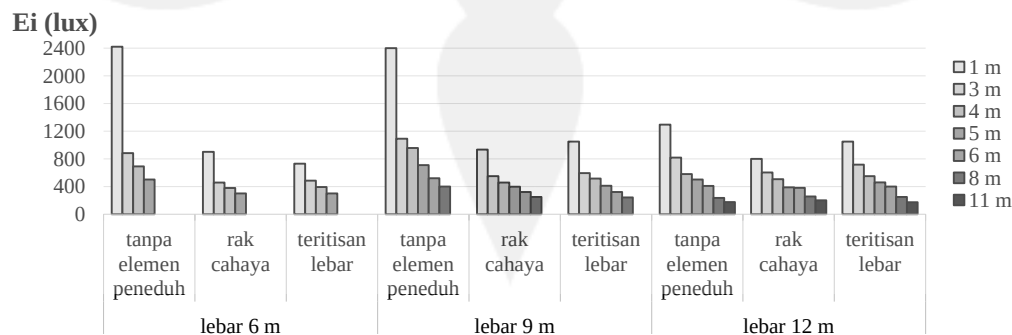
Hasil simulasi tingkat terang dan DF pada lantai pertama di dalam bangunan yang terletak di daerah perkotaan berkepadatan tinggi (h/w 4 dan le/L 0,25) menunjukkan bahwa penghalang eksternal dapat memperbaiki distribusi tingkat terang di dalam ruangan tanpa elemen peneduh. Meskipun secara umum tingkat terang di dalam ruangan dengan rak cahaya

menurun, tetapi penetrasi cahaya alami di dalam ruangan dengan lebar 12 m lebih baik daripada penetrasi cahaya alami di dalam ruangan tanpa elemen peneduh pada 21 Juni pkl. 12.00. Penghalang eksternal membuat tingkat terang di dekat bukaan dengan rak cahaya di dalam ruangan dengan lebar 9 m dan 12 m lebih rendah daripada tingkat terang di dalam ruangan tanpa elemen peneduh maupun dengan teritisan. Sementara itu rak cahaya internal mampu menciptakan tingkat terang pada sisi terdalam ruangan yang lebih tinggi daripada tingkat terang ruangan dengan teritisan lebar.

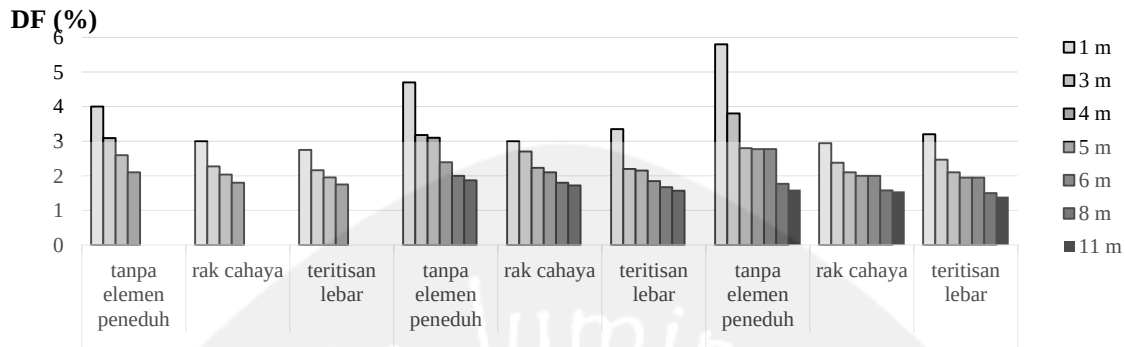


Gambar IV-8. Peta tingkat terang horisontal ruangan dengan lebar 9 m pada bangunan tunggal 21 Juni pkl. 12.00 dengan kondisi langit cerah: tanpa rak cahaya internal (a), dengan rak cahaya (b), dengan teritisan (c) di dalam ruang kota Yogyakarta dengan h/w : 4 dan l_e/L : 0,25.

Gambar 9 dan 10 menunjukkan bahwa rak cahaya masih efektif di dalam menciptakan distribusi tingkat terang yang seragam meskipun diterapkan di ruang kota yang padat (h/w : 4 dan l_e/L : 0,25), khususnya untuk ruangan yang lebar (9-12 m). Rak cahaya mampu memantulkan cahaya alami ke sisi ruangan terdalam dengan tingkat terang ataupun DF yang lebih tinggi daripada tingkat terang yang dihasilkan oleh elemen peneduh lainnya pada ruangan dengan lebar 12 m.

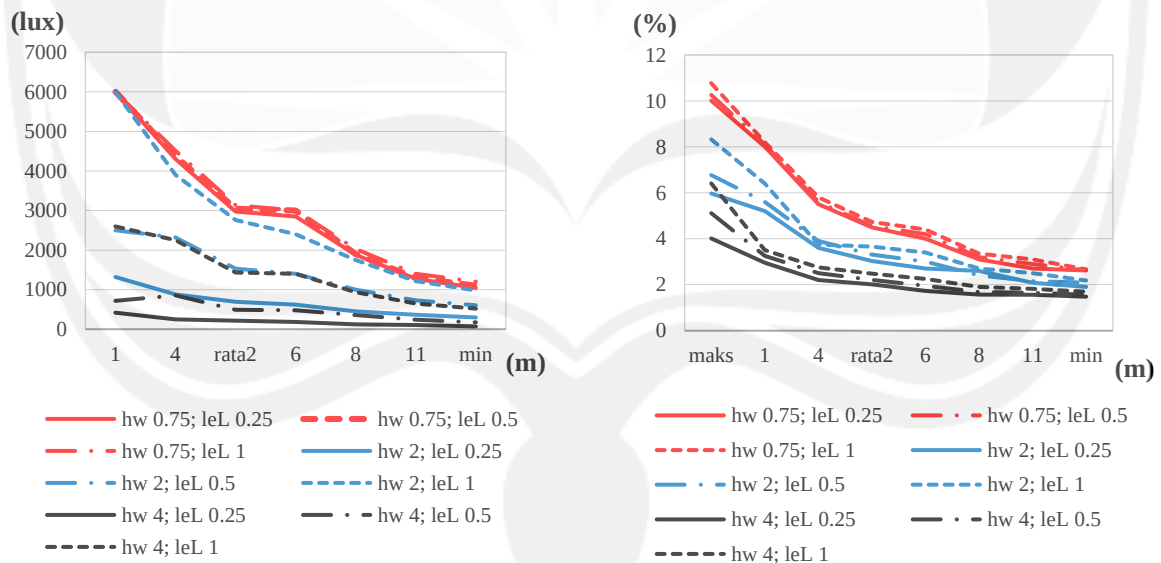


Gambar IV-9. Tingkat terang pada jarak tertentu dari bukaan yang menghadap ke Utara pada 21 Juni pkl. 12.00 dengan kondisi langit cerah di lantai I di dalam ruang kota Yogyakarta dengan h/w : 4 dan l_e/L : 0,25.



Gambar IV-10. DF pada jarak tertentu dari bukaan yang menghadap ke Utara pada 21 Juni pkl. 12.00 di lantai I di dalam ruang kota Yogyakarta dengan h/w : 4 dan le/L : 0,25.

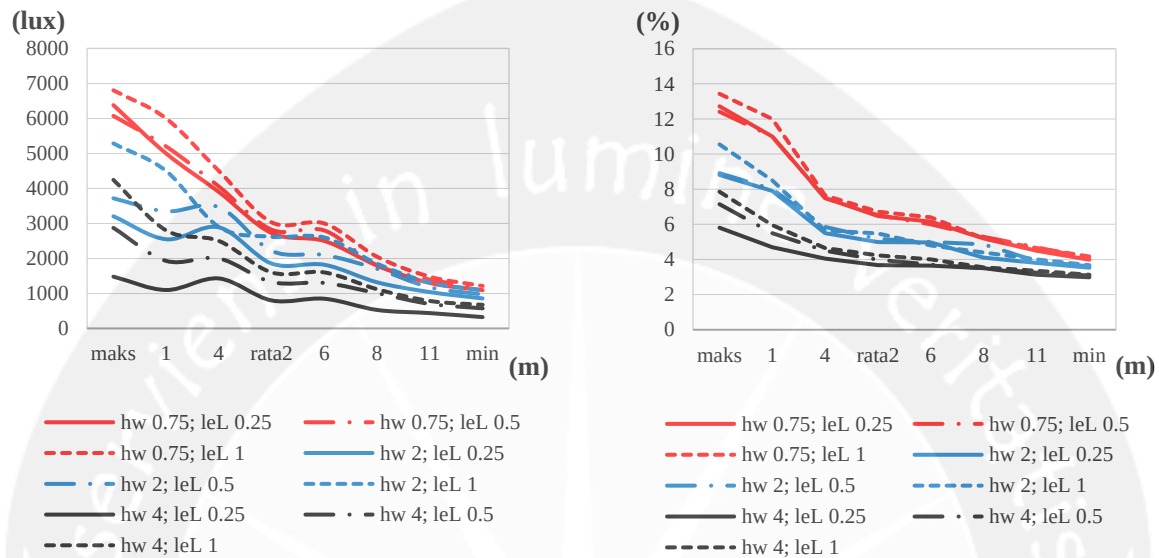
Pengaruh morfologi ruang kota pada tingkat terang maupun DF ruangan yang terletak di lantai 1 baik pada kondisi langit cerah maupun mendung lebih ditentukan oleh rasio hw daripada rasio le/L . Pada kondisi langit cerah pada 21 Juni pkl. 12.00 perubahan tingkat terang pada lantai 1 yang signifikan akibat variasi le/L terjadi pada ruang kota dengan h/w sedang hingga tinggi.



Gambar IV-11. Tingkat terang (kiri) dan DF (kanan) ruangan lebar 12 m dengan rak cahaya yang menghadap ke Utara pada lantai I pada berbagai variasi geometri ruang kota (kasus kota Yogyakarta). Tingkat terang diukur pada 21 Juni pkl. 12.00 dengan kondisi langit cerah.

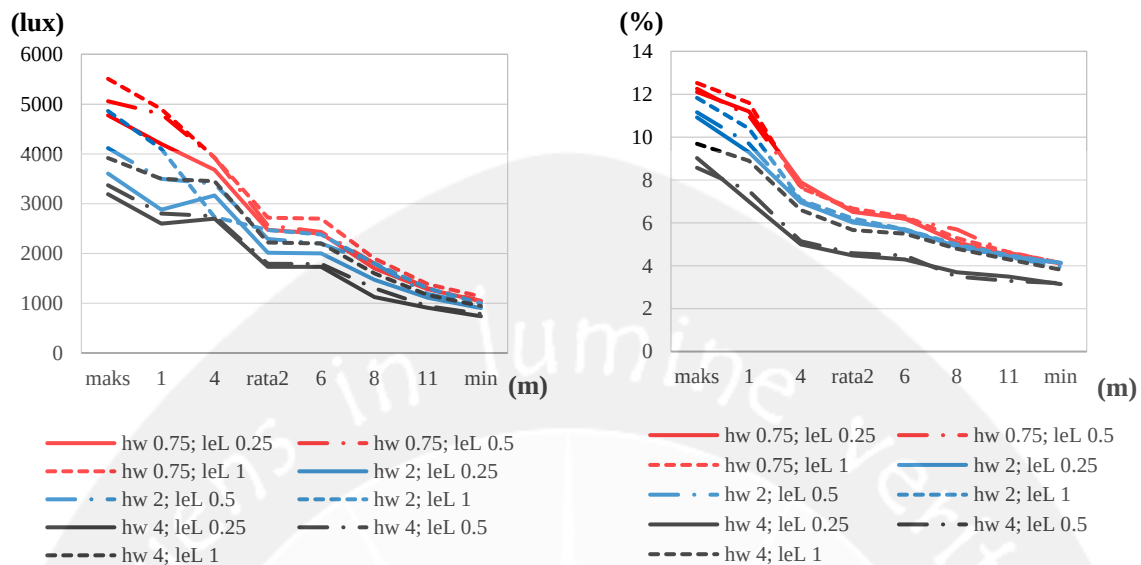
Pada lantai III pengaruh variasi morfologi ruang kota, baik h/w maupun le/L , pada DF ruangan pada kondisi langit mendung menunjukkan pola yang mirip dengan pola DF pada

lantai I, hanya DF pada lantai III lebih besar daripada DF pada lantai I. Pengaruh variasi le/L pada ruangan di lantai III pada kondisi langit cerah (21 Juni pkl. 12.00) cukup signifikan pada ruang kota dengan h/w: 4.



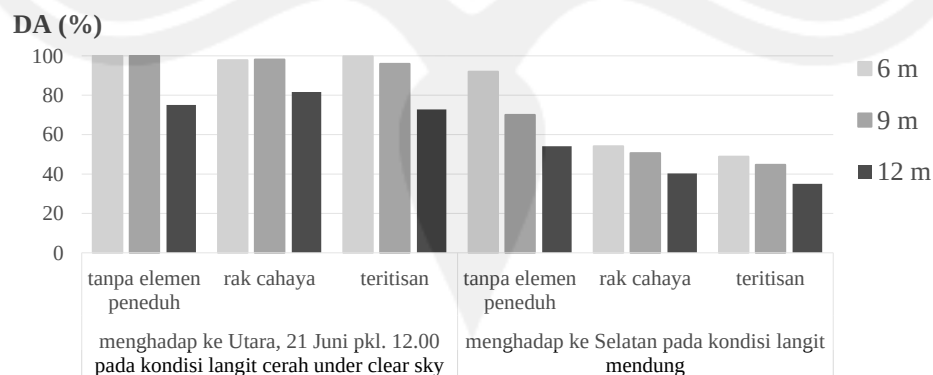
Gambar IV-12. Tingkat terang (kiri) dan DF (kanan) ruangan ruangan lebar 12 m dengan rak cahaya yang menghadap ke Utara pada lantai III pada berbagai variasi geometri ruang kota (kasus kota Yogyakarta). Tingkat terang diukur pada 21 Juni pkl. 12.00 dengan kondisi langit cerah.

Pada kondisi langit mendung rasio h/w memiliki pengaruh pada tingkat terang ruangan Pada lantai V morfologi ruang kota yang memberikan pengaruh (meskipun tidak sangat signifikan) pada tingkat terang maupun DF hanya h/w saja dan hanya pada area yang tidak jauh dari bukaan (hingga 6 m).



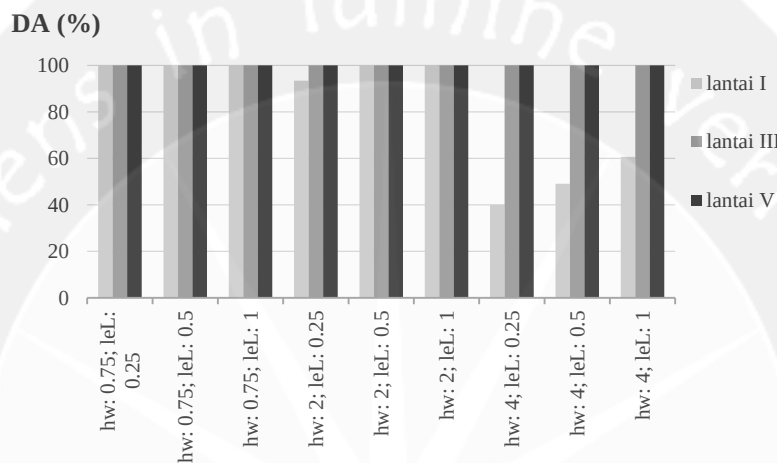
Gambar IV-13. Tingkat terang (kiri) dan DF (kanan) ruangan lebar 12 m dengan rak cahaya yang menghadap ke Utara pada lantai V pada berbagai variasi morfologi ruang kota (kasus kota Yogyakarta). Tingkat terang diukur pada 21 Juni pkl. 12.00 dengan kondisi langit cerah.

Efektivitas rak cahaya pada ruangan yang lebar (12 m) dengan bukaan yang menghadap ke Utara pada kondisi langit cerah juga dijelaskan dari *daylight autonomy* (Gambar 14). *Daylight Autonomy* (DA) menggambarkan prosentase area dengan tingkat terang ≥ 200 lux. Rak cahaya pada ruang dengan lebar 12 m dengan bukaan menghadap ke Utara memiliki DA yang lebih tinggi daripada ruangan yang sama dengan elemen peneduh lain. Rak cahaya menjadi tidak efektif untuk bukaan yang menghadap ke Selatan pada kondisi langit mendung di ruang kota yang padat (Gambar IV-14).



Gambar IV-14. Prosentase tingkat terang ≥ 200 lux ruangan dengan bukaan yang menghadap ke Utara di lantai I pada 21 Juni pkl. 12.00 di dalam ruang kota dengan h/w: 4 dan le/L: 0,25.

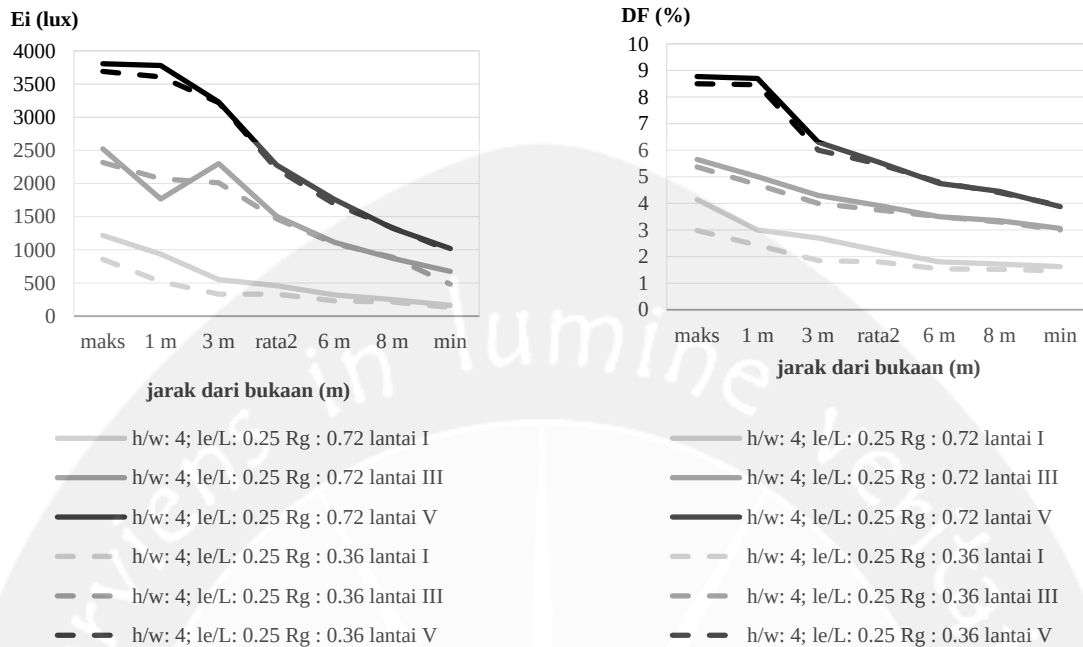
Ruang kota dengan h/w : 0,75 masih memungkinkan penetrasi cahaya alami secara maksimal ke dalam ruangan dengan lebar 12 m dengan bukaan menghadap ke Utara. Ruang kota dengan h/w menengah (2) secara umum juga masih memungkinkan penetrasi cahaya alami secara maksimal. Hanya pada lantai 1 di dalam ruang kota dengan le/L : 0,25 yang memiliki DA sekitar 90%. Permasalahan pencahayaan alami yang akan bermuara pada pemakaian lampu dialami pada lantai 1 yang berada di dalam ruang kota yang padat (h/w : 4).



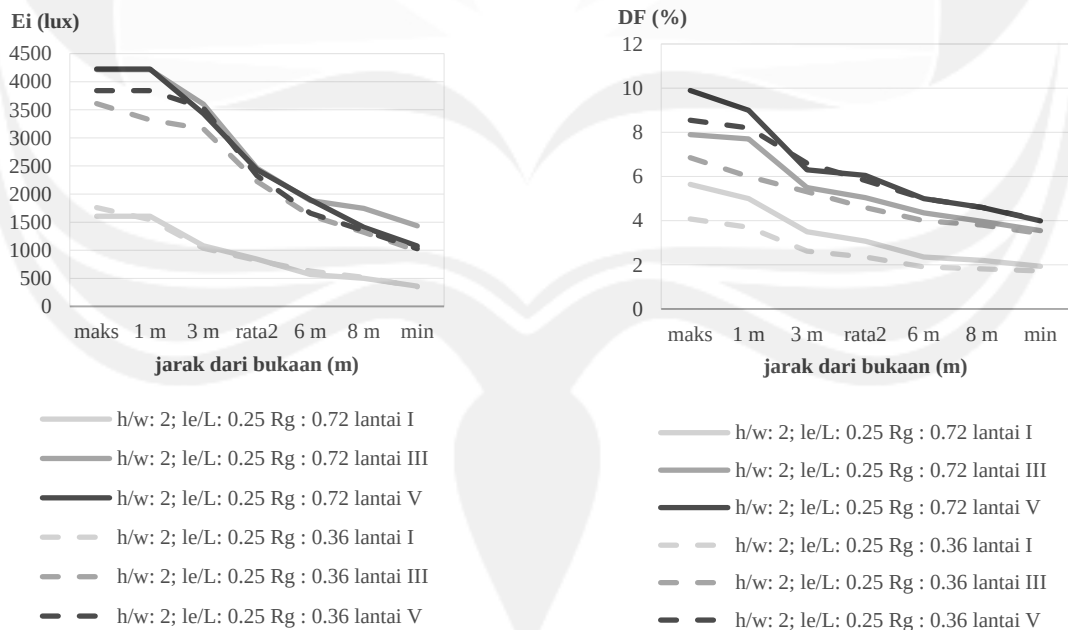
Gambar IV-15. *Daylight Autonomy* atau prosentasi area dengan tingkat terang ≥ 200 lux untuk ruang dengan lebar 12 m dengan bukaan menghadap ke Utara di kota Yogyakarta

IV.3.2 Pengaruh daya pantul permukaan eksternal pada kinerja pencahayaan alami

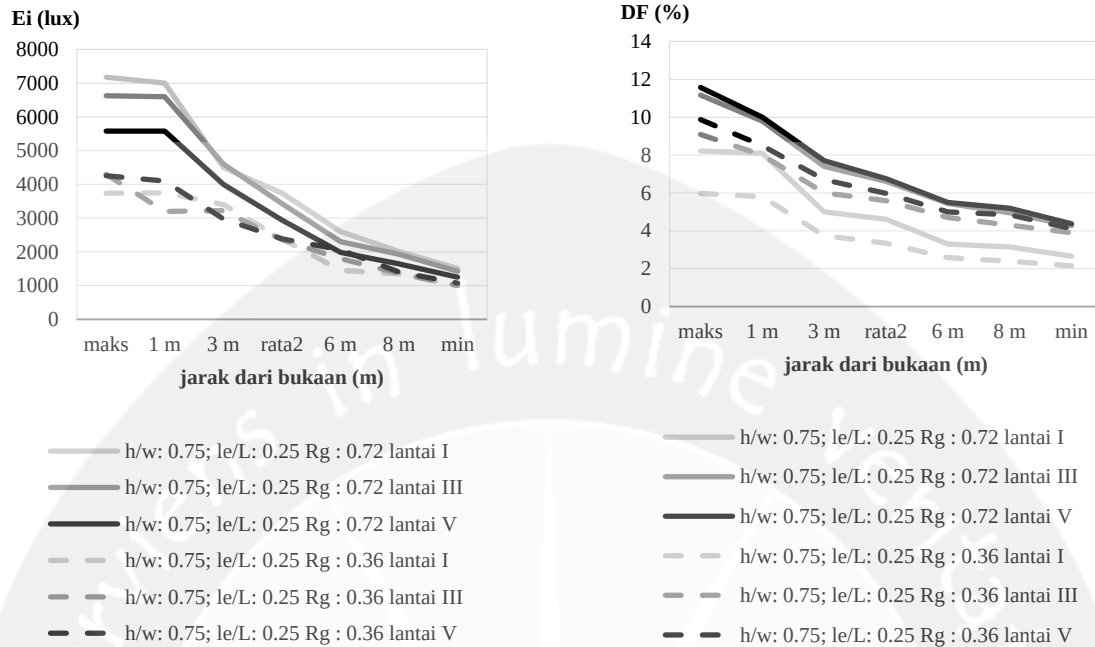
Pengaruh daya pantul permukaan halaman pada tingkat terang maupun DF ruangan yang terletak di ruang kota yang padat (h/w : 4 dan le/L : 0,25) hanya terlihat pada lantai I dengan posisi hingga jarak 3 m dari bukaan. Hal ini dapat dijelaskan karena cahaya alami yang dipantulkan oleh permukaan halamanlah yang berperan dominan di dalam menentukan tingkat terang ruangan pada setiap lantai yang berada di ruang kota yang padat. Untuk ruang kota dengan kepadatan menengah (h/w : 2 dan le/L : 0,25) pengaruh daya pantul permukaan halaman pada tingkat terang maupun DF ruangan dapat terlihat mulai dari lantai 1 hingga lantai 5 pada area yang dekat dengan bukaan. Pada ruang kota yang tidak padat (h/w : 0,75) tingkat terang atau DF ruangan justru lebih ditentukan oleh daya pantul permukaan halaman di sekitarnya daripada oleh perbedaan lantai, terlebih pada area yang berjarak ≤ 6 m dari bukaan.



Gambar IV-16. Tingkat terang (kiri) dan DF (kanan) ruangan dengan lebar 9 m dengan rak cahaya dan bukaan menghadap ke Utara dengan variasi koefisien pantul halaman ruang kota Yogyakarta dengan h/w: 4 dan le/L: 0,25.

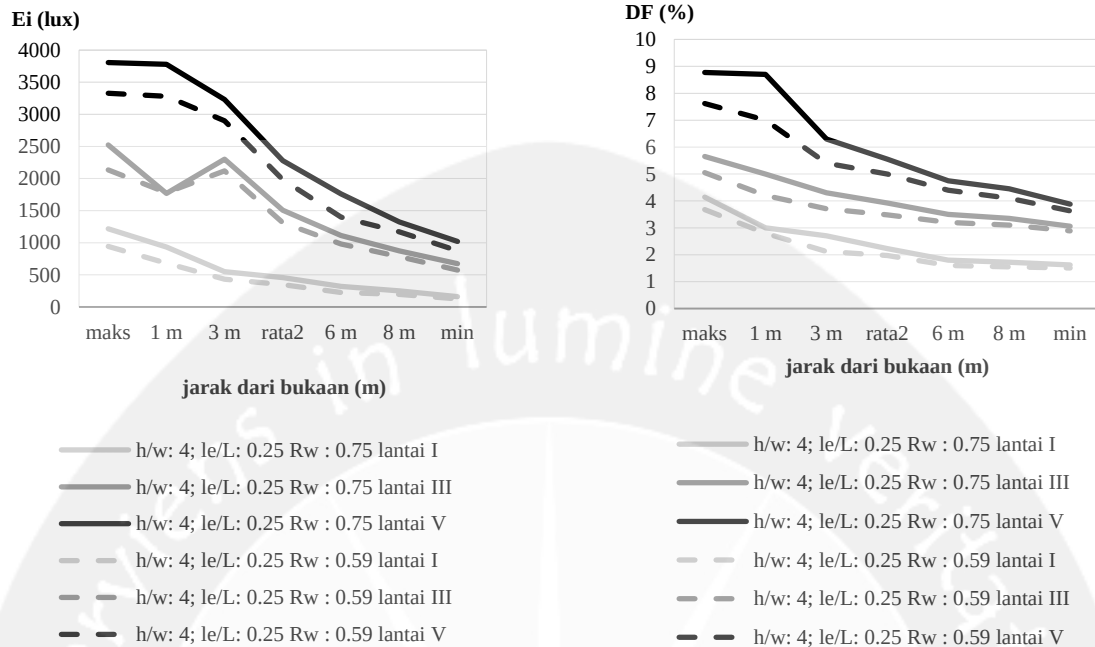


Gambar IV-17. Tingkat terang (kiri) dan DF (kanan) ruangan dengan lebar 9 m dengan rak cahaya dan bukaan menghadap ke Utara dengan variasi koefisien pantul halaman kota Yogyakarta dengan h/w: 2 dan le/L: 0,25.

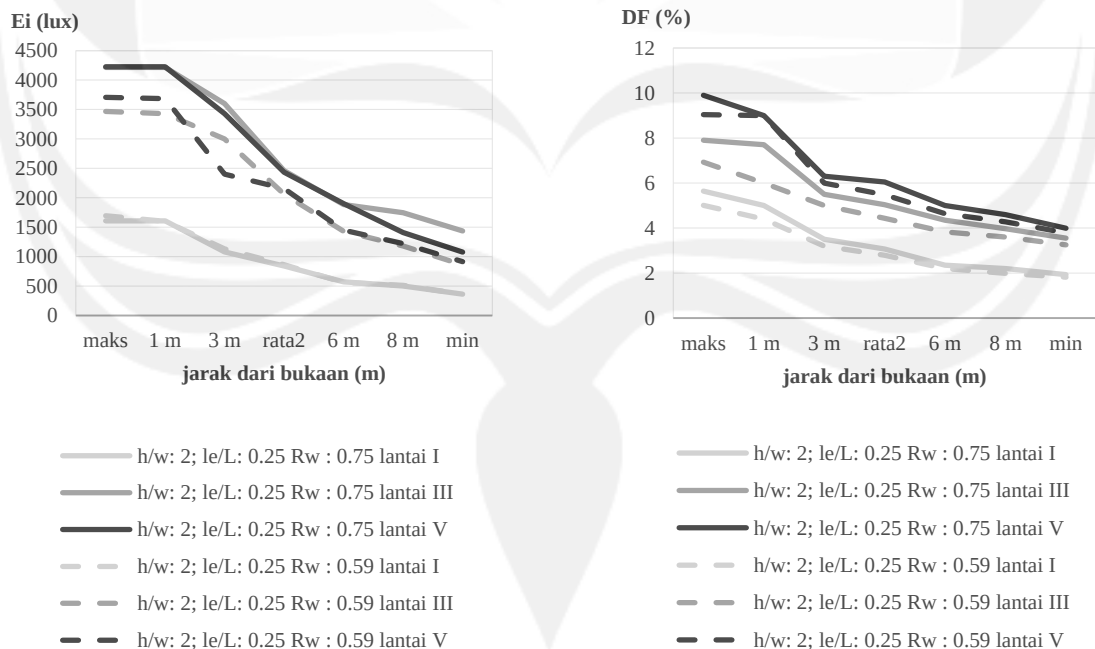


Gambar IV-18. Tingkat terang (kiri) dan DF (kanan) ruangan dengan lebar 9 m dengan rak cahaya dan bukaan menghadap ke Utara dengan variasi koefisien pantul halaman kota Yogyakarta dengan h/w: 0,75 dan le/L: 0,25.

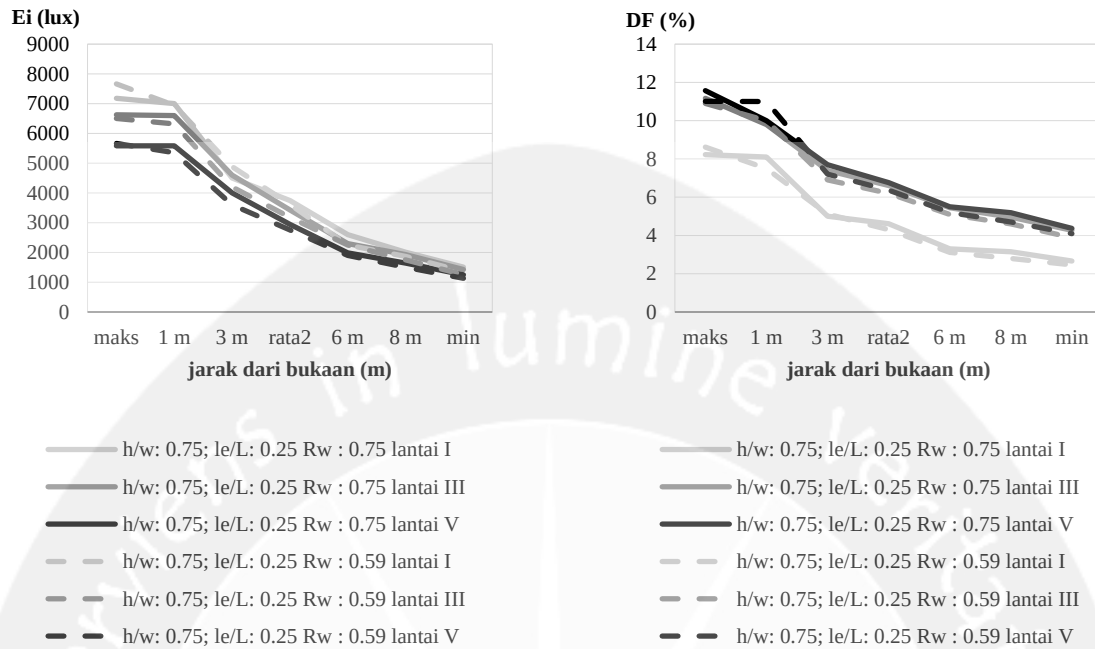
Sementara pengaruh daya pantul dinding eksternal pada tingkat terang atau DF ruangan yang terletak di ruang kota yang padat justru cukup signifikan pada lantai 3 hingga lantai 5. Semakin tinggi posisi ruangan pengaruh daya pantul dinding semakin terasa. Pengaruh ini hanya terlihat pada area yang berjarak hingga 3 m dari bukaan saja. Variasi daya pantul dinding eksternal tidak berpengaruh pada tingkat terang atau DF untuk ruang kota yang tidak padat (h/w: 0,75 dan le/L: 0,25). Variasi daya pantul atap dapat dikatakan tidak memberikan pengaruh apapun pada tingkat terang atau DF ruangan, baik yang berada di ruang kota yang padat maupun yang tidak padat (Gambar IV.19 – IV.24), karena posisi permukaan atap yang berada di atas bukaan cahaya di lantai teratas (lantai 5).



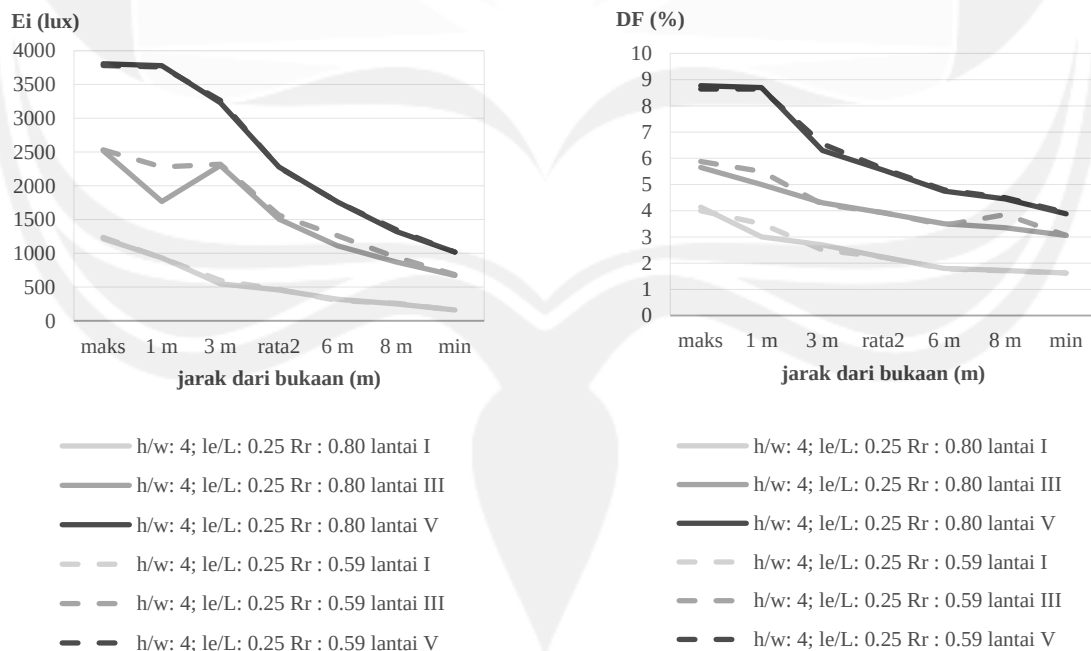
Gambar IV-19. Tingkat terang (kiri) dan DF (kanan) ruangan dengan lebar 9 m dengan rak cahaya dan bukaan menghadap ke Utara dengan variasi koefisien pantul permukaan dinding kota Yogyakarta dengan h/w: 4 dan le/L: 0,25.



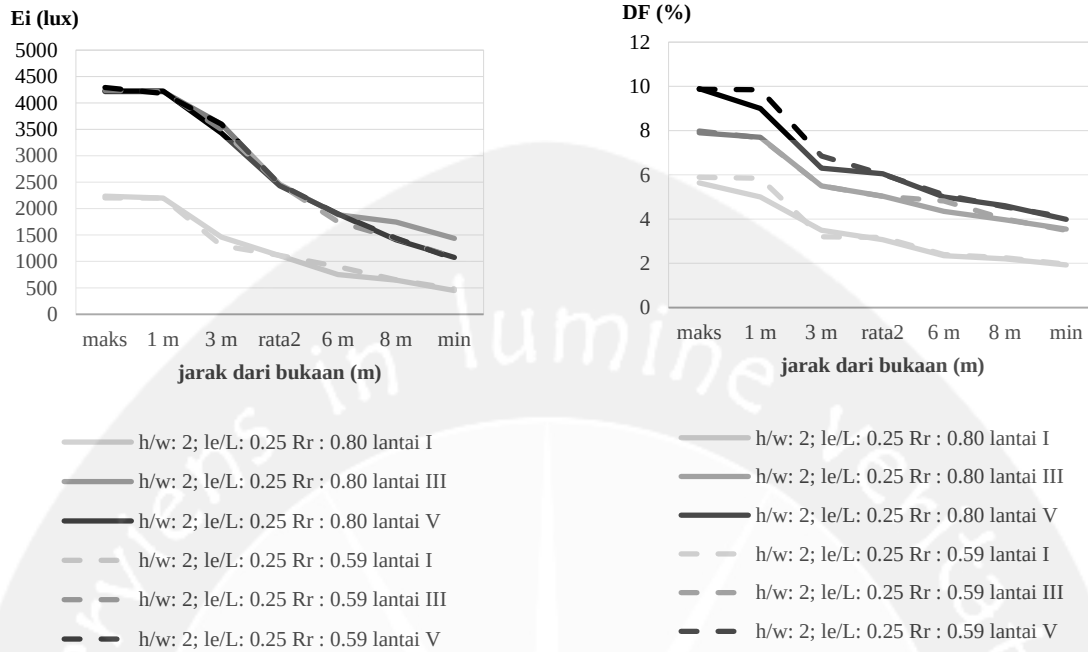
Gambar IV-20. Tingkat terang (kiri) dan DF (kanan) ruangan dengan lebar 9 m dengan rak cahaya dan bukaan menghadap ke Utara dengan variasi koefisien pantul permukaan dinding kota Yogyakarta dengan h/w: 2 dan le/L: 0,25.



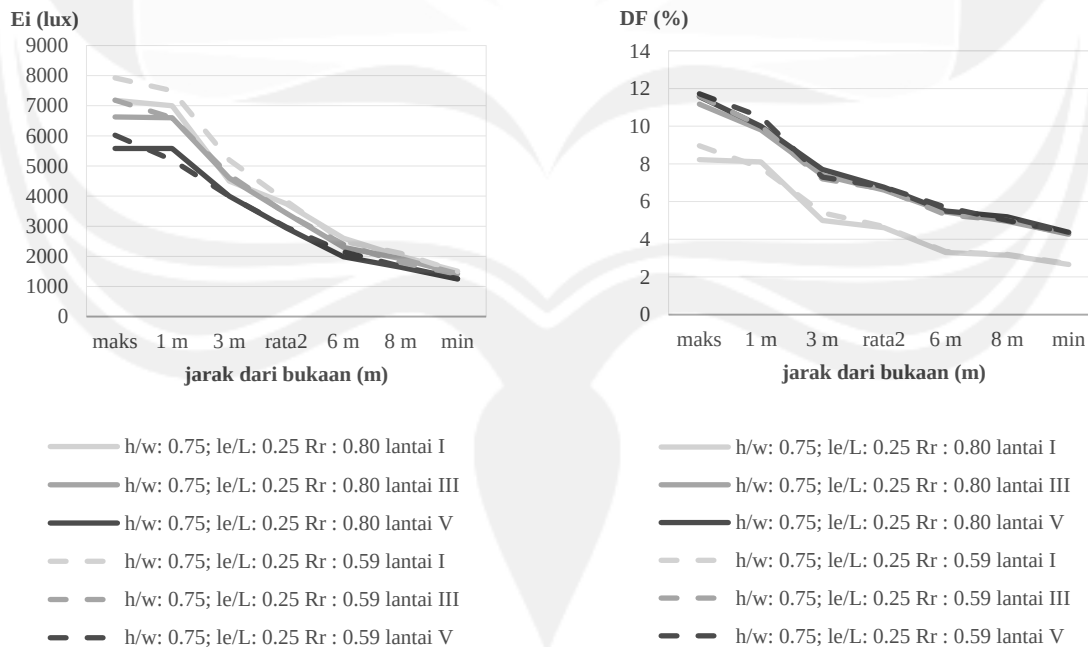
Gambar IV-21. Tingkat terang (kiri) dan DF (kanan) ruangan dengan lebar 9 m dengan rak cahaya dan bukaan menghadap ke Utara dengan variasi koefisien pantul permukaan dinding kota Yogyakarta dengan h/w: 0,75 dan le/L: 0,25.



Gambar IV-22. Tingkat terang (kiri) dan DF (kanan) ruangan dengan lebar 9 m dengan rak cahaya dan bukaan menghadap ke Utara dengan variasi koefisien pantul permukaan atap kota Yogyakarta dengan h/w: 4 dan le/L: 0,25.



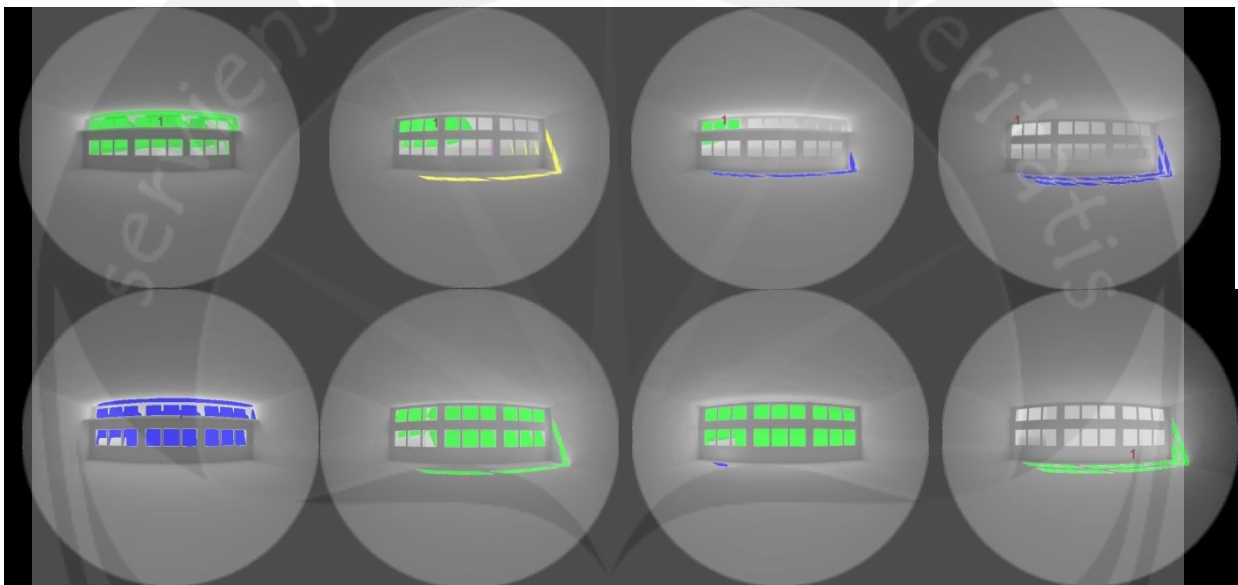
Gambar IV-23. Tingkat terang (kiri) dan DF (kanan) ruangan dengan lebar 9 m dengan rak cahaya dan bukaan menghadap ke Utara dengan variasi koefisien pantul permukaan atap kota Yogyakarta dengan h/w: 2 dan le/L: 0,25.



Gambar IV-24. Tingkat terang (kiri) dan DF (kanan) ruangan dengan lebar 9 m dengan rak cahaya dan bukaan menghadap ke Utara dengan variasi koefisien pantul permukaan atap kota Yogyakarta dengan h/w: 0,75 dan le/L: 0,25.

Daya pantul permukaan eksternal menghasilkan efek yang bermanfaat untuk menurunkan potensi silau yang diciptakan oleh clerestory dari sistem rak cahaya. Permukaan halaman atau dinding eksternal (di dalam ruang kota dengan kepadatan sedang hingga tinggi untuk dinding dan dengan kepadatan rendah hingga sedang untuk halaman) dengan daya pantul yang relatif rendah dapat digunakan untuk mengurangi potensi silau tanpa menurunkan tingkat terang pada area yang jauh dari bukaan pada ruangan dengan lebar 9 m.

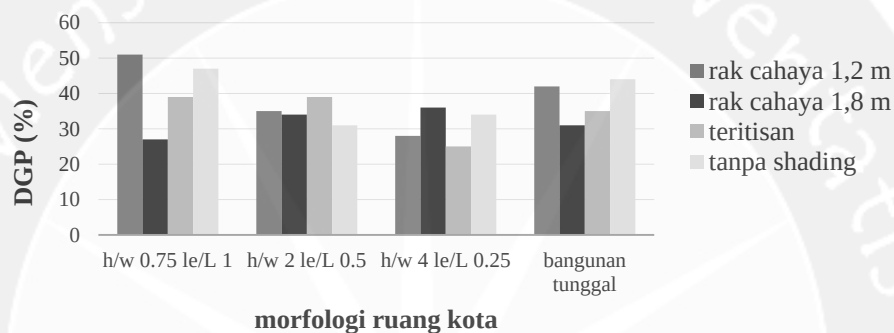
IV.3.3 Tingkat silau



Gambar IV-25. Hasil analisis silau berbagai elemen peneduh pada bukaan yang menghadap ke Utara yang diambil dengan kamera berlensa mata ikan pada 21 Juni pkl. 15.00. Dari kiri atas sesuai putaran jarum jam: rak cahaya internal, elemen peneduh, teritisan, tanpa elemen peneduh, internal, elemen peneduh, teritisan, tanpa elemen peneduh.

Silau merupakan fenomena yang kompleks yang tidak hanya ditentukan oleh tingkat terang maupun kecerlangan suatu bidang yang ada di hadapan pengamat. Efek silau juga ditentukan oleh kontras bidang tersebut terhadap sekeliling. Oleh karenanya ruang kota yang padat tidak selalu dapat mengurangi efek silau. Gambar IV-26 menjelaskan bahwa kepadatan ruang kota hanya mampu menurunkan efek silau (daylight glare probability atau GDP) pada ruangan dengan bukaan yang dilengkapi dengan teritisan. Hal ini tidak berlaku untuk ruangan pada bangunan tunggal yang GDP-nya lebih rendah daripada yang berada di ruang kota yang

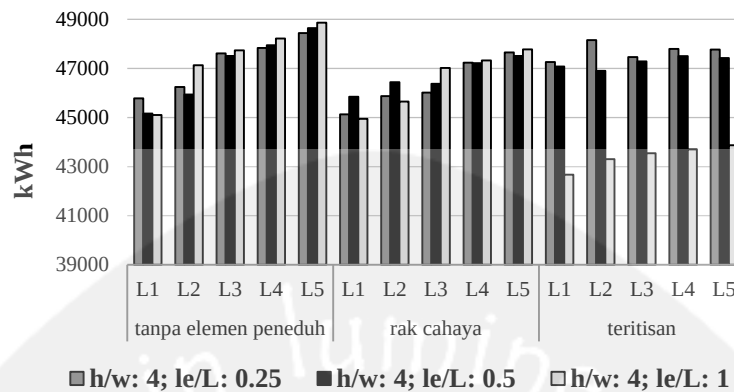
renggang. Inipun dengan ketentuan semua kriteria sesuai dengan model virtual yang diterapkan. Celah-celah ruang kota memungkinkan masuknya cahaya langsung dengan kontras yang tinggi terhadap sekitarnya. Hasil simulasi ini juga hanya menggambarkan efek silau pada 21 Juni pkl. 15.00 untuk bukaan yang menghadap ke Utara. GDP tahunan akan lebih menjawab permasalahan silau yang potensial terjadi pada aplikasi rak cahaya, di samping pemasangan tirai yang difungsikan pada saat-saat tertentu ketika silau terjadi. Gambar 26 juga menjelaskan bahwa rak cahaya internal yang lebar akan cenderung menurunkan potensi silau pada ruang kota dengan kepadatan rendah hingga sedang.



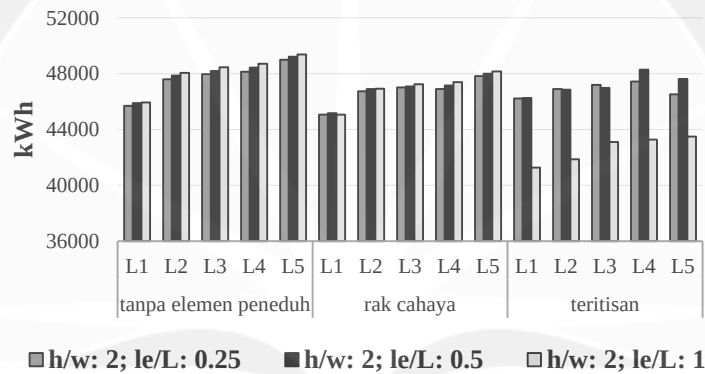
Gambar IV-26. DGP ruang pada lantai III dengan bukaan menghadap ke Utara pada 21 Juni pkl. 12.00 dengan kondisi langit cerah.

IV.4 KINERJA ENERGI

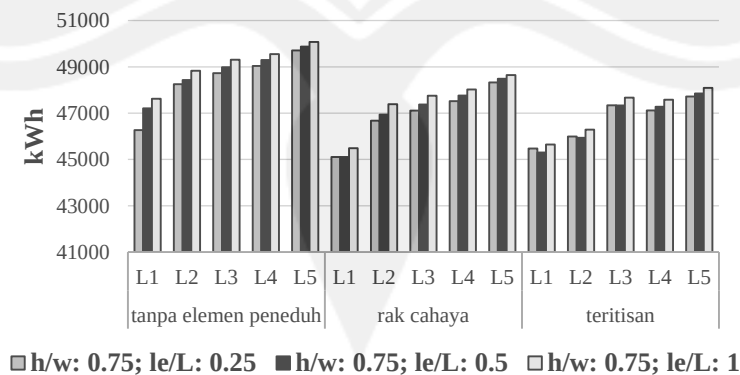
Rak cahaya paling efektif di dalam menurunkan beban penyejukan dan listrik untuk lampu jika diterapkan pada lantai 1 bangunan berlantai 5 di dalam ruang kota dengan le/L 0,25 dan 0,5 dibandingkan dengan energi yang dibutuhkan oleh ruangan dengan elemen peneduh yang lain. Tingkat terang langit di daerah tropis yang tinggi masih memungkinkan pantulan cahaya alami pada rak cahaya maupun pada permukaan eksternal yang masuk melalui *clerestory* di lantai 1 memiliki intensitas cahaya yang cukup. Sementara, keberadaan hambatan eksternal di dalam ruang kota padat memberikan pembayangan pada fasad bangunan pada lantai 1 yang menyebabkan beban penyejukan yang cukup rendah. Kombinasi antara beban penyejukan yang cukup rendah dan kebutuhan listrik untuk lampu yang cukup rendah.



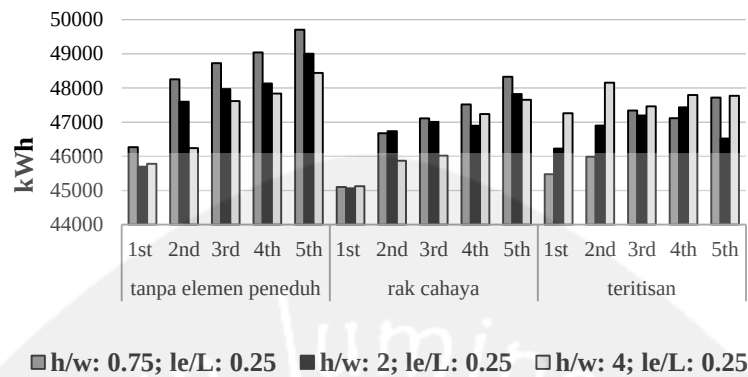
Gambar IV-27. Jumlah beban penyejukan dan energi untuk pencahayaan buatan yang dibutuhkan selama satu tahun oleh ruangan dengan lebar 9 m dengan bukaan menghadap ke Utara pada ruang kota Singapura dengan h/w: 4.



Gambar IV-28. Jumlah beban penyejukan dan energi untuk pencahayaan buatan yang dibutuhkan selama satu tahun oleh ruangan dengan lebar 9 m dengan bukaan menghadap ke Utara pada ruang kota Singapura dengan h/w: 2.

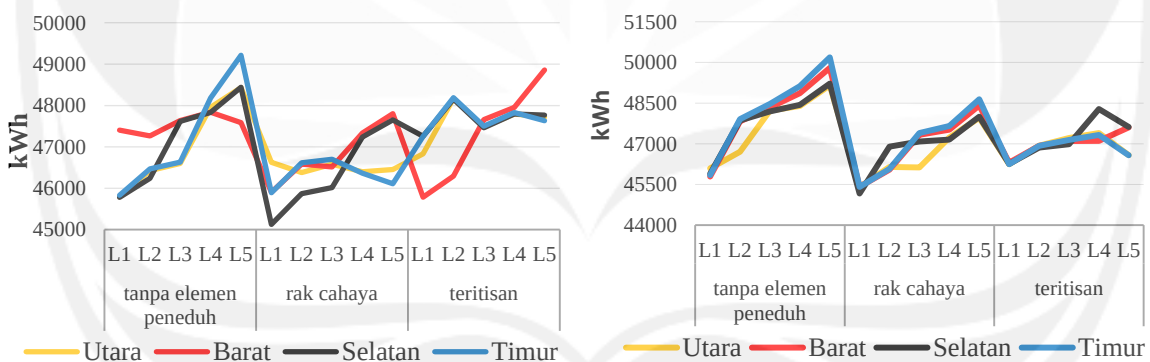


Gambar IV-29. Jumlah beban penyejukan dan energi untuk pencahayaan buatan yang dibutuhkan selama satu tahun oleh ruangan dengan lebar 9 m dengan bukaan menghadap ke Utara pada ruang kota Singapura dengan h/w: 0,75.



Gambar IV-30. Jumlah beban penyejukan dan energi untuk pencahayaan buatan yang dibutuhkan selama satu tahun oleh ruangan dengan lebar 9 m dengan bukaan menghadap ke Utara pada ruang kota Singapura dengan le/L: 0,25.

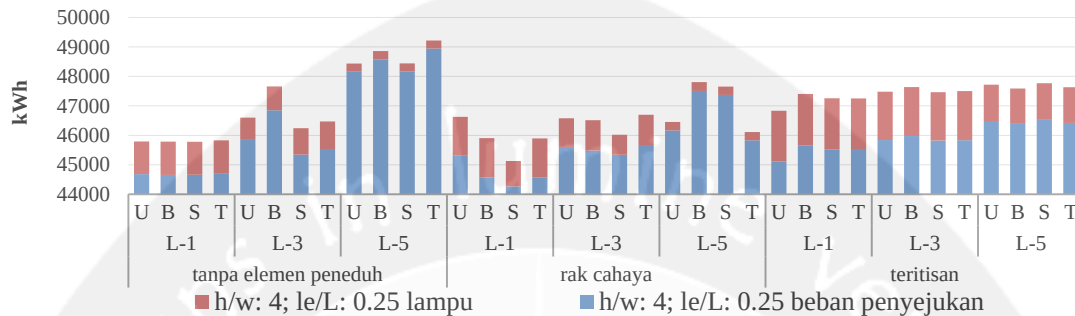
Variasi orientasi bukaan memberikan pengaruh yang lebih signifikan pada besarnya beban penyejukan dan listrik untuk lampu yang dibutuhkan oleh ruangan yang terletak di ruang kota yang padat daripada yang berada di ruang kota yang kurang padat (Gambar IV-31).



Gambar IV-30. Beban penyejukan dan listrik untuk lampu yang dibutuhkan oleh sebuah ruangan dengan variasi elemen peneduh dan orientasi bukaan yang terletak di ruang kota dengan kombinasi h/w: 4 dan le/L: 0,25 (kiri) h/w: 2 dan le/L: 0,5 (kanan).

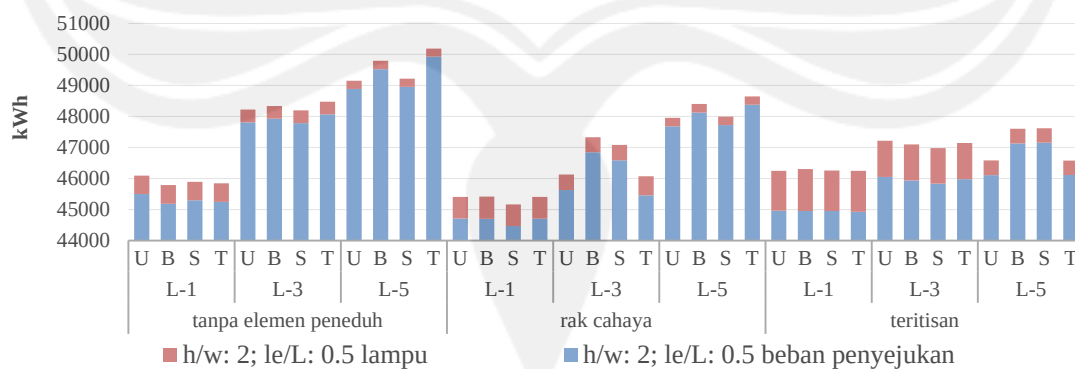
Pengaruh variasi orientasi bukaan pada energi yang dibutuhkan untuk ruangan pada lantai 1 dengan rak cahaya yang terletak di ruang kota yang padat cukup signifikan. Ruang kota yang padat dan elemen peneduh pada jendela bagian bawah menjadikan beban penyejukan ruangan pada lantai 1 dengan bukaan yang menghadap ke Selatan yang sangat rendah. Rak cahaya akan efektif jika diterapkan pada lantai 1 (dengan orientasi ke Barat atau Selatan atau Timur) maupun lantai 3 (dengan orientasi ke Utara, Barat atau Selatan) di dalam

ruang kota dengan kepadatan yang tinggi. Kebutuhan energi yang rendah untuk ruangan dengan rak cahaya dengan bukaan menghadap ke Timur atau ke Utara pada lantai 5 di ruang kota yang padat disebabkan oleh kebutuhan listrik untuk lampu yang sangat rendah.



Gambar IV-31. Beban penyejukan dan energi untuk lampu yang dibutuhkan selama satu tahun oleh ruangan dengan lebar 9 m dengan variasi orientasi bukaan pada ruang kota Singapura dengan $h/w: 4$ dan $le/L: 0,25$.

Efektivitas aplikasi rak cahaya di dalam ruang kota yang berkepadatan sedang ditinjau dari aspek kinerja energinya dicapai oleh ruangan pada lantai 1. Rak cahaya memungkinkan beban penyejukan yang rendah dengan kebutuhan listrik untuk lampu yang sedang. Untuk ruangan yang terletak di lantai 3, aplikasi rak cahaya efektif diterapkan dengan orientasi ke Utara dan Timur untuk kota Singapura (Gambar IV-33). Untuk ruang-ruang pada lantai 5 akan lebih efisien jika diterapkan teritisan pada fasadnya daripada aplikasi rak cahaya. Hasil ini tentu saja berlaku untuk kondisi tertentu. Untuk penggunaan lampu dengan efisiensi yang berbeda bisa jadi hasilnya akan berbeda.



Gambar IV-32. Beban penyejukan dan energi untuk lampu yang dibutuhkan selama satu tahun oleh ruangan dengan lebar 9 m dengan variasi orientasi bukaan pada ruang kota Singapura dengan $h/w: 2$ dan $le/L: 0,5$.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

V.1 KESIMPULAN

- Ruang kota sangat mempengaruhi efektivitas rak cahaya di daerah tropis katulistiwa baik dari aspek kinerja pencahayaan alami maupun aspek kinerja energinya. Dua elemen utama yang menentukan efektivitas rak cahaya adalah morfologi dan albedo ruang kota. Di dalam studi ini albedo ruang kota diwakili oleh daya pantul permukaan ruang kota. Sedangkan morfologi ruang kota diwakili oleh rasio h/w dan rasio le/L.
- Rasio h/w memiliki pengaruh yang lebih signifikan pada kinerja pencahayaan alami maupun kinerja energi daripada rasio le/L.
- Daya pantul permukaan halaman eksternal memiliki pengaruh signifikan pada kinerja pencahayaan alami ruangan pada lantai 1 untuk ruang kota yang padat. Untuk ruang kota berkepadatan menengah hingga rendah pengaruh daya permukaan halaman eksternal tampak dari lantai terbawah hingga lantai paling atas.
- Daya pantul permukaan dinding eksternal memberikan pengaruh signifikan pada lantai 3 hingga lantai 5 untuk ruang kota yang padat.
- Daya pantul permukaan halaman ataupun dinding eksternal yang rendah dapat digunakan untuk meningkatkan keseragaman distribusi tingkat terang ruangan. Penerapan daya pantul permukaan halaman akan efektif jika diterapkan pada ruang kota berkepadatan rendah hingga sedang, sedangkan daya pantul permukaan dinding eksternal yang rendah efektif diterapkan pada ruang kota berkepadatan sedang hingga tinggi.
- Potensi silau yang dihasilkan oleh *clerestory* pada sistem rak cahaya dapat dikurangi dengan pemilihan lebar rak cahaya internal yang cocok.
- Dari aspek kinerja energi (beban penyejukan dan listrik untuk lampu) penerapan rak cahaya pada lantai dasar akan sangat efektif baik pada ruang kota berkepadatan sedang (semua orientasi bukaan) maupun pada ruang kota berkepadatan tinggi

(orientasi bukaan ke Selatan untuk wilayah di belahan bumi Utara). Sedangkan untuk ruang-ruang yang terletak di lantai 3 hingga lantai 5, hanya bukaan dengan rak cahaya yang berorientasi tertentu saja yang akan bekerja efektif dari aspek kinerja energi.

V.2 SARAN

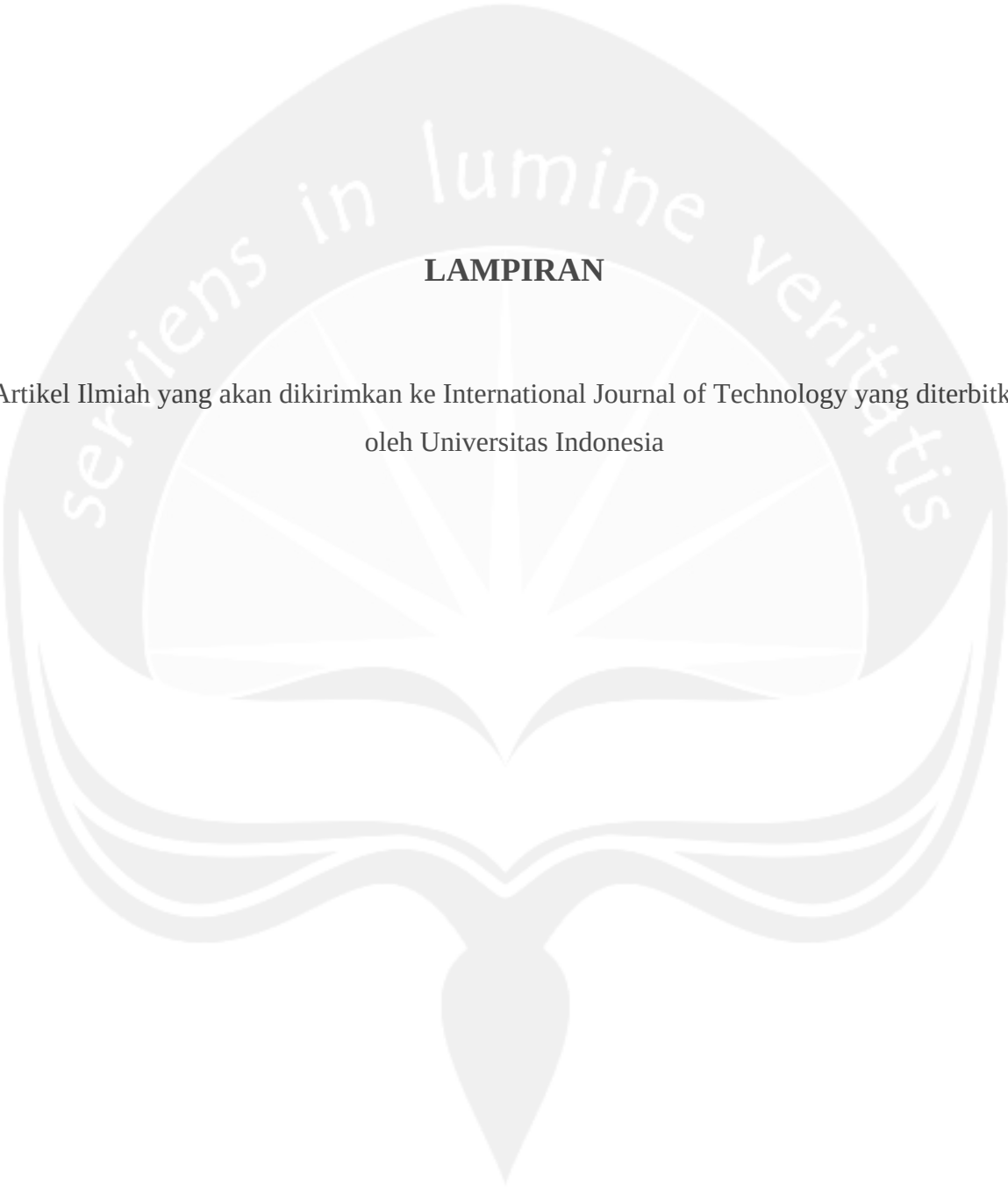
- Diperlukan studi tentang tingkat silau tahunan (*annual glare*) untuk mengkaji efektivitas rak cahaya di dalam konteks ruang kota tropis. Demikian pula studi mengenai DA dalam satu tahun akan sangat membantu untuk melihat secara proporsional efektivitas rak cahaya dari aspek kinerja pencahayaan alaminya.
- Diperlukan studi lebih lanjut tentang pengaruh variasi efisiensi lampu terhadap efektivitas rak cahaya dari aspek kinerja energi.

VI. DAFTAR PUSTAKA

- Abboushi, B.K. 2013. The Effect of Adaptive Shading and the Selective Reflector Light Shelves on Office Building Energy Efficiency and Daylight Performance in Hot Arid Regions. unpublished thesis, the University of Arizona.
- Akbari, H., Menon, S. and Rosenfeld, A. 2009. Global cooling increasing world-wide urban albedo to offset CO₂. *Climatic Change*, 95(3-4). DOI 10.1007/s10584-008-9515-9.
- Altomonte, S. 2008. Daylight for Energy Savings and Psycho Physiological Well-Being in Sustainable Built Environment. *J. of Sustainable Development*, 1(3):3-16.
- Andersen, M., Rubin, M., Scartezzini, J-L. 2003. Comparison between ray-tracing simulations and bi-directional transmission measurements on prismatic glazing. *Solar Energy* 74:157–173.
- Andersen, M., Rubin, M., Scartezzini, J-L. 2005. Bi-directional transmission properties of Venetian blinds: experimental assessment compared to ray-tracing calculations. *Solar Energy* 78:187–198.
- Beltran, L.O., Lee, E.S., Papamichael, K.M., Selkowitz, S.E. 1996. Design and Evaluation Three Advance Daylighting Systems: Light Shelves, Light Pipes and Skylights. Solar'94, Golden Opportunity and Solar Prosperity, ASES, June 25-30, 1996, San Jose, California.
- Binarti, F. 2005. Lightshelf for Improving Indoor Horizontal Illuminance Distribution. *Teknik* Vol. XII No.1 April:1-10.
- Carroll, W.L. and Hitchcock, R.J. 2005. DELight2 Daylighting Analysis in EnergyPlus Integration and Preliminary User Results. *Ninth International IBPSA Conference* Montréal, Canada August 15-18:139-143.
- Ellis, P.G., Strand, R.K., and Baumgartner, K.T. 2004. Simulation of Tubular Daylighting Devices and Daylighting Shelves in EnergyPlus, SimBuild 2004, IBPSA-USA National Conference, Boulder, CO, August 4-6, 2004.
- Emerald People. 1999. EPUD Revisited: A Post Occupancy Analysis of Thermal and Daylight Design Implementation. www.arch.ced.berkeley.edu/vitalsigns/bld/Casestudies/epud.pdf. download: September 3, 2013.
- Floyd, D.B. and Parker, D.S. 1998. Daylighting: Measuring the Performance of Light Shelves and Occupant Controlled Blinds on a Dimmed Lighting System. Proceedings of the 11th Symposium on Improving Building Systems in Hot and Humid Climates, Fort Worth, TX, June 1-2, 1998.
- Franco, I.M. 2007. Efficacy of Light Shelves: Passive, Dynamic and Automatic Devices Related to Light and Thermal Behavior. ASHRAE.

- Hansen, V.G. dan Edmonds, I. 2003. Natural Illumination of Deep-plan Office Buildings: Light Pipe Strategies. *ISES Solar World Congress*, 14-19 June 2003, Göteborg.
- Harman, I.N. 2003. The energy balance of urban areas. Unpublished PhD dissertation, Dept. of Meteorology, The University of Reading.
- Henninger, R.H. and Witte, M.J. 2011. EnergyPlus testing with building thermal envelope and fabric load test from ANSI/ASHRAE Standard 140-2011. U.S. DOE Energy Efficiency and Renewable Energy Office of Building Technologies Washington, D.C.
- Heschong L., Mahone D., Kuttaiah K., Stone E. N., Chappel C., McHugh J., Burton J., Okura S., Wright R., Erwin B., Digert N., Baker K. 2003. Windows and Classrooms: A Study of Student Performance and the Indoor Environment. Fair Oaks, CA: The Heschong Mahone Group, CEC PIER.
- Hirning, M., Veronica, V.G. and John, B. 2010. Theoretical comparison of innovative window daylighting devices for a sub-tropical climate using radiance. In Proceedings of IEECB'10, Joint Research Centre, Institute for Energy, Congress Centre Messe Frankfurt, Frankfurt.
- Ho M.C., Chiang C.M., Chou P.C., Chang K.F., Lee C.Y. 2008. Optimal sun-shading design for enhanced daylight illumination of subtropical classrooms. *Energy and Buildings*, 40, 2008, pp.1844-55.
- Joarder, A.R., Ahmed, Z.N., Price, A., Mourshed, M. 2009. A Simulation Assessment of the Height of Light Shelves to Enhance Daylighting Quality in Tropical Office Buildings Under Overcast Sky Conditions in Dhaka, Bangladesh. 11th IBPSA Conference, July 27-30, 2009, Glasgow, Scotland.
- Kesten, D., Tereci, A., Stizalka, A., Eicker, U. 2010. A Method to Quantify the Energy Performance in Urban Quarters. *Indoor air quality, ventilation and energy conservation in buildings*, 18(1-2):100-111.
- McNeil, A., Lee, E. 2012. A validation of the Radiance threephase simulation method for modeling annual daylight performance of optically complex fenestration systems. *Journal of Building Performance Simulation* 2012: 1-14 DOI:10.1080/19401493.2012.671852.
- Miller, C. 2011. Energy Simulation of the Single-Coil-Twin-Fan Air Conditioning System. Unpublished Master thesis, Dept. of Building, National University of Singapore.
- Morello, E., Gori, V., Balocco, C., Ratti, C. 2009. Sustainable Urban Block Design through Passive Architecture, A tool that uses urban geometry optimization to compute energy savings, PLEA2009 - 26th, Quebec City, Canada, June 22-24, 2009.
- Nunez, M. and Oke, T.R. 1977. The Energy Balance of an Urban Canyon. *Applied Meteorology* 16:11-19.
- Ochoa Morales, C.E., Capeluto, I.G. 2006. Evaluation visual comfort and performance of three natural lighting systems for deep office buildings in highly luminous climates. *Building and Environment*, 41:1128-1135.

- Ochoa Morales, C.E., Aries, M.B.C., Hensen, J.L.M. 2012. State of the Art in Lighting Simulation for Building Science: A Literature Review. *Building Performance Simulation*, 5:209-233.
- Reinhart, C.F., Andersen, M. 2006. Development and validation of a Radiance model for a translucent panel. *Energy and Buildings*, vol. 38 (7):890-904.
- Sabry, H., Sherif, A., Shawky, S. and Rakha, T. 2010. Assessing the Effect of External Obstruction Parameters on Indoor Daylighting Performance in Desert Clear Sky Conditions. 16th Conf. Sustainable Development Research May 30 – June 1, Hong Kong.
- Stein, B., Reynolds, J.S., Grondzik, W.T., Kwok, A.G. 2009. Mechanical, Electrical and Equipment for Buildings. John Wiley, New York.
- Wong, N.H., Istiadji, A.D. 2004. Effect of external shading devices on daylighting penetration in residential buildings. *Lighting Research and Technology* 36:317– 333.



LAMPIRAN

Artikel Ilmiah yang akan dikirimkan ke International Journal of Technology yang diterbitkan
oleh Universitas Indonesia

THE EFFECTIVENESS OF LIGHT SHELF IN TROPICAL URBAN CONTEXT

ABSTRACT

Many studies have concluded that light shelf is an effective device for creating uniform daylight in various climates. However, the application of unshaded clerestory as a part of the light shelf in the hot climate needs to be improved in order to reduce the high solar heat gain. Dense urban context might modify the daylighting and the energy performance of buildings equipped with light shelf. This study employed integrated energy simulation software (Design Builder) to investigate the effect of urban geometry and external surface albedo on the daylighting and energy performance of building equipped with light shelf. Three variations of room width were made i.e. 6 m, 9 m, and 12 m. Comparisons were analyzed between three fenestration systems, i.e. fenestration without shading device, with overhang, and with light shelf. This study resulted in some recommendations concerning the best application of light shelf on the certain floor levels and the height to width ratio of the urban area.

Keywords: cooling load; daylighting performance; light shelf; tropical urban context.

1. INTRODUCTION

Light shelf is a daylight-redirecting system intended to bounce daylight to the deepest side of a room. This function suites well to all climates (IEA ECBCS Annex 29/SHC Task 21, 2010). Clear sky is the favourable condition to provide high average indoor illuminance with even distribution. A Lightscape simulation-based study validated by field measurements (Wong and Istiadji, 2004) proved, however, that light shelf could improve the indoor illuminance under partly cloudy sky in Singapore. A Radiance simulation-based study in warm tropics has been conducted under clear sky and overcast sky condition in Yogyakarta (Binarti, 2005). The study reported the installation of lightshelves on the side window could improve the classroom's daylighting uniformity created by side windows with overhang. Lim (2014) employed scaled physical models and computational simulation method to examine the daylighting performance of light shelf under several tropical sky conditions in Subang, i.e. intermediate sky with direct sunlight, intermediate sky without direct sunlight and overcast sky.

Sufficient illuminance with uniform distribution created by light shelf strongly impacts on the energy saving for lighting. In Taiwan a double layer light shelf design fitted on large windows could reduce the lighting power cost up to 70% on the date of winter solstice and summer solstice compared to single shading (Ho et al., 2008). However, the lighting energy consumed by light shelf application in hot arid climate (Aboushi, 2013) is not lower than the energy consumed by other shading devices, such as: adaptive overhang and adaptive fins. In regions with abundant solar radiation, sunlight-exposed clerestory potentially causes overheating.

Previous studies on light shelf are limited in building context. In fact, several factors of urban environment can modify the building energy performance by changing the (long-

wave and short-wave) radiation fluxes. Several methods for estimating radiation fluxes can be based on its surrounding surface albedo, solid angle proportions and the geometry of buildings (Matzarakis et al., 2007). In multistorey buildings the urban texture potentially impacts on the daylight illuminance and radiation fluxes will vary on each floor level. It could be interesting to relate these factors with light shelf planning and design on multistorey buildings to achieve the effectiveness. By comparing the performance of other fenestration design in urban context this study aims to examine the effective position for light shelf in urban context.

2. METHODOLOGY

The study on the effectiveness of light shelf in urban context was based on the experimental study of light shelf on building models in various urban contexts analyzed mainly using computational simulations. The effectiveness was measured by comparing the daylighting and energy performance of a building equipped with lightshelf to the performance of the same building without shading and with overhang.

3.1. Light shelf models

Light shelf models were installed on a 11 m-long classroom model that requires high daylight availability. It is typically mounted between clerestory (upper window) and view (lower) window. The room models were arranged in a single-sided space layout with 3m-wide corridor on the one side and located in a 5-storey building. This medium rise building is considered to be suitable for light shelf application and can be easily found in medium cities in tropical countries. All models have the same interior surface reflectance, i.e. 0.9 for the ceiling (concrete), 0.8 for the wall (brick plaster), and 0.5 for the floor (ceramic). The windows use 6 mm clear glass. The light shelf and the other shading devices made of the same material with 0.9 for the surface reflectance.

Three rooms with variation in width (6 m, 9 m, and 12 m) were created to observe the ability of light shelf to bounce natural light inside the room. Each room dimension has different height to admit daylight penetrate into the deep side of the room. Clerestory head height was determined based on the daylighting rule of thumb. Daylighting rule of thumb for light shelf prescribes that the maximum room width should be 2.5 times the light shelf height. The internal light shelf is mounted above occupant's eye level on the height of 2.2 m to prevent the occupant view from glare. The upper surfaces of the shelves are coated with 95% reflectance aluminum film. To avoid glare from clerestory the internal shelf depth is 1.5 times the clerestory height. The depth of the overhang refers to the external shelf depth. The internal shelf is mounted on a height between the clerestory and the view window.

Other fenestration models, i.e. without shading device and with overhang (see Figure 1), are installed on a building with the same dimension, surface, room arrangement and window model as comparison of the light shelf performance. The window to floor area ratio (WFR) and the view window sill must meet Leadership in Energy and Environmental Design (LEED) requirement, i.e. 15%. All windows are glazed with 6 mm clear glass. View windows have a constant area with variation in shading device (shading coefficient or SC) to achieve the required window to wall area ratio (the WWR is less than 20%).

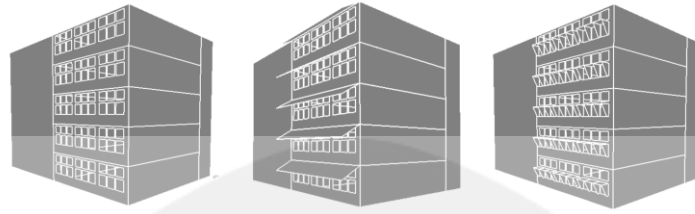


Figure 1. Building model without shading device (left), with overhang (middle), and with lightshelves (right)

3.2. Energy consumption and daylighting in urban context

Sabry et al. (2010) and Kesten et al. (2012) studied the impacts of urban morphology on the building energy performance. Neighbor's height to width ratio, spacing distance and frontal depth to length ratio can modify the building energy demand. High albedo materials reduce the amount of solar radiation absorbed through the building envelope (Akbari et al., 2009).

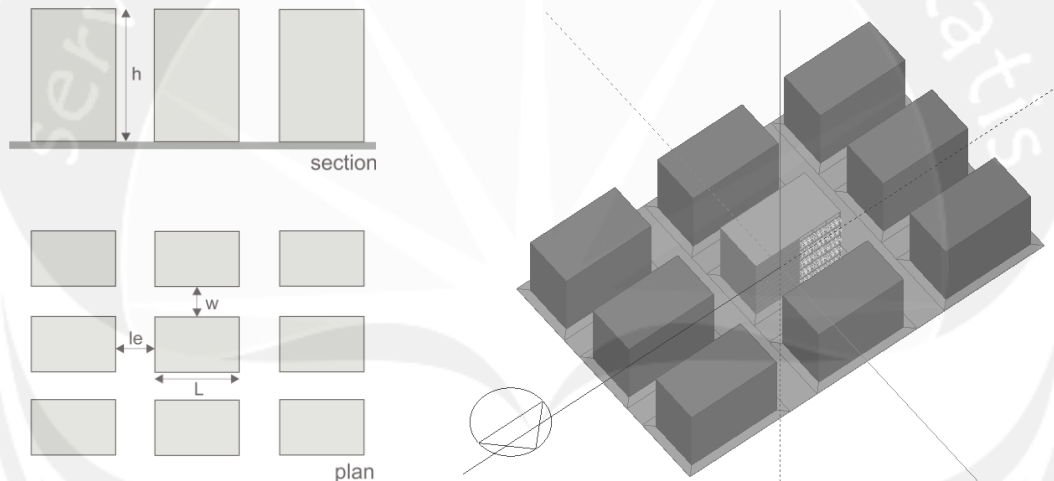


Figure 2. left: Urban aspect ratio or urban canyon; right: one of the model in medium-dense urban area

This study investigated two important factors of urban texture on the light shelf performance, i.e. the geometrical combination of horizontal (streets and open areas) and vertical (buildings) surfaces or aspect ratio (h/w), space distance ratio (le/L), and external surface albedo. The aspect ratio is the ratio of the average height of the buildings on both sides and the width of the separation (see Figure 2). Layout and dimensions of the surrounding buildings were constructed on 3 levels of aspect ratio (h/w : 0.5, 1, 2) and 3 levels of le/L : 0.25, 0.5, and 0.75 to represent urban geometry of the medium dense city. Variation in exterior surface reflectance was represented by 2 variations in exterior ground reflectance, wall reflectance and roof reflectance. There are 2 variations in external ground reflectance, 2 variations in external wall reflectance and 2 variations in external roof reflectance. The effects of urban geometry on the daylighting performance of window with light shelf were examined by simulating 12 m-wide room.

3.3. Computational simulations

3.3.1. Simulation softwares

To study the energy performance, models were constructed by Design Builder v.2.4 and analyzed using EnergyPlus(E+) as the simulation engine. E+ calculated the building cooling load and the energy used for lighting. DELight is the lighting software integrated in Design Builder v.2.4. Since the lighting software in Design Builder does not facilitate comprehensive daylighting performance calculations, such as: SC and glare index, this study used Radiance to solve the problems. Radiance is also used as a lighting simulation engine in Design Builder v.4. The accuracy of this backward ray-tracing method based software has been validated by several studies (Yi et al, 2009; Lim et al., 2010).

Adaptive Convection is the default algorithm in Design Builder v.2.4 for calculating the exterior convection coefficient ($h_{c,ext}$) which defines the rate of exterior convective heat transfer. This method allows for finer control over the models used for particular surfaces. The Adaptive Convection algorithm classifies surfaces by flow regime and orientation so that the most appropriate h_c equation which is available in E+ can be chosen for a given space and at a given time during the simulation running (University of Illinois and LBNL, 2013).

The conduction heat flux in E+ was calculated using Conduction Transfer Function (CTF) method. CTF is an elegant and powerful solution to calculate conduction heat transfer through an element that decays rapidly when using response factor equation (University of Illinois and LBNL, 2013). To calculate the sky long-wave radiation incident on exterior surfaces, the sky long-wave radiance distribution is assumed to be isotropic. This study treated beam solar radiation entering a zone through windows using an option of “Full Interior And Exterior With Reflections”. The beam solar and sky solar radiation diffusely reflected on the exterior surfaces was calculated using Ray-tracing method.

3.3.2. Simulation set-up

Simulation study used a building model surrounded by various urban geometry and surface albedo. The models are located in Singapore (on 1°22'N) and Yogyakarta (on 7.8°S) that belong to the equatorial tropical region. Whole year simulations were run to analyze the annual DF and energy demand. The classroom is equipped with split Air Conditioner without fresh air with default coefficient of performance or COP (3.34) and supply air condition. The operation schedule is an educational classroom cooling and lighting.

The lighting was controlled linearly over 100% area with suspended luminaires and 22 of the daylight glare index (DGI). Artificial lighting will turn on when the average daylight level is below 300 lux. Daylight simulations were done on June 21 at 12.00 when the clear sky brought abundant daylight through north-facing windows for Yogyakarta and south-facing windows for Singapore. Simulations under overcast sky conditions were conducted to calculate the DF and the energy demand for lighting. All simulations were run in highly accurate calculations with 5 indirect reflections.

3.3.3. Validation

The reliability of E+ has been tested for building thermal envelope and fabric tests designated as Cases 195 through 960 of ANSI/ASHRAE Standard 140-2011 (Henninger, and Witte, 2011). Several cases were intended to test for low mass building which are commonly applied in tropical equatorial regions. A validation of E+ for Singapore area has been conducted by Xiangjing(2011). Xiangjing found a small discrepancy in predictions of annual cooling load on building level and in individual zone when the internal heat gain is dominant. High discrepancy ($> 5\%$) occurs in envelope-heat-gain-dominated building.

DELIGHT uses Radiosity based algorithm to calculate the Inter Reflected Component (IRC). The integrated E+ - DELIGHT has been proved by Carroll and Hitchcock (2005) as a robust, usable and capable of providing sufficiently accurate performance of the daylighting and lighting control system of the light redirecting system such as light shelf. Since the accuracy of both simulation programs has been tested and validated in depth, validation was merely conducted to confirm that the simulated DF in this study would provide reliable data. Of the three components of DF, Sky Component (SC) is the most important because it is based on the assumption of the sky conditions as the geographical dependency component.

Validation used 6 m-wide simplified room model. The dimension of the physical model is 110 cm x 60 cm x 30 cm which represents the 6m-width room reduced the scale of 1:10. It has openings on one side with 11% of the WWR. To make almost zero internal reflected component, the internal surfaces were painted matt black. Field measurements were conducted on June 21-22, July 1-3 at 12:00 (solar time). The illuminance data were obtained from Hobo U12-012 (outside the model) and 2 Hobo UA 002-08 (inside the model). The indoor apparatus put on 0.75 cm of the height from the indoor surface floor.

4. RESULTS AND DISCUSSION

4.1. Validation of the SC

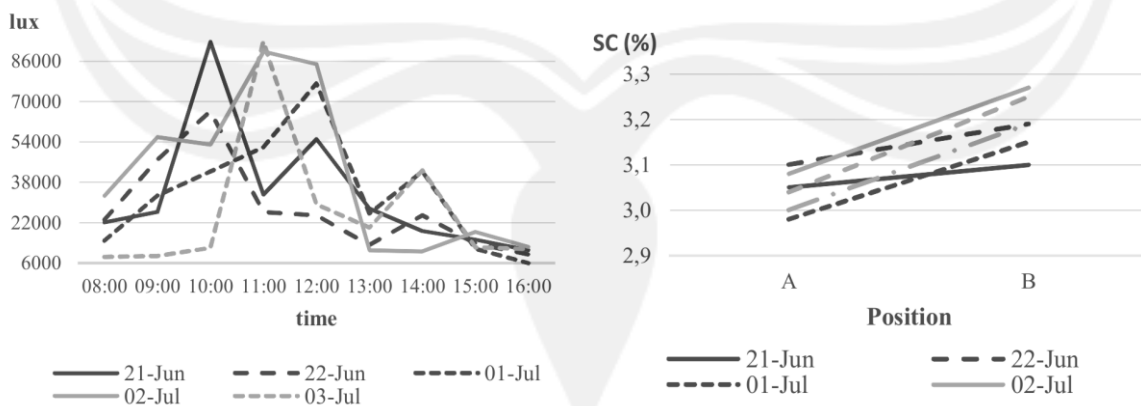


Figure 3. Horizontal ambient illuminances (left) and the model SC (right)

Figure 3 (left) depicts the measurement results of the horizontal ambient illuminance. On July 1 the horizontal ambient illuminance has a regular pattern with relatively low values.

By dividing the indoor illuminances with the horizontal ambient illuminances, the SCs can be obtained. The discrepancies between the simulated (calculation) SC and the SC measured on July 1 are < 5%, i.e. 2% at point A and 4% at point B. From this results it can be concluded that Radiance is quite valid for predicting SC under regular pattern sky illuminance.

4.2. Daylighting performance in highly dense urban area

From daylighting perspective, application of lightshelves perform the best on a wide room as compared to the daylighting performance of unshaded device or with overhang. Figure 4 represents daylighting performance of the first floor of building models with north-facing windows located in a tropical urban context. Light shelf applications on wide room create the most uniform distribution with the same high indoor illuminance on the deepest perimeter. The urban geometry obstructed the daylight penetration through the view windows of the model with lightshelve, which further decreases the DF of an area near the windows. With the assistance of the internal shelf, they were bounced to the deepest perimeter of the room. These produced the same high illuminance as in without shading device application.

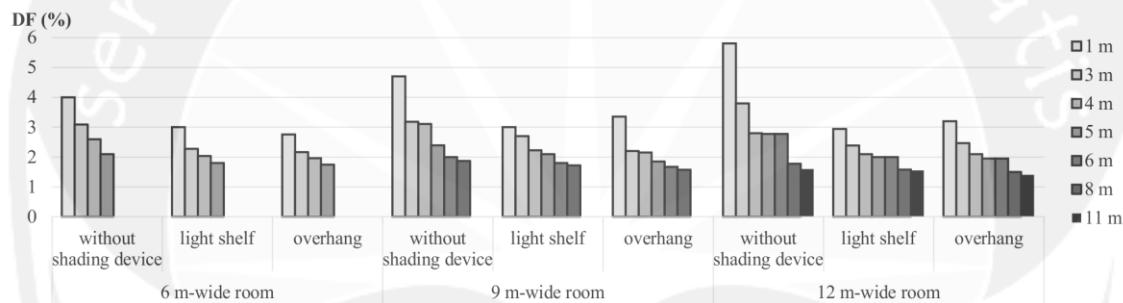


Figure 4. DF at certain distance from north-facing window inside a room on the first floor in urban area with h/w : 4 and le/L : 0.25 in Yogyakarta

4.2. h/w ratio effects on the daylighting performance

Urban geometry under clear sky conditions has significant effects on the illuminance inside a room on the first floor under clear sky conditions (see Figure 5) with such combinations: (1) low le/L with medium to high h/w ; (2) medium le/L with any h/w ; (3) high le/L with low h/w . Urban geometry produces similar effects on the illuminance inside a room on the third floor under clear sky conditions with any combination of le/L and h/w , but the effects are less than on the first floor in urban area with the combinations which were mentioned above. Urban geometry creates small effects on the illuminance inside a room on the fifth floor under clear sky condition in urban context with any combination of le/L and h/w .

Under overcast sky conditions (see Figure 6) h/w affects more significantly on the illuminance inside a room on the first floor than le/L . le/L only produces significant effect on the illuminance near the window in urban area with medium to high h/w . le/L almost does not impact on the illuminance inside a room in urban context with low h/w . On the third floor the effects of h/w on the illuminance inside 12 m-wide room are more pronounce than those of le/L .

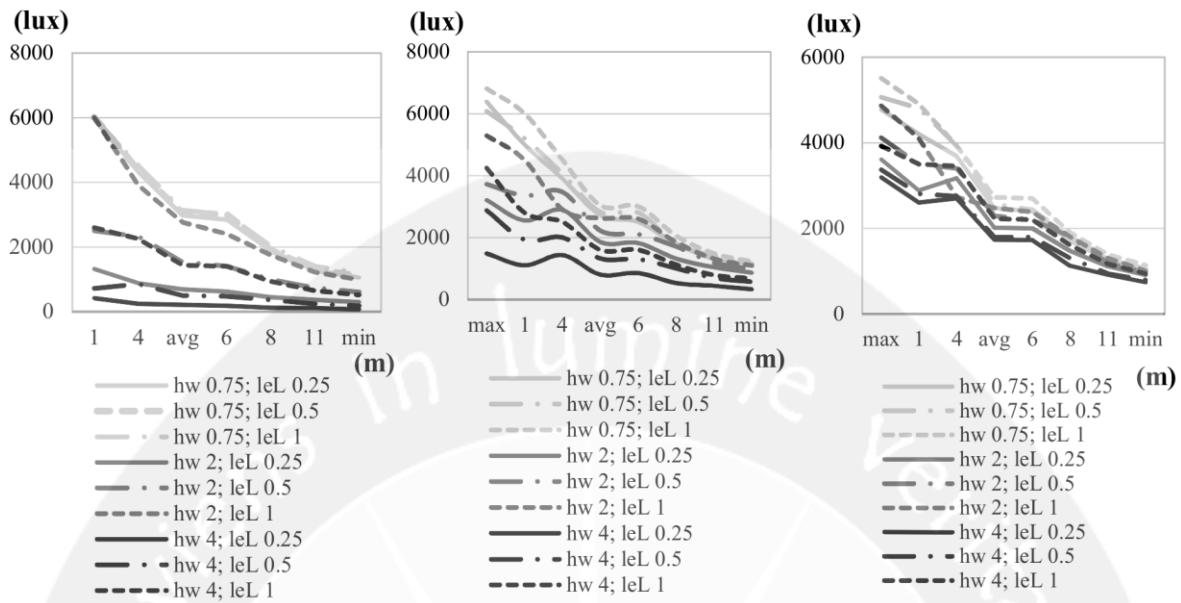


Figure 5. Indoor illuminance of a 12m-wide room equipped with windows with lightshelves in Yogyakarta with varying urban geometry under clear sky on June 21 at 12:00 the first floor (left), the third floor (middle) and the fifth floor (right)

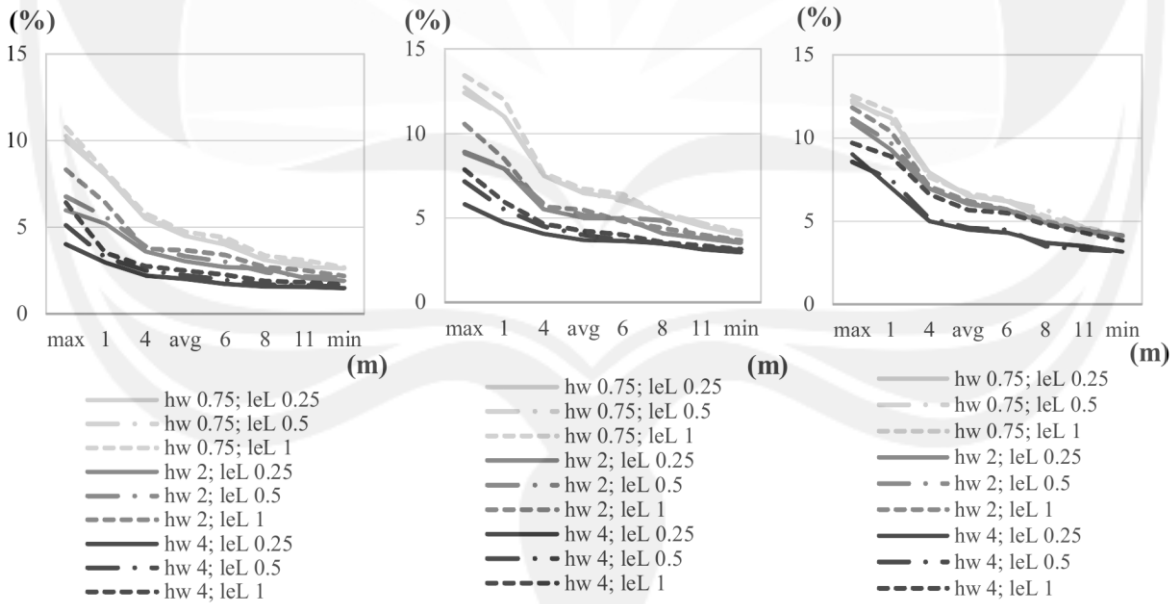


Figure 6. DF of a 12m-wide room equipped with windows with lightshelves in Yogyakarta with varying urban geometry under overcast sky on the first floor (left), the third floor (middle) and the fifth floor (right)

4.3. Albedo/surface reflectance effects

The effect of external ground reflectance on the indoor illuminance reveals on the first floor of a room in the high density urban area, i.e. h/w: 4. In this urban area diffuse natural

light, especially ground reflected light, plays dominant role in producing the illuminance inside the room on the first floor. Significant effect on the daylight factor (DF) appears inside the first floor room in all urban densities for south-oriented windows under overcast sky condition. Low ground reflectance affects significantly the DF. The farther the distance from the window the lesser the DF (see Figure 7).

External wall reflectance affects the illuminance and the DF inside the rooms mainly on the third and the fifth level only in high to medium dense urban area (see Figure 8). Significant reduction of the DF due to lower external wall reflectance occurred near the window, while slight reduction occurred on the deepest side. Changing in the external wall reflectance only creates a small effect on the illuminance and the DF of the room on the first floor. There is no significant reduction on the illuminance and the DF due to the lower external roof reflectance. This is not valid for the floor level on the higher position than the external roof.

External reflectance produces interesting effects on the indoor daylighting of light shelf application. For the building in medium or low dense urban area, low external (ground and wall) reflectance could reduce glare without significant reduction of the average illuminance in the occupied zone and the illuminance on the deepest side of the room. High external reflectance cannot significantly help increasing the average illuminance of the room on the first floor in high density urban context.

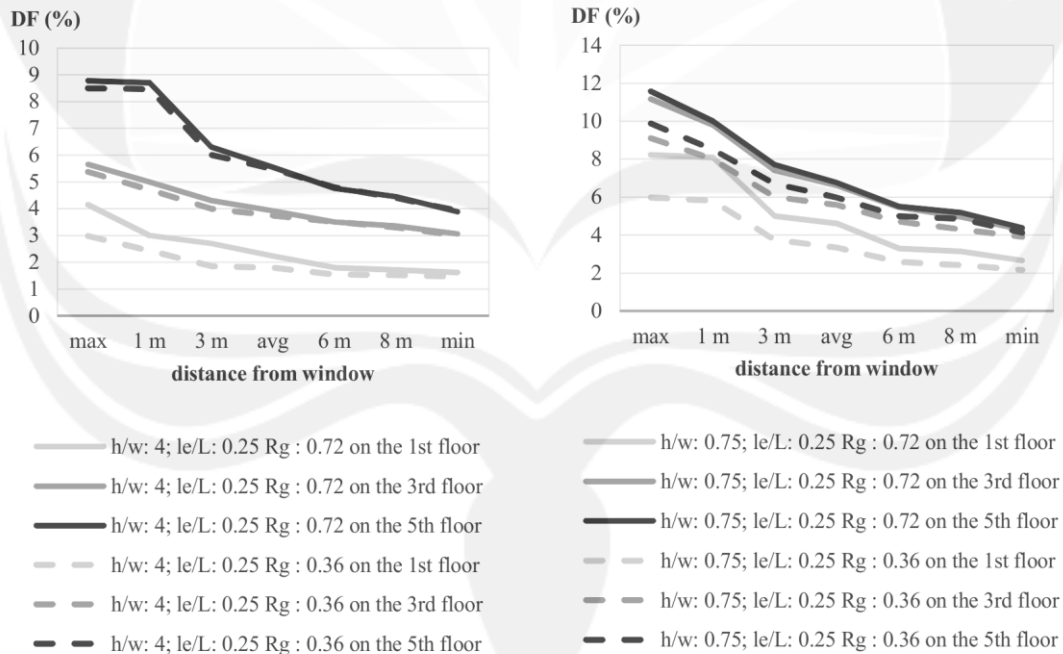


Figure 7. DF of a 12m-wide room equipped with north-facing windows with lightshelves in highly dense urban area (left) and in low dense urban area (right) in Yogyakarta with varying ground reflectances

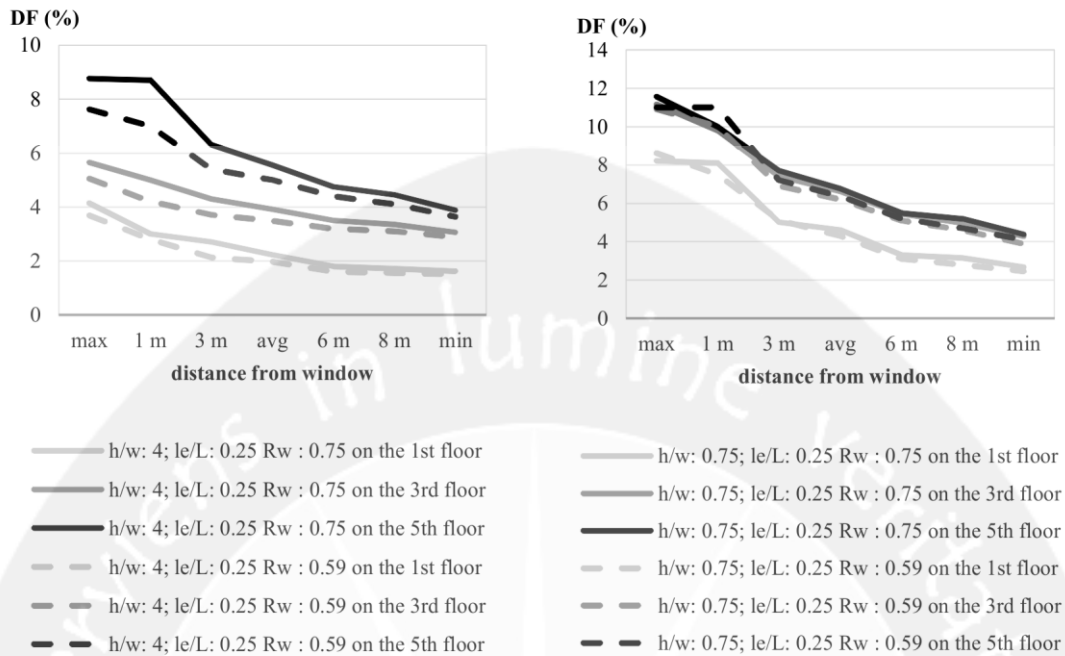


Figure 8. DF of a 12 m-wide room equipped with north-facing windows with lightshelves in highly dense urban area (left) and in low dense urban area (right) in Yogyakarta with varying external wall reflectances

4.4. The space's cooling load and lighting energy consumption

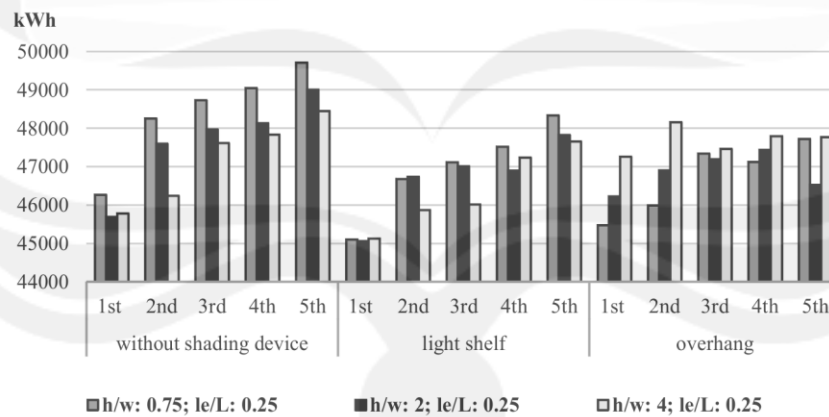


Figure 9. One-year cooling load and energy for lighting of 9 m-wide classrooms with south-facing windows in varying urban geometry in Singapore

Figure 9 indicates that the most effective applications of lightshelves are in highly dense urban area (with the combination of h/w: 2 and le/L: 0.25) and on the first floor in any urban geometry. High sky luminance in equatorial tropics could create high illuminance of the external reflected component which contributes to sufficient indoor illuminance with even distribution more than the indoor illuminance produced by the other fenestration types. Meanwhile the shading device reduces indirect solar radiation coming through the

view window. The effect of window orientation on the operational energy (cooling load and energy for lighting) becomes significant on the first and fifth floor in highly dense urban area. Regarding the building energy for lighting and cooling load, application of light shelf on low floor levels is recommended (see Figure 10).

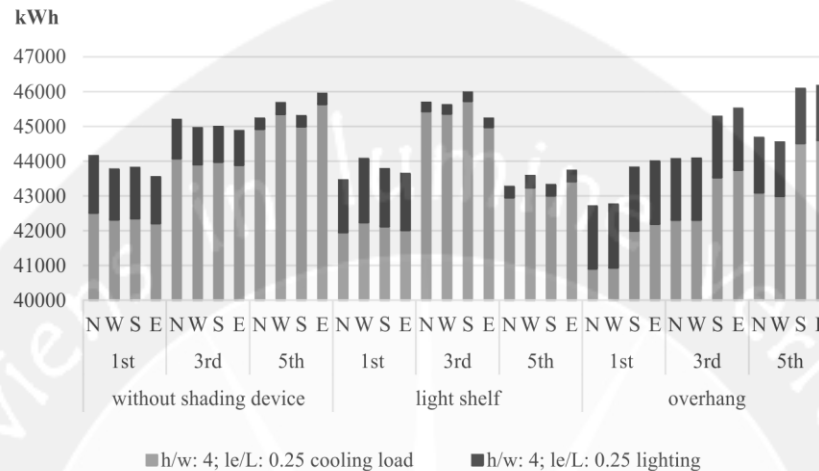


Figure 10. One-year energy performance of fenestration models on 9 m-wide classrooms with varying window orientations in highly dense urban area in Singapore

5. CONCLUSIONS

In dense tropical urban area light shelf could create most uniform daylight distribution in wide rooms (9 m – 12 m wide rooms) with north-facing windows in Southern Hemisphere and south-facing windows in Northern Hemisphere) compared to other fenestrations under clear and overcast sky condition. The h/w ratio affects the daylighting performance of light shelf application on low floor levels. Higher h/w (denser urban area) has more significant impacts on the illuminance (distribution). le/L has insignificant impacts on the daylighting and energy performance. For the buildings which room's cooling load plays more important role in the total quantity of the building energy than the room's energy consumption for lighting, the best energy performance (cooling load and energy for lighting) of light shelf applications occurred in highly dense urban area (h/w: 4 and le/L: 0.25) and on the first floor in any urban geometry.

6. REFERENCES

- Abboushi, B.K.,(2013), The Effect of adaptive shading and the selective reflector light shelves on office building energy efficiency and daylight performance in hot arid regions. unpublished thesis, the University of Arizona, Arizona, USA.
- Akbari, H., Menon, S. and Rosenfeld, A.,(2009), Global cooling increasing world-wide urban albedo to offset CO₂. *Journal of Climatic Change*, Volume 95, pp. 3-4. DOI 10.1007/s10584-008-9515-9. Springer.
- Binarti, F.,(2005). Lightshelf for improving indoor horizontal illuminance distribution. *Jurnal Teknik*, Volume XII Number 1 April, pp. 1-10, Universitas Brawijaya.

- Carroll, W.L. and Hitchcock, R.J., (2005), DELight2 Daylighting Analysis in EnergyPlus Integration and Preliminary User Results. *In: Proceedings of the Ninth International IBPSA Conference, Montréal, August 15-18, Canada.*
- DBS, (200), Design Builder v.2.4, Gloucestershire, UK.
- Henninger, R.H. and Witte, M.J., (2011), EnergyPlus testing with building thermal envelope and fabric load test from ANSI/ASHRAE Standard 140-2011. U.S. DOE Energy Efficiency and Renewable Energy Office of Building Technologies, Washington, D.C, USA.
- Ho M.C., Chiang C.M., Chou P.C., Chang K.F., Lee C.Y., (2008), Optimal sun-shading design for enhanced daylight illumination of subtropical classrooms. *Journal of Energy and Buildings*, Volume 40, pp. 1844-55, Elsevier.
- International Energy Agency Energy Conservation in Buildings and Community Systems Annex 29/Solar Heating and Cooling Task 21 (IEA ECBCS Annex 29/SHC Task 21), (2010), *Daylight in Buildings*, AECOM Ltd, Birmingham.
- Kesten, D., Kereci, A., Strzalka, A., Eicker, U., (2012), A Method to Quantify the Energy Performance in Urban Quarters. *Journal on Indoor Air Quality*, Volume 18 Issue 1-2, pp. 100-111. John Wiley & Sons.
- Lim, Y.W., (2014), Dynamic daylight and solar control in tropical climate. *American Journal of Applied Sciences*, Volume 11 Issue 10, pp. 1766-1722. Science Publications.
- Matzarakis, A., Rutz, F., Mayer, H., (2007), Modeling radiation fluxes in simple and complex environments - application of the RayMan model. *International Journal of Biometeorology*, Volume 51, pp. 323-334. Springer.
- Yi, R., Shao, L., Su, Y., Riffat, S., (2009), Daylighting performance of atriums in subtropical climate. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, Volume 4, pp. 230-237. Oxford Journals.
- Lim, Y.W., Ahmad, M.H., Ossen, D.R., (2010), Empirical validation of daylight simulation tool with physical model measurement. *American Journal of Applied Sciences*, Volume 7 Issue 10, pp. 1426-1431. Science Publications.
- University of Illinois and Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), (2013), *EnergyPlus Engineering Reference*, USA.
- Wong, N.H. and Istiadji, A.D., (2004), Effect of external shading devices on daylighting penetration in residential buildings. *Journal of Lighting Research and Technology* Volume 36, pp. 317- 333, SAGE.
- Xiangjing, Z., (2011), Test and Validation of Building Energy Simulation Tools. Master thesis, Dept. of Building National University of Singapore, Singapore.