

**KODE/RUMPUN ILMU: 426/TEKNIK ARSITEKTUR**

**B**



**UNIVERSITAS ATMA JAYA YOGYAKARTA**

**PENGEMBANGAN PANEL PENEDUH UNTUK DAERAH TROPIS LEMBAB**

**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

Juni 2016

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

**LEMBAR PENGESAHAN  
PROPOSAL PENELITIAN INTERNAL PERORANGAN**

1	Judul Proposal Penelitian	Pengembangan Panel Peneduh untuk Daerah Tropis Lembab	
2	Kategori Penelitian	Penelitian diorientasikan pada draft paten	
3	Tema Penelitian Universitas	Kebencanaan	
4	Topik Penelitian Unit	Kelestarian Lingkungan	
5	Bebas SKS Penelitian	(3) sks	Berlaku semester Genap 2015/2016
<b>IDENTITAS PENELITI</b>			
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	Menghasilkan model dan kajian kinerja energi panel peneduh untuk daerah tropis lembab. Menghasilkan draft paten mengenai sistem peneduh berkinerja energi tinggi.	



Mengetahui dan Menyetujui  
Dekan Fakultas Teknik

Prof. Ir. Yoyong Arfiadi, M.Eng, Ph.D.  
NPP:07.88.207 / NIDN:0522026201

Yogyakarta, 23 Juni 2016

Ketua Peneliti:

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

Mengetahui dan Menyetujui  
Ketua LPPM



Ir. Y. Benda Suryadharma, MT.

LPPM Wakil Kepala

## KATA PENGANTAR

Kajian tentang elemen jendela kaca dan perlengkapannya (*fenestration*) seakan tiada habisnya. Banyak aspek yang dapat ditinjau. Penelitian ini lebih fokus pada aspek pencahayaan alami dan termal yang diarahkan kepada invensi sistem peneduh untuk daerah tropis. Untuk dapat menghasilkan komponen bangunan baru berupa sistem peneduh berkinerja energi tinggi perlu kajian mendalam terutama berkaitan dengan dampak termal yang menjadi mengkonsumsi energi terbesar pada bangunan di daerah tropis.

Puji syukur kepada Tuhan atas terselesaikannya penelitian ini. Meskipun penelitian ini telah menghasilkan sistem peneduh baru dengan kinerja pencahayaan alami yang sangat tinggi dengan dampak termal yang lebih rendah dibandingkan dengan dampak termal yang dihasilkan oleh komponen lama yang juga berkinerja pencahayaan alami yang sangat tinggi, inovasi baru menjadi tantangan untuk dapat memanfaatkan sistem peneduh yang menerapkan prinsip edge-ray ini sebagai sumber energi ramah lingkungan. Tentunya dibutuhkan kajian yang lebih mendalam dan bersifat interdisipliner untuk melangkah lebih jauh. Untuk itu terima kasih peneliti ucapkan kepada Albertus Ari S.W. dan M. Ardian Krisna P. yang telah membantu melakukan pengukuran di lapangan, Bpk. Lukas W.N. yang menyempurnakan gambar kerja untuk draft paten dan Bpk. J. Ade Prasetya, ST., MT. yang membantu simulasi CFD.

Akhir kata saya selaku peneliti mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah mendukung kelancaran proses pelaksanaan penelitian ini. Semoga penelitian ini memberikan manfaat yang nyata bagi sains bangunan dan tentu saja bagi kelestarian lingkungan dan kesejahteraan umat manusia. Saran dan kritik yang konstruktif akan membantu penyempurnaan inovasi di masa depan.

Yogyakarta, 23 Juni 2016

## ABSTRAKSI

Sistem peneduh merupakan cara konvensional yang sangat efektif di dalam mengatasi perambatan radiasi panas matahari yang tinggi di daerah tropis lembab. Kelemahan dari sistem peneduh yang berkembang saat ini adalah terciptanya ruangan yang cenderung suram terutama pada area yang jauh dari bukaan cahaya. Untuk mengatasi permasalahan pencahayaan, studi ini berupaya memanfaatkan prinsip-prinsip *edge-ray* pada sistem non-imaging optics pada rancangan sistem peneduh. Beberapa model dikembangkan untuk memperoleh model sistem peneduh yang optimal dari aspek pencahayaan alami dan aspek termal (*solar heat gain*). Kinerja pencahayaan alami diukur dari tingkat terang rata-rata, distribusi tingkat terang secara horisontal dan efek silau yang dihasilkan. Sedangkan, aspek termal diukur dari radiasi panas yang terkumpul dan rata-rata suhu udara di dalam ruangan. Model-model ini dikaji melalui studi simulasi dengan menggunakan program Radiance (plugged in Ecotect) dan EnergyPlus yang divalidasi dengan hasil pengukuran lapangan.

Hasil simulasi menunjukkan model sistem peneduh yang baru memiliki kinerja pencahayaan alami yang (hampir) sama dengan kinerja pencahayaan alami *Anidolic System* yang dikenal sebagai sistem yang sangat efisien di dalam menciptakan kinerja pencahayaan alami yang tinggi. Dengan penerapan prinsip-prinsip *edge-ray* yang dikombinasikan dengan sistem ventilasi dan peneduhan pada bidang kaca *clerestory* memungkinkan kinerja pencahayaan alami sistem peneduh yang baru ini jauh lebih tinggi dan kinerja termal yang lebih baik dibandingkan dengan bukaan cahaya saja (*clerestory*) maupun teritisan.

Kata kunci: kinerja pencahayaan alami, kinerja termal, sistem peneduh, *solar heat gain*, tropis lembab.

## DAFTAR ISI

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 .....	3
I.4 BATASAN MASALAH .....	3
I.5 URGENSI PENELITIAN .....	3
II. TINJAUAN PUSTAKA .....	4
II.1 PENELITIAN TERKAIT.....	4
II.2 DASAR TEORI.....	5
II.2.1 Ciri-ciri iklim tropis lembab .....	5
II.2.2 Prinsip non-imaging optics .....	6
II.2.3 Perpindahan panas melalui kaca .....	8
II.3 PATEN-PATEN TERKAIT.....	9
III. METODE PENELITIAN.....	12
III.1 BAGAN ALIR PENELITIAN .....	12
Penelitian ini dilakukan dengan susunan langkah sebagai berikut:.....	12
III.2 TOLOK UKUR KINERJA SISTEM PENEDUH .....	13
III.3 VARIASI MODEL .....	14
III.4 METODE SIMULASI .....	14
III.4.1 Program Berbasis Radiance .....	14
III.4.2 Program Berbasis EnergyPlus .....	15

III.5	VALIDASI.....	15
III.5.1	Bangunan Uji .....	15
III.5.2	Hasil Validasi.....	18
III.5.3	Setting Simulasi .....	21
IV.	HASIL DAN PEMBAHASAN .....	23
IV.1	PENGEMBANGAN MODEL .....	23
IV.2	KINERJA SISTEM PENEDUH .....	25
IV.2.1	Kinerja Pencahayaan Alami.....	25
IV.2.2	<i>Solar Heat Gain</i> dan Suhu Udara Ruangan.....	32
IV.2.3	Optimasi.....	36
V.	KESIMPULAN.....	49
VI.	DAFTAR PUSTAKA .....	50
VI.1	PATEN .....	50
VI.2	NON PATEN .....	50

## DAFTAR GAMBAR

Gambar III-1. Diagram Tulang Ikan Penelitian .....	12
Gambar III-2. Posisi tapak.....	16
Gambar III-3. Rencana tapak dan posisi alat ukur di luar ruangan. ....	16
Gambar III-4. Dua model kolektor parabolik pada bangunan uji: AS1 (kiri) dan AS2 (kanan) .....	17
Gambar III-5. Radiasi matahari, kecepatan angin dan kalkulasi radiasi panas yang terkumpul di dalam model uji dengan AS1 yang menggunakan beragam kombinasi model ICHTC dan ECHTC.....	21
Gambar IV-1. Faktor cahaya alami (DF) hasil simulasi Radiance.....	26
Gambar IV-2. Tingkat terang hasil simulasi Radiance dari beberapa model dengan arah bukaan ke Timur pada kondisi <i>intermediate sky with sun</i> 1 April pkl. 11.00 di Singapura. ....	26
Gambar IV-3. Tingkat terang hasil simulasi Radiance dari beberapa model dengan arah bukaan ke Timur pada kondisi <i>intermediate sky with sun</i> 16 Oktober pkl. 11.00 di Yogyakarta. .....	27
Gambar IV-4. Tingkat terang hasil simulasi Radiance dari beberapa model dengan arah bukaan ke Timur pada kondisi <i>intermediate sky with sun</i> 21 Desember pkl. 16.00 di Singapura. .....	27
Gambar IV-5. Tingkat terang hasil simulasi Radiance dari beberapa model dengan arah bukaan ke Timur pada kondisi <i>intermediate sky with sun</i> 21 Juni pkl. 16.00 di Yogyakarta. ...	28
Gambar IV-6. Tingkat terang hasil simulasi Radiance dari beberapa model dengan arah bukaan ke Selatan pada kondisi <i>intermediate sky with sun</i> 21 Maret pkl. 12.00 di Singapura. .	29
Gambar IV-7. Tingkat terang hasil simulasi Radiance dari beberapa model dengan arah bukaan ke Utara pada kondisi <i>intermediate sky with sun</i> 21 September pkl. 12.00 di Yogyakarta. .....	29
Gambar IV-8. Tingkat terang hasil simulasi Radiance dari beberapa model dengan arah bukaan ke Selatan pada kondisi <i>intermediate sky with sun</i> 21 Juni pkl. 16.00 di Singapura. ....	30
Gambar IV-9. Tingkat terang hasil simulasi Radiance dari beberapa model dengan arah bukaan ke Utara pada kondisi <i>intermediate sky with sun</i> 21 Desember pkl. 16.00 di Yogyakarta. .....	30
Gambar IV-10. Beban penyejukan ( <i>cooling load</i> ) dan <i>Solar Heat Gain</i> dalam 1 tahun (kWh/m <sup>2</sup> ), serta rata-rata suhu udara di dalam ruangan (°C) hasil simulasi EnergyPlus beberapa model kolektor dan bukaan cahaya yang menghadap ke Timur di Singapura. .....	32

Gambar IV-11. Beban penyejukan ( <i>cooling load</i> ) dan <i>Solar Heat Gain</i> dalam 1 tahun (kWh/m <sup>2</sup> ), serta rata-rata suhu udara di dalam ruangan (°C) hasil simulasi EnergyPlus beberapa model kolektor dan bukaan cahaya yang menghadap ke Selatan di Singapura. .....	32
Gambar IV-12: Beban penyejukan ( <i>cooling load</i> ) dan <i>Solar Heat Gain</i> dalam 1 tahun (kWh/m <sup>2</sup> ), serta rata-rata suhu udara di dalam ruangan (°C) hasil simulasi EnergyPlus beberapa model kolektor dan bukaan cahaya yang menghadap ke Timur di Yogyakarta. .....	33
Gambar IV-13: Beban penyejukan ( <i>cooling load</i> ) dan <i>Solar Heat Gain</i> dalam 1 tahun (kWh/m <sup>2</sup> ), serta rata-rata suhu udara di dalam ruangan (°C) hasil simulasi EnergyPlus beberapa model kolektor dan bukaan cahaya yang menghadap ke Utara di Yogyakarta. .....	33
Gambar IV-14: <i>Solar Heat Gain</i> dalam 1 tahun (kWh/m <sup>2</sup> ), beban penyejukan dalam 1 tahun (kWh/m <sup>2</sup> ) dan rata-rata suhu udara di dalam ruangan (°C) hasil simulasi EnergyPlus beberapa model sistem peneduh dan bukaan cahaya di Singapura.....	35
Gambar IV-15: <i>Solar Heat Gain</i> dalam 1 tahun (kWh/m <sup>2</sup> ), beban penyejukan dalam 1 tahun (kWh/m <sup>2</sup> ) dan rata-rata suhu udara di dalam ruangan (°C) hasil simulasi EnergyPlus beberapa model sistem peneduh dan bukaan cahaya di Yogyakarta. ....	35
Gambar IV-16. DF beberapa model model-model revisi dengan variasi sudut sebaran kolektor parabolik yang dikomparasikan dengan model tanpa ventilasi, model dasar ( <i>clerestory</i> saja), dan model teritisan miring 30°. ....	41
Gambar IV-17. Tingkat terang beberapa model model-model revisi dengan variasi sudut sebaran kolektor parabolik yang dikomparasikan dengan model tanpa ventilasi, model dasar ( <i>clerestory</i> saja), dan model teritisan miring 30° untuk kondisi langit sedang dengan sinar matahari pada 1 April pkl. 11:00 yang menghadap ke Timur di Singapura. ....	42
Gambar IV-18. Tingkat terang beberapa model model-model revisi dengan variasi sudut sebaran kolektor parabolik yang dikomparasikan dengan model tanpa ventilasi, model dasar ( <i>clerestory</i> saja), dan model teritisan miring 30° untuk kondisi langit sedang dengan sinar matahari pada 16 Oktober pkl. 11:00 yang menghadap ke Timur di Yogyakarta.	42

## DAFTAR TABEL

Tabel III-1. Model bangunan uji .....	14
Tabel III-2. Tolok ukur dan instrumen penelitian .....	17
Tabel III-3. Pergeseran hasil simulasi Radiance dan pengukuran lapangan .....	18
Tabel III-4. Deviasi dan pergeseran antara hasil pengukuran lapangan dan simulasi EnergyPlus suhu udara (bola kering) dan perbedaan suhu luar dan dalam ( $dT=To-Ti$ ) pada model dasar. ....	19
Tabel III-5. Deviasi dan pergeseran antara hasil pengukuran lapangan dan simulasi EnergyPlus suhu udara (bola kering) dan perbedaan suhu luar dan dalam ( $dT=To-Ti$ ) pada model dengan AS1. ....	20
Tabel III-6. Setting simulasi Radiance dan EnergyPlus. ....	22
Tabel IV-1. Variasi ruang dan bukaan cahaya .....	25
Tabel IV-2. Kontur suhu dan kecepatan aliran udara beberapa model dengan variasi 3 kondisi kecepatan angin di Yogyakarta. ....	37
Tabel IV-3. Hasil simulasi pencahayaan alami model-model revisi dengan variasi sudut sebaran kolektor parabolik yang menghadap ke Timur di Singapura dengan Radiance-Ecotect. ....	44
Tabel IV-4. Hasil simulasi pencahayaan alami model-model revisi dengan variasi sudut sebaran kolektor parabolik yang menghadap ke Timur di Yogyakarta dengan Radiance-Ecotect. ....	44
Tabel IV-5. Hasil simulasi pencahayaan alami model-model revisi dengan variasi sudut sebaran kolektor parabolik yang menghadap ke Utara di Yogyakarta dengan Radiance-Ecotect. ....	44
Tabel IV-6. Model terbaik untuk setiap parameter dan kondisi langit serta standar deviasinya (SD). ....	45
Tabel IV-7. Kontur suhu dan kecepatan aliran udara beberapa model dengan ventilasi dan modifikasi posisi bidang kaca dengan variasi 3 kondisi kecepatan angin di Yogyakarta. ....	46

# I. PENDAHULUAN

## I.1 LATAR BELAKANG

Elemen peneduh dikenal sebagai metode lama tetapi sangat efektif untuk mencegah masuknya radiasi matahari secara langsung. Akan tetapi, penurunan kinerja pencahayaan alami merupakan permasalahan tipikal yang dihadapi pada aplikasi elemen pembayang, yakni: ruangan yang cenderung gelap atau suram dengan distribusi yang tidak merata.

Banyak studi dilakukan sebagai upaya pengembangan elemen peneduh di daerah tropis untuk mencapai optimasi antara kinerja pencahayaan alami dan kinerja termal ruangan yang menerapkan elemen pembayang. Rak cahaya merupakan salah satu solusi untuk menghasilkan distribusi tingkat terang yang merata, tetapi masih menyisakan masalah radiasi panas matahari yang berpotensi meningkatkan beban penyejukan (Binarti, 2009; Aboushi, 2013). Penambahan panel horizontal adaptif di atas bukaan cahaya bagian atas (*clerestory*) mampu menurunkan beban penyejukan, sedangkan penggunaan bahan reflektif yang selektif pada permukaan atas rak cahaya mampu menurunkan pemakaian listrik untuk lampu (Aboushi, 2013).

Sistem pencahayaan alami yang dikenal sangat efisien dengan kinerja pencahayaan alami yang sangat tinggi adalah *anidolic system* (AS). Beberapa studi tentang AS dilakukan di daerah tropis lembab, seperti: Singapura (Linhart dkk., 2010), Thailand (Praditwattanakit dkk., 2013), Malaysia (Kandar dkk., 2013) dan Indonesia (Binarti dan Satwiko, 2015), yang membuktikan tingginya kinerja pencahayaan alami dari sistem ini. Kinerja pencahayaan alami yang tinggi mampu menurunkan pemakaian energi listrik untuk lampu (Linhart and Scartezzini, 2010). Hasil monitoring dan simulasi bangunan rumah tinggal yang mengaplikasikan AS menunjukkan AS sebagai fenestration yang juga berpotensi menghemat energi untuk penyejukan. Hasil studi komparasi antara selisih suhu udara di dalam ruangan sebelum dan sesudah pemasangan AS membuktikan bahwa aplikasi AS untuk kasus tersebut tidak meningkatkan suhu udara di dalam ruangan (Binarti dan Satwiko, 2015a dan Binarti dan Satwiko, 2015b). Akan tetapi, hasil studi lebih lanjut pada beberapa model AS dengan ukuran yang beragam dan pada bangunan dengan lebar dan tinggi ruangan yang bervariasi tidak

mampu menunjukkan keunggulan kinerja termal dari AS. Meskipun aplikasi AS hanya menaikkan suhu udara di dalam ruangan secara tidak signifikan (maksimum 1,5 K) dibandingkan dengan clerestory saja maupun kombinasi antara clerestory dan elemen pembayang horisontal, akan tetapi AS mengumpulkan radiasi panas matahari yang tinggi (hingga 5 kali radiasi panas matahari pada *clerestory* dan hingga 9 kali radiasi panas matahari pada *clerestory* dengan elemen pembayang horisontal) (Binarti dan Satwiko, 2015c).

Saat ini sistem peneduh adaptif banyak dikembangkan untuk mengatasi radiasi panas matahari yang tinggi dan efek silau pada saat cahaya matahari mendominasi kubah langit. Salah satunya diaplikasikan pada kaca yang disebut sebagai kaca electrochromic. Dengan menggunakan aliran listrik pada lapisan tipis yang berfungsi sebagai pembayang di dalam kaca, kaca ini mampu menurunkan kemampuan mentransmisikan radiasi panas dan cahaya tampak pada saat langit cerah dan kembali meningkatkan kemampuan mentransmisikan panas dan cahaya tampak pada saat langit mendung. Sebagai gambaran kaca electrochromic yang diproduksi oleh SAGE Electrochromics, Inc. jenis classic<sup>TM</sup> triple glass memiliki daya transmisi radiasi matahari sebesar 0,27-0,012 dan daya transmisi cahaya tampak sebesar 0,52-0,03 (Jelle dkk., 2012). Daya transmisi radiasi matahari ini termasuk sangat rendah. Akan tetapi daya transmisi cahaya tampak saat langit mendung sebesar 0,52 terlalu kecil untuk dapat menciptakan interior yang cukup terang. Terlebih lagi jenis kaca ini masih langka di Indonesia dan dijual dengan kisaran harga USD 300-500. Sistem fenestration yang mampu menciptakan ruangan yang terang tetapi dengan radiasi panas yang rendah menjadi kebutuhan mendesak untuk efisiensi energi dan sekaligus menjaga kesehatan dan meningkatkan produktivitas pengguna bangunan.

## **I.2 RUMUSAN MASALAH**

1. Bagaimana bentuk pengembangan sistem peneduh baru yang memiliki kinerja pencahayaan alami dan termal yang tinggi?
2. Bagaimanakah deskripsi sistem peneduh yang efisien energi yang dapat menjadi dasar pengajuan paten?

### **I.3 TUJUAN PENELITIAN**

- a) Mengembangkan sistem peneduh baru yang memiliki kinerja pencahayaan alami dan termal yang tinggi.
- b) Membuat deskripsi untuk pengajuan paten sistem peneduh baru yang efisien energi.

### **I.4 BATASAN MASALAH**

Studi pengembangan sistem peneduh yang efisien energi dilakukan dengan pendekatan simulasi dan pengukuran kinerja sistem peneduh di Yogyakarta yang dipilih untuk mewakili daerah tropis lembab pada belahan bumi Selatan. Hasil pengukuran atau monitoring digunakan untuk memvalidasi hasil simulasi. Untuk daerah tropis lembab pada belahan bumi Utara studi pengembangan hanya dengan pendekatan simulasi yang telah divalidasi.

### **I.5 URGENSI PENELITIAN**

- Kebutuhan akan sistem peneduh yang berkinerja tinggi dari aspek pencahayaan alami dan termal guna tercapainya efisiensi energi di sektor bangunan dan menciptakan ruangan lebih yang sehat, nyaman dan menyenangkan yang akan mendukung produktivitas dan keberlanjutan penghuni/pengguna di dalam ruangan.
- Sebagai dasar penyusunan deskripsi sistem peneduh untuk pengajuan paten.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### II.1 PENELITIAN TERKAIT

Studi tentang AS yang dilakukan oleh peneliti selama dua tahun merupakan dasar dari pengembangan sistem peneduh yang efisien energi. Sistem peneduh ini sendiri adalah solusi bagi permasalahan kinerja termal pada AS.

Penelitian AS yang dilakukan sebelumnya berawal dari pengembangan AS di Lausanne, Swiss (*pilot study*) sebagai solusi pencahayaan alami untuk kondisi langit berawan. Ada tiga macam AS yang dikembangkan di Lausanne yang lebih ditujukan untuk menjawab permasalahan tampilan bangunan (Scartezzini dan Couret, 2002). Hasil studi ini maupun hasil studi yang dilakukan di daerah tropis lembab, seperti di Singapura, Thailand dan Malaysia menunjukkan kinerja pencahayaan alami dari AS yang sangat tinggi. Dampak kinerja pencahayaan alami yang tinggi pada efisiensi pemakaian energi listrik untuk lampu diteliti di Lausanne beberapa tahun setelah *pilot study*.

Studi AS di Singapura berhasil merumuskan kurva distribusi intensitas cahaya (*luminous intensity distribution curve*) yang dihasilkan oleh kolektor AS (Wittkopf dkk., 2010). Empat parameter yang menentukan kinerja pencahayaan alami AS, yaitu: daya pantul bahan pelapis kolektor, lebar dan panjang media transportasi cahaya, dan elemen pembayang, dikaji pada studi lain yang dilakukan pada saat dan tempat yang sama (Linhart dkk., 2010). Beberapa bahan pelapis berdaya pantul tinggi diuji hingga lapisan perak dengan koefisien pantul mendekati 1.

Model AS di Thailand menunjukkan kinerja pencahayaan alami yang tinggi tetapi beresiko silau. Panel horisontal yang dipasang di sisi bawah *clerestory* di dalam ruangan digunakan untuk mengatasi masalah silau (Praditwattanakit dkk., 2013). Sedangkan studi AS di Malaysia bertujuan untuk meneliti orientasi terbaik bagi aplikasi AS (Kandar dkk., 2013).

Studi yang dilakukan di Yogyakarta, Indonesia, bertujuan untuk meneliti kinerja pencahayaan alami secara komprehensif dan termal dari aplikasi AS pada rumah tinggal di daerah perkotaan dengan kepadatan menengah. Pendekatan prinsip *edge-ray* yang

disederhanakan dan biaya yang terjangkau dimaksudkan agar aplikasi AS dapat berkembang secara luas. Penggunaan bahan berdaya pantul cukup tinggi tetapi dengan harga terjangkau menjadi nilai tambah untuk pengembangan AS di negara berkembang. Hasil monitoring dan simulasi menunjukkan bahwa aplikasi AS tidak mampu memodifikasi suhu udara di dalam ruangan (Binarti dan Satwiko, 2015a; Binarti dan Satwiko, 2015b). Temuan ini merupakan nilai lebih dari studi ini. Akan tetapi, kajian kinerja termal yang dilakukan secara lebih rinci dengan variasi model kolektor menunjukkan bahwa sebenarnya AS, meskipun hanya sedikit menaikkan suhu udara di dalam ruangan (1,5 K), mengumpulkan radiasi panas matahari yang lebih banyak daripada bangunan dengan *clerestory* saja dan lebih banyak lagi bangunan dengan *clerestory* dan elemen peneduh horisontal (Binarti dan Satwiko, 2015c).

## **II.2 DASAR TEORI**

### **II.2.1 Ciri-ciri iklim tropis lembab**

Iklim tropis lembab terletak di sekitar katulistiwa antara 15° Lintang Utara dan 15° Lintang Selatan. Daerah iklim ini memiliki kombinasi rata-rata suhu udara dan kelembaban relatif yang tinggi dengan beda suhu udara antara siang dan malam, harian maupun bulanan yang relatif kecil. Curah hujan yang tinggi terjadi terutama pada musim hujan yang berlangsung selama setengah tahun. Tingkat radiasi matahari yang tinggi juga merupakan ciri daerah beriklim tropis lembab. Radiasi ini yang sebagian dipantulkan dan sebagian disebarkan oleh awan maupun uap air yang terkandung di dalam udara, sehingga radiasi yang mencapai permukaan tanah cenderung difus, tetapi kuat yang dapat menyebabkan silau yang menyakitkan. Kecepatan angin di daerah tropis lembab rendah.

Kondisi langit sepanjang tahun cenderung berawan dengan persentasi tertutup awan 60-90%. Tingkat kecemerlangan langit cenderung tinggi meskipun saat berawan. Akan tetapi, pada saat langit didominasi mendung, tingkat kecemerlangan langit cenderung sangat rendah sehingga tampak suram.

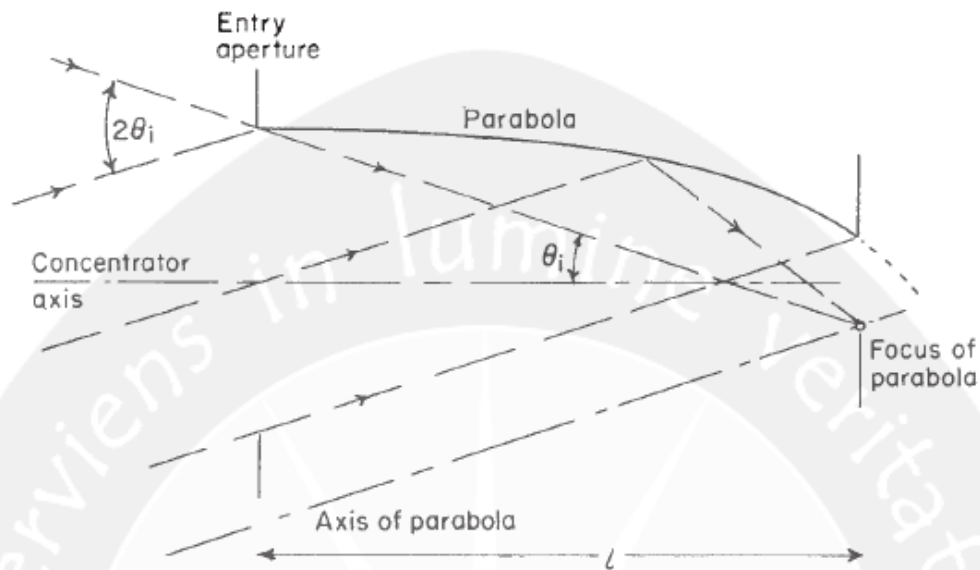
## II.2.2 Prinsip non-imaging optics

*Non-imaging optics* atau *anidolic* dalam bahasa Yunani adalah perpindahan pancaran cahaya secara optimal. *Non-imaging optics* merupakan kebalikan dari prinsip yang diterapkan pada kolektor surya parabolik. Di sini *non-imaging optics* diterapkan untuk pendistribusian pencahayaan alami secara merata. Variabel-variabel tipikal untuk mencapai optimasi adalah: energi pancaran cahaya keseluruhan yang jatuh per satuan area (*total radiant flux*), distribusi angular dari radiasi optik, distribusi spasial dari radiasi optik. Beberapa kelebihan *non-imaging optics* dibandingkan dengan *imaging optics* adalah sistem optik yang lebih kompak, lebih efisien dan lebih baik di dalam menangani sumber cahaya yang luas sehingga tidak mensyaratkan adaptasi terhadap posisi matahari (toleransi terhadap variasi posisi relatif sumber cahaya) sebagaimana yang dituntut pada *imaging optics*.

Prinsip *edge-ray* atau metode “*string*” merupakan metode desain konsentrator dengan sistem *non-imaging optics*. Scartezzini dan Courett (2002) menuliskan prinsip-prinsip *edge-ray* untuk mencapai sistem pencahayaan alami yang efisien pada AS adalah sebagai berikut:

- Besarnya cahaya yang masuk melewati bukaan masuk sama dengan cahaya yang keluar melalui bukaan keluar. Tidak ada pancaran yang hilang, sehingga transmisi cahaya efisien secara geometri.
- Jumlah pantulan diminimalkan untuk mencapai sistem yang efisien secara optik.
- Sistem dengan tingkat selektivitas tinggi akibat bentuk/sudut memungkinkan seleksi pancaran yang datang secara akurat pada bukaan masuk dan kontrol pancaran yang keluar secara akurat pada bukaan keluar.

*Flow-line* adalah metode paling sederhana yang banyak digunakan untuk menerapkan prinsip *edge-ray*. Salah satu dari metode *flow-line* adalah *compound parabolic concentrator* (CPC). Berikut konstruksi profil CPC dengan prinsip *edge-ray* beserta persamaan-persamaan untuk menghitung desain konsentrator.



Gambar 1. Konstruksi profil CPC dengan prinsip *edge-ray* (Winston, 2005, p.51)

Panjang titik fokus parabola ( $f$ ) dapat dihitung dengan persamaan 1, dengan  $2\alpha'$  adalah diameter dari bukaan keluar pada sudut maksimum  $\theta$ :

$$f = \frac{a'}{1 + \sin \alpha}$$

Dengan keseluruhan panjang ( $L$ ) yang dihitung dengan persamaan 2:

$$L = \frac{a'(1 + \sin \theta_i) \cos \theta_i}{\sin^2 \theta_i}$$

Dan diameter bukaan masuk ( $\alpha$ ) dihitung dengan persamaan 3:

$$\alpha = \frac{a'}{\sin \theta_i}$$

Dengan menggabungkan persamaan 2 dan 3, maka diperoleh persamaan 4:

$$L = (a+a')\cot\theta_i$$

### II.2.3 Perpindahan panas melalui kaca

Ada tiga cara perpindahan panas melalui kaca, yaitu: konduktif, radiatif, dan konvektif. Perpindahan panas secara konduktif ditentukan oleh sifat transmitansi termal (U) kaca dan selisih suhu antara udara di dalam ruangan dan udara di luar ruangan. Pada ruang dengan sistem penyejukan udara buatan (air conditioner atau AC), selisih suhu tersebut dipengaruhi oleh suhu udara luar dan besarnya suhu yang dirancang atau ditetapkan pada thermostat. Pemanasan global menyebabkan selisih suhu menjadi lebih besar. Nilai U kaca tunggal bening dengan tebal 6 mm sebesar  $3,97 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  termasuk relatif tinggi. Beberapa cara yang dipakai untuk menurunkan nilai U berdampak pada penurunan tingkat transmitansi cahaya tampaknya (visible light transmittance atau VLT).

Perpindahan panas secara radiatif melalui kaca dipengaruhi oleh tingkat radiasi matahari pada daerah tersebut, arah hadap kaca, dan kemampuan kaca di dalam mengumpulkan radiasi panas (solar heat gain coefficient atau SHGC). Bidang yang menerima paparan radiasi yang tegak lurus terhadap posisi matahari akan menerima radiasi matahari secara maksimal. Sistem peneduh berfungsi untuk mengurangi radiasi panas yang terkumpul melalui bukaan atau bahan transparan (kaca) dengan mencegah masuknya radiasi panas matahari secara langsung. Radiasi matahari yang jatuh pada permukaan kaca sebagian akan ditransmisikan oleh kaca yang kemudian berkontribusi pada peningkatan suhu ruangan, sebagian lagi akan dipantulkan ke ruang luar dan sebagian lagi diserap oleh kaca yang akan menaikkan suhu permukaan kaca. Besarnya persentase ini ditentukan oleh jenis kaca.

Pada *fenestration* yang berfungsi sebagai bukaan cahaya, bukan sebagai ventilasi, perpindahan panas secara konveksi dapat terjadi dalam dua cara. Infiltrasi merupakan perpindahan panas secara konveksi yang disebabkan oleh kerapatan pada kaca itu sendiri dan terutama oleh rongga antara kaca dengan kusen atau daun jendela. Peningkatan kecepatan aliran udara akan meningkatkan infiltrasi. Aliran udara di dalam ruangan maupun di luar ruangan yang digerakkan oleh angin atau perbedaan suhu menyebabkan perpindahan panas secara konvektif dengan memodifikasi suhu permukaan kaca. (ASHRAE, 2009)

### II.3 PATEN-PATEN TERKAIT

Paten-paten terkait lebih ditujukan untuk menyelesaikan masalah pencahayaan alami. Upaya mencegah radiasi matahari langsung dilakukan tetapi pengaruhnya pada beban penyejukan ataupun radiasi panas yang terkumpul tidak dikaji. Hal ini dapat dipahami karena paten-paten tersebut berasal dari daerah dengan radiasi panas yang tidak menjadi permasalahan yang besar.

- Elemen pengarah cahaya (DE 4310717 A1; 6 Oktober 1994; inventor: Helmut Koester). *Guiding system* merupakan salah satu dasar pengembangan sistem pencahayaan lanjut.
- Louver pasif (US 8824051 B2; 2 September 2014; inventor: Kevin W. Thuot dan Marilyne Andersen – Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA). Paten ini mencakup desain, mock-up dan metoda pembuatan. Louver dalam bentuk rangkaian panel pendek ditempatkan di antara dua bidang kaca pada jendela yang dirancang dengan prinsip *compound parabolic concentrator* (CPC) yang juga diterapkan pada AS. Fungsi dari louver ini untuk menyalurkan cahaya alami pada ruang kantor dengan bentangan yang lebar hingga pada sisi terdalam. Selain itu, rangkaian louver berfungsi untuk mengurangi efek silau CPC tunggal.
- Kurva rak cahaya (US 8027092 B1; 27 September 2011; inventor: Chadrick James Huff, James Craig Huff). Paten ini berupa rak cahaya atau panel horizontal yang ditempatkan di antara bukaan cahaya atas (*clerestory*) dan bukaan cahaya bawah (jendela pandang) yang berada di dalam ruangan. Rak cahaya tersebut membentuk cekungan pada permukaan atasnya yang difungsikan sebagai pemantul cahaya alami. Konstruksi rak cahaya pada dinding tidak bersifat permanen sehingga memungkinkan bongkar pasang komponen tanpa merusak bangunan. Rancangan rak cahaya ini mampu menyalurkan cahaya alami ke dalam ruangan hingga kedalaman 27 ft (9 m).
- Reflektor cahaya alami multifungsi (DE 4335446 A1; 20 April 1995; inventor: Helmut Koester)
- Alat dan metoda untuk mengoptimasi cahaya matahari yang berguna yang dipantulkan ke dalam ruangan (US 5285315 A; 8 Februari 1994; inventor: Michael R. Stiles – Synertech System Corporation). Stiles menciptakan beberapa reflektor yang dipasang di depan jendela

untuk menyediakan pencahayaan alami yang bersumber dari cahaya langsung. Reflektor tersebut dirancang dengan sebuah metode yang menganalisis vektor pancaran matahari dan pantulannya secara matematis untuk menentukan orientasi reflektor yang optimum yang bertujuan untuk menghasilkan kombinasi terbaik kedalaman penetrasi cahaya ke dalam ruangan sementara menjaga agar silau yang masuk masih dapat diterima. Reflektor dirancang dengan memperhitungkan bidang jendela dan garis lintang lokasi bangunan. Rangkaian reflektor yang diciptakan dapat bersifat tetap atau bergerak.

- Kawat penyaring surya pasif (US 2010/0101565 A1; 29 April 2010; inventor: Richard C. Maxson, Michael Ekholm – Johnson Screens, Inc., Houston, TX). Komponen kawat penyaring tersusun secara vertikal dari rangkaian komponen berbentuk menyerupai segitiga dengan permukaan cembung pada bagian atas dan cekung pada bagian bawah. Komponen ini ditempatkan di sisi luar dinding bangunan atau sebagai elemen dekoratif, dinding partisi, maupun grid ventilasi. Permukaan cembung akan memantulkan sinar matahari ke sisi luar yang berada pada sudut jatuh vertikal yang tinggi (musim panas) dan memantulkan sinar matahari ke sisi dalam (dinding) ketika berada pada sudut jatuh vertikal yang rendah (musim dingin) sehingga dapat digunakan untuk pemanas ruang secara pasif. Komponen ini tidak dimaksudkan sebagai sistem pencahayaan alami.
- Rangkaian elemen untuk penerangan ruangan dengan cahaya alami (US 4699467 A; 13 Oktober 1987; inventor: Christian Bartenbach, Martin Moeller, Rudolf Lanzenberger – Siemens Aktiengesellschaft, Berlin dan Munich). Inventor menciptakan sistem pencahayaan alami yang di tempatkan pada jendela kaca yang merupakan rangkaian dari beberapa reflektor. Reflektor pada bagian paling atas bukaan jendela berupa panel datar dengan posisi diagonal. Di bawahnya berupa rangkaian reflektor parabola berbentuk parabola yang ditempatkan di antara dua bidang kaca.

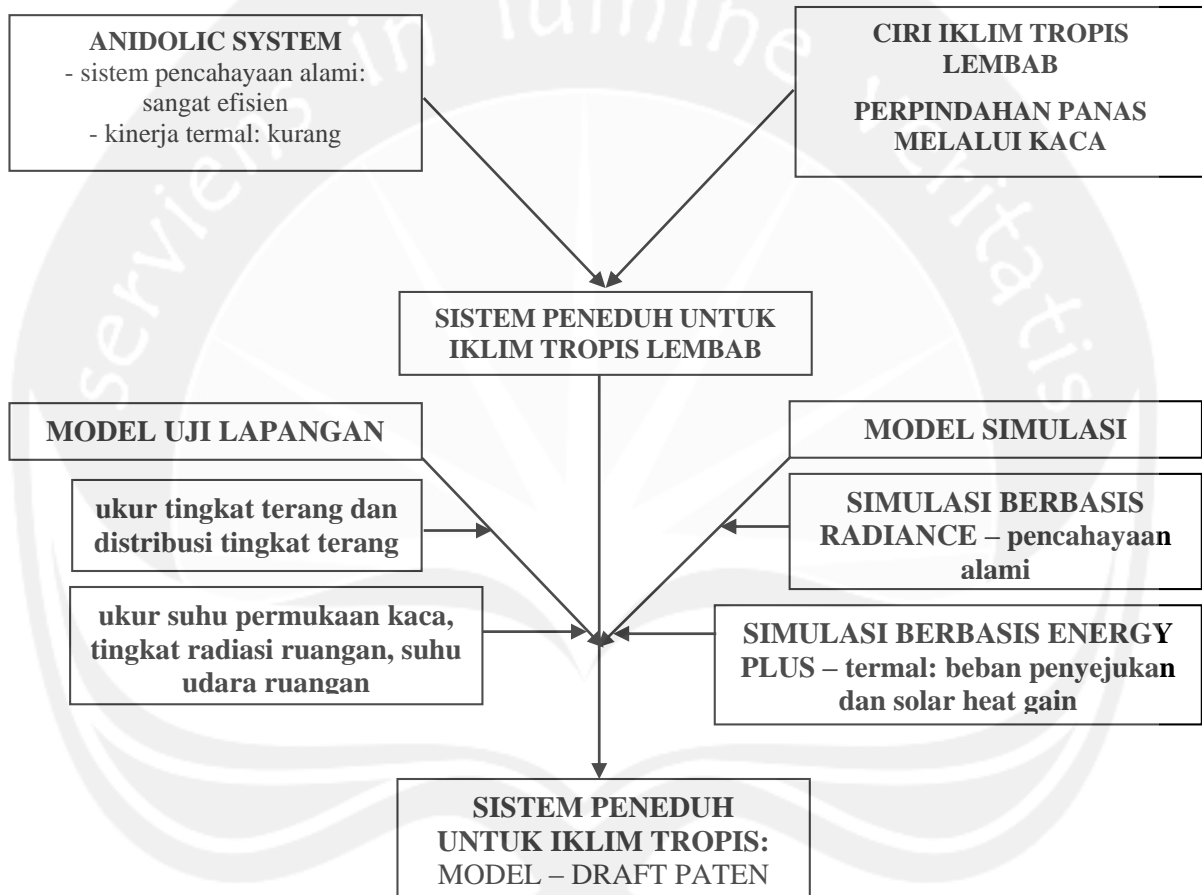
Dari hasil penelusuran mengenai paten elemen peneduh, hanya sedikit elemen peneduh untuk bangunan yang dipatenkan. Sebagian besar paten elemen peneduh untuk bangunan merupakan elemen peneduh yang aktif (adaptif) tanpa atau dengan tambahan fungsi untuk mengubah foton menjadi energi listrik (photovoltaic). Berikut beberapa paten elemen peneduh untuk bangunan yang relevan dengan studi ini:

- Elemen peneduh built-in dari hollow glass Hollow glass built (CN 20150300081; 22 Oktober 2015; inventor: Xuezhong Zhang – Intigral, Inc.; Shanghai). Elemen peneduh dalam bentuk tirai horisontal yang terbuat dari *hollow glass* ditempatkan di antara 2 lembar kaca. Panel-panel *hollow glass* dirangkai oleh kawat yang meliuk yang berfungsi untuk menggerakkan panel-panel tersebut. Tidak ada penjelasan mengenai kinerja elemen ini.
- Peneduh jendela kaca yang diinsulasi (US 7543623; 2 Desember 2005 (filed) 9 Juni 2009; inventor: James D. Allardyce, Michael S. Eveland, Andrew R. Krochmal, Joshua R. Cornish – ODL, Incorporated, Zeeland, MI). Merupakan pengembangan dari paten US 6601633 B2 (4 Oktober 2001 (filed) 5 Agustus 2003 (*published*); inventor: Luann Y. Sun dan Benjamin P. Hummel – ODL, Incorporated, Zeeland, MI). Sebuah jendela kaca yang menggunakan elemen peneduh di antara 2 lembar kaca insulator pada sisi dalam dan 2 lembar kaca pada sisi luar.
- Sistem peneduh (US 8881456 B2 27 Februari 2012 (filed) 11 November 2014; inventor: Peng Xu). Sistem peneduh ini terdiri dari 2 lembar kaca, sebuah tirai dengan lembaran yang beragam yang dilengkapi dengan piranti pemutar yang ditempatkan pada ruang antara kaca yang kedap udara. Lembaran tersebut dilapisi dengan lapisan berdaya pantul rendah pada satu sisi dan berdaya pantul tinggi pada sisi lain. Lembaran peneduh digerakkan oleh sistem pengendali (Control Processing Unit yang dihubungkan ke sensor suhu, sensor cahaya dan pengalih manual) untuk menyesuaikan sudut putaran sesuai dengan sinyal input yang diterima.

### 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 SISTEM PENEDUH

Permasalahan sistem *fenestration* di daerah tropis lembab adalah bagaimana sistem tersebut mereduksi radiasi panas, mencegah silau yang menyakitkan tetapi tidak menciptakan ruangan yang suram. Kesan suram dapat dicegah dengan penyediaan tingkat terang dari cahaya alami (faktor cahaya alami) yang cukup dengan distribusi horisontal yang merata, tingkat kecermerlangan yang cukup, dan beban panas (penyejukan) yang rendah.

Pada daerah tropis lembab yang sebagian besar kulit bangunannya terpapar sinar matahari sepanjang tahun, reduksi panas secara radiatif menjadi sangat penting terutama pada sistem *fenestration* yang sebagian besar panas yang mengalir secara radiatif. Reduksi panas secara konduktif akan membantu tercapainya efisiensi energi untuk beban penyejukan. Hanya saja, cara ini cenderung mahal atau harus didukung oleh perencanaan ruang secara makro. Demikian pula konveksi yang terjadi akibat aliran udara oleh angin atau perbedaan suhu yang dingin yang dapat menurunkan suhu permukaan kaca secara signifikan melalui perencanaan ruang secara makro. Sedangkan model *fenestration* cenderung menghambat pergerakan aliran udara di permukaan kaca.

Dengan demikian tolok ukur kinerja sistem peneduh yang dikembangkan dapat dirumuskan sebagai berikut:

- a. Tingkat terang atau faktor cahaya alami ( $DF = \text{daylight factor}$ );
- b. Distribusi tingkat terang secara horisontal;
- c. Tingkat kecermerlangan;
- d. Beban panas (untuk penyejukan buatan atau Air Conditioning/AC) atau suhu udara di dalam ruangan;
- e. Panas radiasi yang terkumpul.

Tingkat kecermerlangan tidak akan diukur dengan argumentasi bahwa koefisien pantul permukaan interior akan ditentukan sesuai dengan standard. Karena koefisien pantul permukaan interior telah ditentukan sebagai variabel tetap, maka hanya tingkat terangnya yang berubah. Besarnya tingkat terang atau DF ditentukan oleh kegiatan yang berlangsung di dalam ruangan. Dengan demikian, efisiensi energi dari model sistem peneduh yang baru akan dikaji

dengan membandingkannya dengan efisiensi energi yang dihasilkan oleh model konvensional (bukaan cahaya saja) dan sistem peneduh horisontal yang dikenal mampu menurunkan beban penyejukan atau radiasi panas yang terkumpul. Sedangkan, perpindahan panas secara konveksi tidak dihitung secara detail, tetapi ikut mempengaruhi perhitungan beban penyejukan.

### III.3 VARIASI MODEL

Ada dua macam model, yaitu: model fisik dan model virtual. Model fisik digunakan untuk validasi hasil simulasi. Bahan dasar pembuatan model fisik akan memanfaatkan bahan bekas model pada penelitian Hibah Bersaing tahun ke-2 2015. Dari model yang ada akan dilakukan modifikasi, sehingga macam model fisik yang digunakan menyesuaikan dengan bahan dan lokasi yang ada. Dari bahan yang ada dibuat beberapa variasi pengujian lapangan sebagai berikut:

Tabel III-1. Model bangunan uji

langkah	model	Lama pengukuran (hari)
I	A1	3
II	A2	3
III	Dasar (clerestory dan panel internal)	3

### III.4 METODE SIMULASI

#### III.4.1 Program Berbasis Radiance

Program simulasi berbasis Radiance digunakan untuk meneliti kinerja pencahayaan alami dari model yang dikembangkan. Simulasi dilakukan pada kondisi terburuk (*overcast sky*), kondisi sedang (*intermediate sky*) dan kondisi terbaik (*clear sky with sun*) pada beberapa posisi matahari khususnya untuk *intermediate sky* dan *clear sky with sun*. Untuk merepresentasikan kondisi langit yang nyata (persentase dari kondisi langit yang ada) dapat dilakukan simulasi yang berbasis iklim atau dengan memodelkan kubah langit sesuai dengan persentase kondisi langit yang ada.

Radiance merupakan program simulasi pencahayaan yang berbasis *backward ray-tracing* yang digunakan secara luas untuk memprediksi kinerja pencahayaan alami. Banyak studi memvalidasi akurasi algoritma Radiance (Reinhart dan Andersen, 2006; Lim dkk., 2010; dan McNeil dan Lee, 2012). Di samping algoritma program simulasi pencahayaan alami, tingkat terang langit juga menentukan akurasi hasil simulasi. Pada Radiance plugged in Ecotect tersedia 4 pilihan tingkat terang langit, yakni: *sunny sky (CIE clear sky)*, *intermediate sky*, *cloudy sky (CIE overcast sky)* and *uniform sky*.

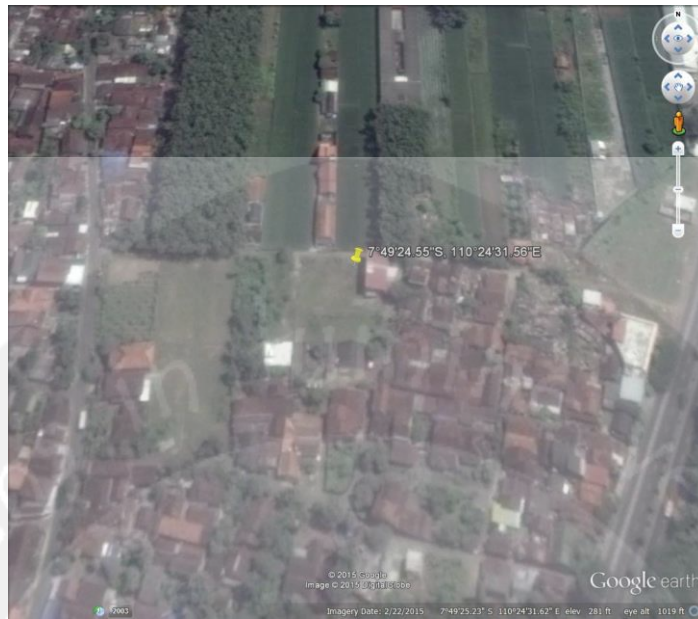
#### **III.4.2 Program Berbasis EnergyPlus**

Kalkulasi beban penyejukan, suhu udara bola kering dan radiasi panas yang terkumpul (solar heat gain) dikerjakan dengan program simulasi berbasis EnergyPlus. Besarnya beban penyejukan dan radiasi panas dikaji dari data dalam satu tahun yang menggambarkan data bulanan maupun data pada tanggal tertentu yang menggambarkan data per jam. Efek penerapan model pada suhu udara di dalam ruangan akan ditinjau secara lebih detail pada tanggal-tanggal tertentu yang menunjukkan fluktuasi suhu setiap jam. Tergantung kasus model yang disimulasi, tetapi secara umum ketidakakurasian EnergyPlus terletak pada kalkulasi perpindahan panas secara konvektif dan radiatif.

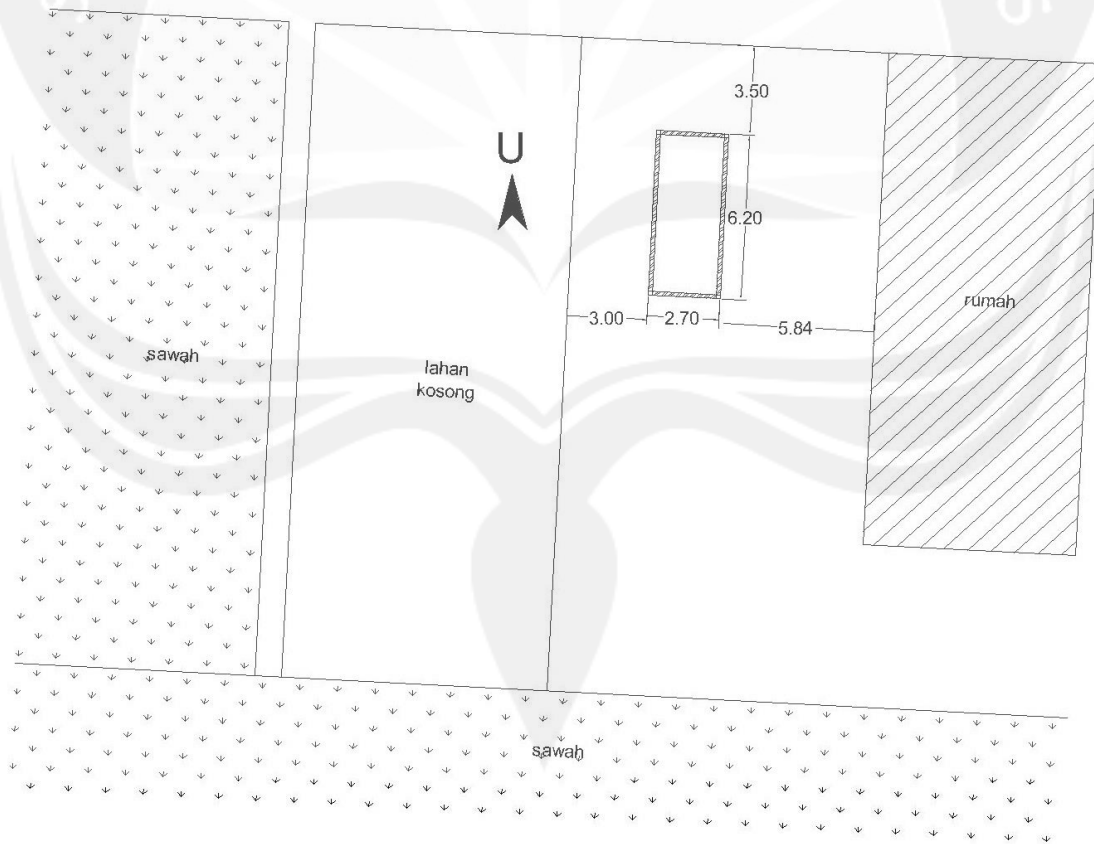
### **III.5 VALIDASI**

#### **III.5.1 Bangunan Uji**

Model uji ditempatkan pada bangunan uji yang tidak dihuni yang terletak pada lahan perumahan dengan beberapa area yang masih kosong (berupa sawah maupun lahan kosong belum dibangun). Gambar 1 menunjukkan posisi tapak berdasarkan Google Earth dan gambar 2 adalah rencana tapak bangunan uji.

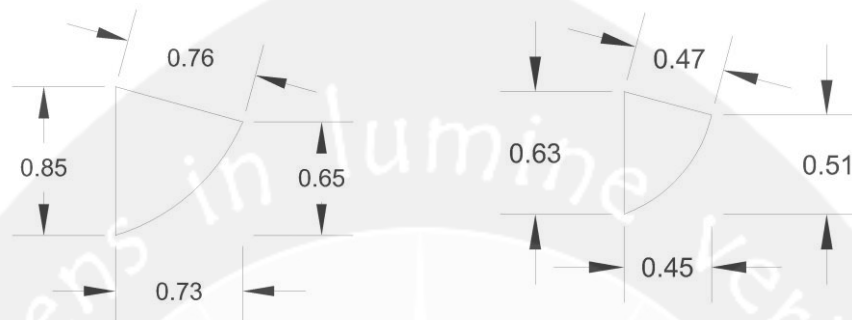


Gambar III-2. Posisi tapak



Gambar III-3. Rencana tapak dan posisi alat ukur di luar ruangan.

Bangunan uji menerapkan 2 model kolektor parabolik (Gamb. 4). Dengan demikian ada 3 model uji validasi, yaitu: model dasar (tanpa kolektor parabolik), model dengan AS 1, dan model dengan AS2.



**Gambar III-4.** Dua model kolektor parabolik pada bangunan uji: AS1 (kiri) dan AS2 (kanan)

Lama pengukuran lapangan untuk setiap model dapat dilihat di Tabel III-1. Untuk komponen yang diukur berikut alat ukurnya dipaparkan di Tabel III-2.

**Tabel III-2.** Tolok ukur dan instrumen penelitian

Kinerja	Tolok ukur	Posisi	Alat ukur dan jumlah
Pencahaya-an alami	Tingkat terang/faktor cahaya alami dan distribusinya	eksterior	Hobo UA 002-08 (1 bh)
		interior	Hobo U12-012 (3 bh)
Termal	Suhu udara bola kering	eksterior	Weather station (1)
		interior	Hobo U12-012 (3 bh)
	Kelembaban udara relatif	eksterior	Weather station (1)
		interior	Hobo U12-012 (3 bh)
Suhu permukaan kaca	eksterior	Infra red termometer (1 bh)	
	interior	Thermocouple wire (1 bh)	
Tingkat radiasi		eksterior	Weather station (1) atau data iklim dari BMKG
		interior	Piranometer (1)
	Kecepatan dan arah aliran udara	eksterior	Weather station (1)
	Tekanan udara	eksterior	Weather station (1)

### III.5.2 Hasil Validasi

Hasil validasi program berbasis Radiance dengan menggunakan model AS yang dilakukan di Yogyakarta menunjukkan hasil simulasi yang cukup mendekati hasil pengukuran lapangan dengan rata-rata pergeseran sebesar 0% hingga 14%. Deviasi terbesar terjadi pada titik ukur 1,5 m dan 5,5 m dari bukaan cahaya pada model dengan *clerestory* saja. Hasil validasi menunjukkan Radiance mengalami kesulitan dalam memprediksi pancaran cahaya langsung dengan tingkat terang yang tinggi. Pergeseran tingkat terang juga disebabkan oleh fluktuasi tingkat terang kubah langit. Prediksi DF oleh Radiance (deviasi < 5%) justru menunjukkan akurasi kalkulasi Radiance pada kondisi langit mendung (*overcast sky*).

**Tabel III-3.** Pergeseran hasil simulasi Radiance dan pengukuran lapangan

Model	Tgl.	Deviasi DF (%)				Deviasi Ei (lx)				Pergeseran (%)			
		1.5	3.5	5.5	avg	1.5	3.5	5.5	avg	1.5	3.5	5.5	avg
clerestory	08.05	0.04	0.04	0.02	0.03	31	-64	-106	-46	0.03	-0.09	-0.22	-0.09
	15.05	0.08	0.02	0.01	0.04	-473	-87	12	-183	-0.35	-0.09	0.04	-0.13
AS1	27.05	0.03	0.03	0.02	0.02	46	-13	-35	-1	0.02	-0.11	-0.08	-0.06
	28.05	0.04	0.04	0.03	0.03	-26	-46	-46	-42	-0.12	-0.18	-0.11	-0.14
AS2	10.06	0.02	0.02	0.01	0.02	52	3	-19	12	0.11	-0.02	-0.09	0.00
	11.06	0.03	0.04	0.02	0.03	63	21	-4	27	0.10	-0.09	-0.12	-0.04

Validasi program EnergyPlus bertujuan untuk menentukan model koefisien perpindahan panas secara konvektif interior (ICHTC) dan eksterior (ECHTC) yang paling tepat untuk kasus ini. Model kalkulasi perpindahan panas secara radiatif yang menggunakan approximate view factor tidak dilakukan karena beberapa studi menunjukkan tingkat pergeseran dari model ini untuk diterapkan pada bangunan tunggal masih dapat diterima (Ellis, 2003; Manz dkk., 2004; Loutsenhiser dkk., 2008). Validasi dilakukan untuk variasi 2 model ICHTC dan 4 model ECHTC yang menghasilkan 8 kombinasi. Penjelasan dari setiap model koefisien perpindahan panas secara konvektif adalah sebagai berikut:

- Adaptive Algorithm untuk ICHTC (iA) merupakan model yang paling komprehensif.
- Adaptive Algorithm untuk ECHTC (eA) merupakan model yang paling komprehensif.

- TARP untuk ICHTC (iT) merupakan model default yang cukup komprehensif.
- TARP untuk ECHTC (eT) merupakan model yang cukup komprehensif yang memperhitungkan kekasaran permukaan lahan, orientasi permukaan dan perbedaan suhu udara permukaan dan zona (Zhu dkk., 2012).
- DOE-2 untuk ECHTC (eD) merupakan model default yang ditujukan untuk permukaan yang sangat licin/halus seperti kaca jendela. Model ini memperhitungkan tipe-tipe lahan yang berbeda tetapi tidak memperhitungkan variasi efek pembayangan oleh bangunan di sekitarnya.
- MoWiTT untuk ECHTC (eM) merupakan model yang cocok diaplikasikan pada kaca jendela bangunan bertingkat rendah. Model ini tidak memperhitungkan variasi tipe-tipe lahan dan efek pembayangan oleh bangunan di sekitarnya.

Perbandingan antara elemen-elemen iklim pada tapak dan file data iklim menunjukkan perbedaan pada suhu udara lingkungan. Rata-rata perbedaan suhu udara lingkungan pada tanggal 8, 9, 11, 13 dan 15 Mei sebesar 4,19 K, sedangkan pada tanggal 27, 28, 29, 30 Mei dan 3 Juni sebesar 4,15 K.

**Tabel III-4.** Deviasi dan pergeseran antara hasil pengukuran lapangan dan simulasi EnergyPlus suhu udara (bola kering) dan perbedaan suhu luar dan dalam ( $dT=To-Ti$ ) pada model dasar.

Elemen iklim	Rata-rata (deg C)								
	real	iT-eD	iT-eA	iT-eT	iT-eM	iA-eD	iA-eA	iA-eT	iA-eM
deviasi	Ti	4.683	4.683	4.726	4.691	4.551	4.664	4.664	4.664
	To	4.733	4.733	4.733	4.733	4.733	4.733	4.733	4.733
pergeseran	Ti	0.149	0.149	0.149	0.149	0.145	0.148	0.148	0.148
	To	0.128	0.128	0.128	0.128	0.128	0.128	0.128	0.128
$dT=(To - Ti)$	4.190	4.140	4.140	4.183	4.148	4.008	4.121	4.121	4.121

Tabel III-4 menampilkan deviasi dan pergeseran antara suhu udara lingkungan dan ruangan pada bangunan uji hasil pengukuran lapangan dan simulasi ( $To$  dan  $Ti$ ). Dapat disimpulkan bahwa simulasi EnergyPlus dengan 2 model ICHTC dan 4 model ECHTC menunjukkan kecocokan dengan hasil pengukuran lapangan yang secara umum memiliki pergeseran <10%. Pergeseran antara simulasi hasil pengukuran lapangan dan simulasi pada

bangunan uji dasar lebih tinggi daripada pergeseran bangunan uji dengan AS1, tetapi masih <20%. Deviasi dan pergeseran antara To dan Ti antar kombinasi model ICHTC dan ECHTC pada Tabel III-5 kelihatan mirip. Perbedaan deviasi hanya terlihat pada hasil Ti kombinasi antara TARP dan DOE-2 pada model dengan AS1. Kesesuaian model perpindahan panas secara konvektif diukur dari perbedaan suhu terkecil antara hasil simulasi dan hasil pengukuran lapangan, kemiripan deviasi dan pergeseran Ti dan To. Kombinasi yang memenuhi kriteria tersebut adalah interior TARP - exterior TARP dan interior Adaptive Algorithm – keempat model ECHTC.

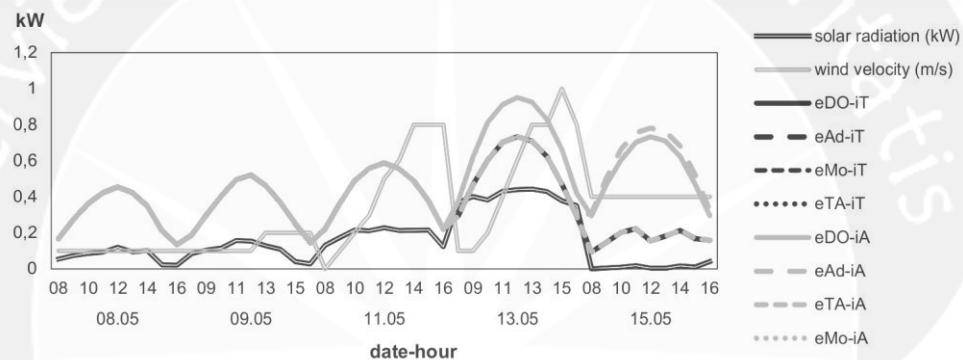
**Tabel III-5.** Deviasi dan pergeseran antara hasil pengukuran lapangan dan simulasi EnergyPlus suhu udara (bola kering) dan perbedaan suhu luar dan dalam ( $dT=To-Ti$ ) pada model dengan AS1.

Elemen iklim	Rata-rata (deg C)								
	real	iT-eD	iT-eA	iT-eT	iT-eM	iA-eD	iA-eA	iA-eT	iA-eM
deviasi	Ti	2.055	3.008	3.008	3.008	2.985	2.992	2.992	2.992
	To	3.024	3.024	3.024	3.024	3.024	3.024	3.024	3.024
pergeseran	Ti	0.066	0.098	0.098	0.098	0.097	0.097	0.097	0.097
	To	0.084	0.084	0.084	0.084	0.084	0.084	0.084	0.084
$dT=(T_o - T_i)$	4.150	3.180	4.133	4.133	4.133	4.110	4.117	4.117	4.117

Kalkulasi radiasi panas yang terkumpul di dalam model uji dengan AS1 yang menggunakan beragam kombinasi model ECHTC dan ICHTC memperlihatkan hasil yang agak berbeda dengan yang ditunjukkan pada Tabel III-5 dan Gambar III-5. Beragam kombinasi model ECHTC dan ICHTC tidak menunjukkan adanya perbedaan hasil hitungan radiasi panas yang terkumpul pada tanggal 8, 9 dan 11 Mei. Pada tanggal 13 dan 15 Mei perbedaan kombinasi model ECHTC dan ICHTC menghasilkan perbedaan yang signifikan pada kalkulasi radiasi panas yang terkumpul. Gambar III-5 menjelaskan bahwa kombinasi model ECHTC dan ICHTC dapat diklasifikasikan berdasarkan pada hasil kalkulasi radiasi panas yang terkumpul. Kelompok I adalah DOE-2 – TARP, Adaptive Algorithm – TARP, MoWitt – TARP, TARP – TARP, and TARP - Adaptive Algorithm. Kelompok II adalah DOE-2 – Adaptive Algorithm and TARP - Adaptive Algorithm. Radiasi panas terkumpul yang dihitung dengan kombinasi model Adaptive Algorithm - Adaptive Algorithm memiliki hasil yang mendekati dengan hasil hitungan kelompok II pada tanggal 8, 9 dan 11. Pada tanggal 13 dan 15 Mei kalkulasi dengan

kombinasi model kelompok II menghasilkan radiasi panas terkumpul yang lebih tinggi daripada hasil kalkulasi dengan kombinasi model kelompok I.

Data iklim yang ada pada EnergyPlus menunjukkan peningkatan kecepatan angin dan radiasi panas matahari mulai 11 Mei hingga 15 Mei (Gambar III-5). Peningkatan kecepatan angin memungkinkan pengurangan radiasi panas terkumpul melalui penurunan suhu permukaan kaca dan ventilasi alami yang digerakkan oleh angin di dalam model uji. Kombinasi model kelompok I yang menggunakan TARP sebagai ICHTC tampak lebih sensitif terhadap efek peningkatan kecepatan angin. Hal ini membuktikan bahwa TARP merupakan model konvektif alami yang komprehensif untuk permukaan interior (Zhu dkk., 2012).



**Gambar III-5.** Radiasi matahari, kecepatan angin dan kalkulasi radiasi panas yang terkumpul di dalam model uji dengan AS1 yang menggunakan beragam kombinasi model ICHTC dan ECHTC.

### III.5.3 Setting Simulasi

Berdasarkan hasil validasi terutama pada bangunan uji dengan AS1, selanjutnya studi simulasi EnergyPlus menggunakan interior Adaptive Algorithm - exterior Adaptive Algorithm dan interior TARP - exterior TARP. Simulasi radiance digunakan untuk memperkirakan faktor cahaya alami (DF), tingkat terang interior dan distribusinya, sedangkan EnergyPlus digunakan untuk mengkalkulasi radiasi panas yang terkumpul dan suhu udara ruangan dengan menggunakan data iklim Yogyakarta dan Singapura. Selain simulasi DF (pada kondisi langit berawan atau *overcast sky*, simulasi tingkat terang dilakukan pada kondisi *intermediate sky*

*with the sun* (IS WS) dua kali untuk setiap model bukaan dan arah hadap yang mewakili posisi matahari pada titik tertinggi dan terendah.

**Tabel III-6.** Setting simulasi Radiance dan EnergyPlus.

Radiance	Lokasi model dan model bukaan arah hadap dan tanggal simulasi (Maks – Min)	Yogyakarta	Utara (N): 21 September, 12:00 (IS WS N-21 sep 12:00) 21 December, 16:00 (IS WS N-21 dec 16:00)
			Timur (E): 16 Oktober, 11:00 (IS WS N-16 oct 11:00) 21 Juni, 16:00 (IS WS N-21 jun 16:00)
		Singapore	Selatan (S): 21 Maret, 12:00 (IS WS N-21 mar 12:00) 21 Juni, 16:00 (IS WS N-21 jun 16:00)
			Timur (E): 1 April, 11:00 (IS WS N-1 apr 11:00) 21 Desember, 16:00 (IS WS N-21 dec 16:00)
EnergyPlus	tapak	<i>Exposure to wind</i>	<i>normal</i>
	kegiatan	<i>Generic office area, no equipments</i>	
	Ruang ber-AC	Sistem AC	<i>Split no fresh air</i>
		COP	1.83
		Cooling set point	26 °C
		Kekedapan udara: model infiltrasi	<i>Scheduled, constant rate: 1 ac/h</i>
Ruang dengan ventilasi alami	sistem	<i>No heating/cooling</i>	
	Faktor angin	<i>1 m/s</i>	
	Kekedapan udara: model infiltrasi	<i>Calculated, good, constant rate: 1 ac/h</i>	

## IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

### IV.1 PENGEMBANGAN MODEL

Model panel peneduh akan diuraikan secara rinci pada draft paten.

Pada daerah tropis lembab dengan tingkat radiasi matahari yang tinggi perambatan panas melalui kaca akan menghasilkan panas terkumpul yang tinggi akibat perpindahan panas secara radiatif dan konduktif. Dengan kecepatan angin yang rendah penurunan suhu permukaan kaca secara konvektif berdampak tidak signifikan. Untuk itu bidang kaca pada AS dilepas dan digunakan untuk menutup *clerestory*. Dengan demikian AS juga berfungsi sebagai panel pembayang/peneduh (*sun shading*) di samping sebagai kolektor cahaya alami.

Hasil studi 2 tahun tentang AS disimpulkan bahwa untuk menyalurkan cahaya alami ke dalam ruangan ukuran kolektor harus menyesuaikan tinggi *clerestory* dan lebar ruangan. Meskipun luas *clerestory* yang dibutuhkan untuk menciptakan tingkat terang ruangan tidak sebesar aturan praktis yang digunakan pada sistem pencahayaan konvensional, untuk ruangan yang lebar akan membutuhkan kolektor yang lebar. Kolektor yang lebar akan merusak tampilan bangunan akibat tampilannya yang tampak janggal. Membagi sebuah kolektor menjadi susunan panel-panel parabolik secara vertikal merupakan ide penyelesaian masalah tampilan bangunan. Lebar panel parabolik dirancang sesuai dengan sudut masuk. Jarak antar panel secara vertikal diupayakan mampu mencegah masuknya radiasi matahari secara langsung melalui kaca *clerestory*.

Salah satu prinsip desain AS yang dihasilkan dari studi 2 tahun tentang AS adalah lebar dan luas permukaan kolektor yang menentukan besarnya *sky factor* (SF) (Binarti dan Satwiko, 2016). Karena AS dipasang pada fasade bangunan, SF juga dipengaruhi oleh posisi/ketinggian kolektor terhadap tinggi fasade. Ketika matahari ada di sisi berlawanan dengan posisi kolektor, kolektor harus dibuat dengan lebar yang mampu menangkap pancaran cahaya matahari yang terhambat oleh fasade di atas kolektor. Hasil penelitian tahun I menunjukkan cara ini tidak efisien karena perjalanan cahaya pantulan akan lebih panjang. Di samping itu cara ini akan menciptakan kolektor yang sangat lebar sehingga tidak efisien dari segi konstruksi dan

merusak tampilan bangunan. Untuk meningkatkan SF panel-panel parabolik disusun membentuk sudut yang semakin melebar pada bagian bawah. Perlu dicari sudut yang optimal agar susunan panel parabolik tidak terlalu lebar.

Ada beberapa pertanyaan (P) dan hipotesis (H) yang menentukan model kombinasi kolektor dan *clerestory*, yaitu:

1. H: Sudut sebaran lebar akan menghasilkan tingkat terang yang tinggi tetapi memungkinkan radiasi panas matahari langsung masuk melalui *clerestory*.  
P: Berapa sudut sebaran kolektor yang optimal untuk pencahayaan alami dan beban radiasi matahari?
2. H: Kolektor yang lebar memungkinkan tingkat terang yang tinggi, tetapi juga masuknya radiasi panas matahari langsung masuk melalui *clerestory*.  
P: Berapa lebar kolektor yang optimal untuk pencahayaan alami dan beban radiasi matahari?
3. H: Tinggi *clerestory* memungkinkan tingkat terang yang tinggi dan distribusi tingkat terang yang lebih merata, tetapi juga memungkinkan masuknya radiasi panas matahari. *Clerestory* yang tinggi akan bermanfaat untuk pencahayaan alami tanpa peningkatan radiasi panas matahari jika tidak terpapar radiasi matahari langsung atau terlindungi oleh kolektor yang dalam.  
P: Bagaimana desain kolektor yang memungkinkan *clerestory* yang tinggi dan tidak terpapar radiasi matahari langsung?

Dari pernyataan di atas dapat dirumuskan variasi model yang akan diuji, yaitu sebagai berikut:

1. Panjang dan lebar ruangan yang akan menentukan tinggi *clerestory*. Model ruangan dibuat dalam 3 variasi dengan konsekuensi tinggi *clerestory* memiliki 3 variasi, yaitu: 6 m, 8 m dan 10 m. Untuk simulasi pertama *clerestory* memiliki luas  $\pm 10\%$  (9,33%) luas lantai ruangan. Jumlah panel peneduh parabolik mengikuti tinggi *clerestory*.

**Tabel IV-1.** Variasi ruang dan bukaan cahaya

Lebar ruang (m)	Tinggi ruang (m)	Luas bukaan (cm <sup>2</sup> )	Ambang atas bukaan (m)
6	3.0	60 x 560	2.8
8	3.2	80 x 560	2.9
10	3.5	100 x 560	3.1

- Panel-panel peneduh parabolik dirancang dengan 3 variasi sudut ( $w$ ):  $45^\circ$ ,  $52^\circ$ ,  $60^\circ$ . Sudut terkecil dipilih  $45^\circ$  karena penggunaan sudut  $<45^\circ$  menuntut *clerestory*/dinding tempat menempelkan panel yang lebih tinggi (volume ruang yang diciptakan oleh panel parabolik juga lebih besar) dengan cahaya alami yang ditangkap oleh panel parabolik yang relatif sedikit. Jarak antara ujung atas panel ke dinding secara tegak lurus (lebar =  $a$ ) dirancang dengan 4 variasi, yaitu: 91 cm, 108 cm, 118 cm, 128 cm.
- Clerestory* dirancang dengan 3 variasi tinggi ( $C$ ), yaitu: 70 cm, 75 cm, 80 cm.

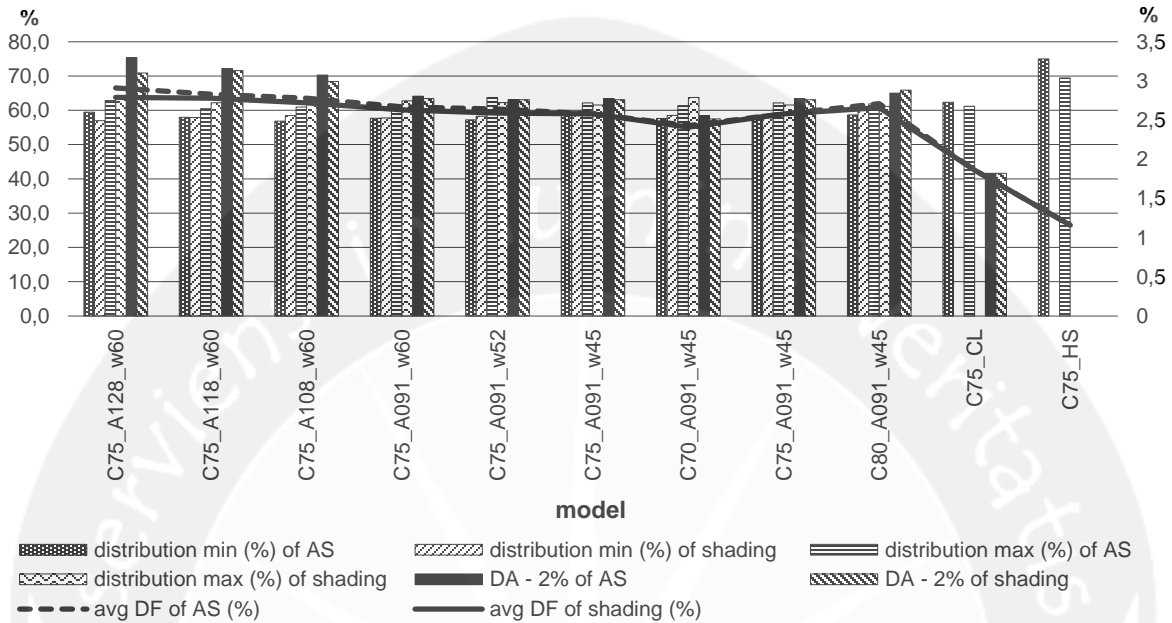
Untuk mengukur kinerja energi panel peneduh, hasil simulasi tingkat DF dan  $E_i$  rata-rata, distribusi DF, distribusi  $E_i$ , DA-2%, DA-300 lx,  $T_i$  rata-rata, *solar heat gain* dan beban penyejukan dalam 1 tahun panel peneduh baru (shading) dikomparasikan dengan kinerja energi *clerestory* saja (CL), *clerestory* dengan teritisan miring  $30^\circ$  (HS) dan *anidolic system* dengan variasi kolektor dan *clerestory* yang sama (AS).

## IV.2 KINERJA SISTEM PENEDUH

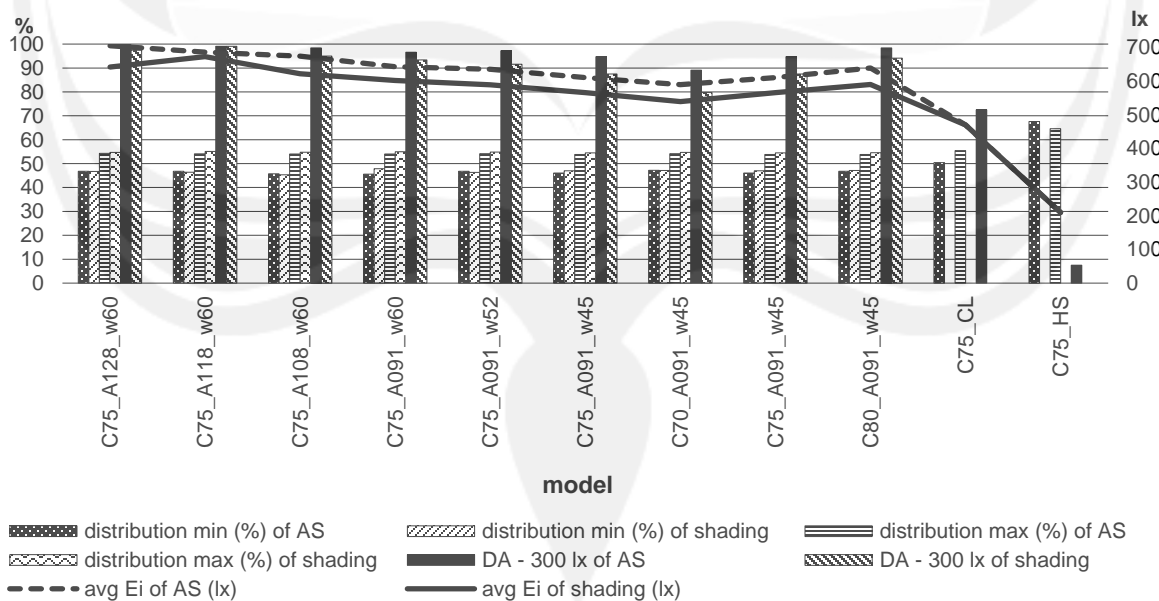
### IV.2.1 Kinerja Pencahayaan Alami

Hasil simulasi menunjukkan faktor cahaya alami dan tingkat terang yang dihasilkan oleh bukaan cahaya dengan sistem peneduh sedikit lebih rendah dibandingkan dengan faktor cahaya alami AS (avg DF dan avg  $E_i$ ). Perbedaan yang signifikan terjadi pada tingkat terang rata-rata pada kondisi *intermediate sky with sun* dari *fenestration system* yang menghadap ke Timur pada 1 April pkl. 11.00 di Singapura dan 16 Oktober pkl. 11.00 di Yogyakarta, serta yang mengarah ke Selatan pada 21 Maret pkl. 12.00 di Singapura dan ke Utara pada 21 September pkl. 12.00 di Yogyakarta. Pada tanggal-tanggal tersebut matahari pada posisi di atas

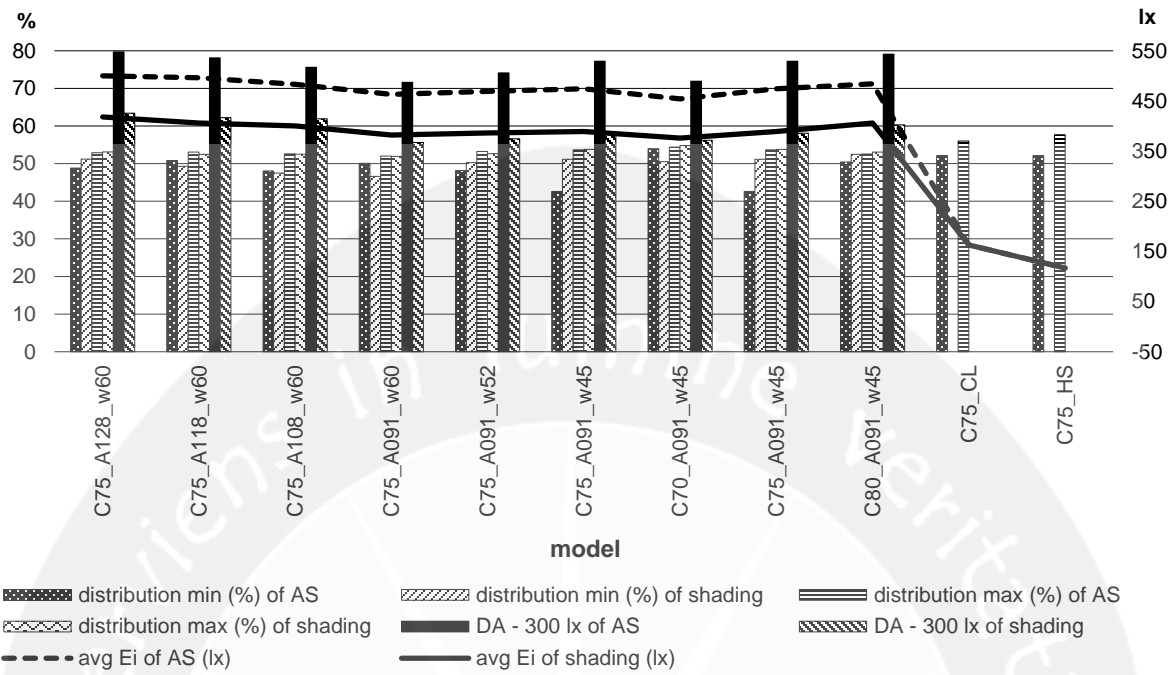
*fenestration system* sehingga perbedaan desain *fenestration* mampu memodifikasi tingkat terang secara signifikan (10-12%).



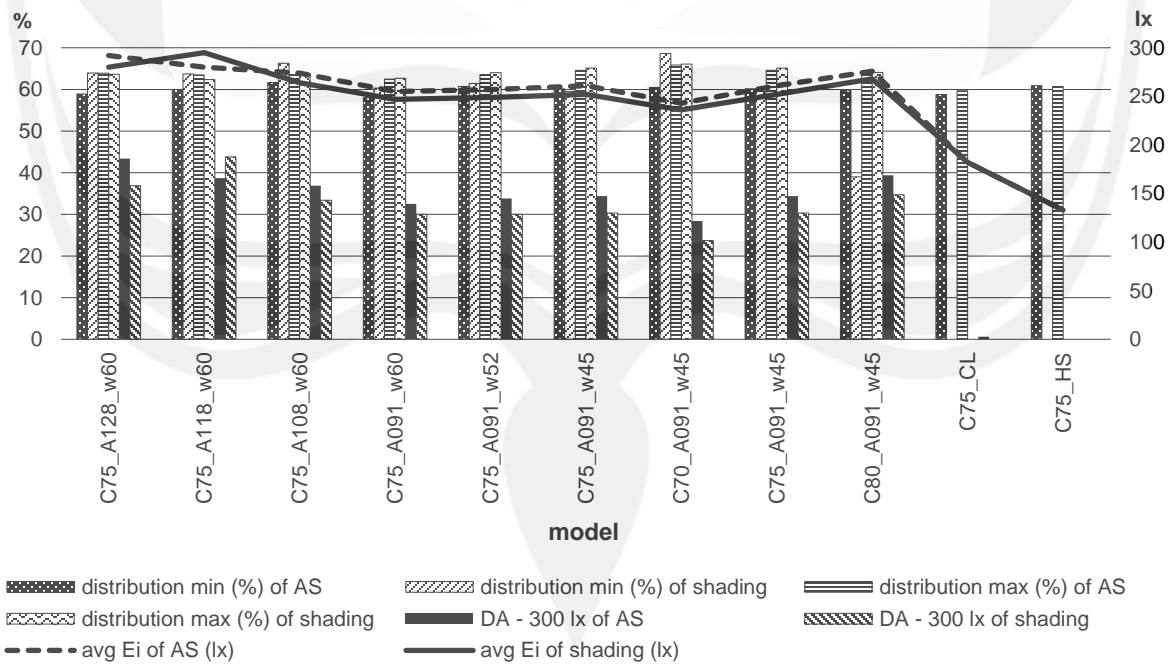
**Gambar IV-1.** Faktor cahaya alami (DF) hasil simulasi Radiance



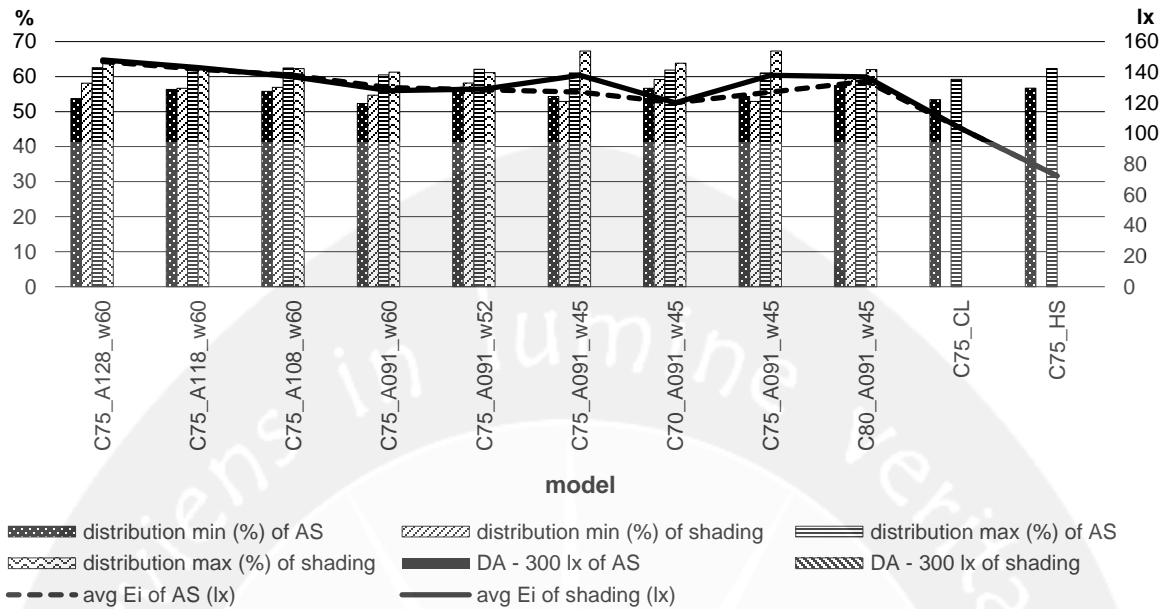
**Gambar IV-2.** Tingkat terang hasil simulasi Radiance dari beberapa model dengan arah bukaan ke Timur pada kondisi *intermediate sky with sun* 1 April pkl. 11.00 di Singapura.



**Gambar IV-3.** Tingkat terang hasil simulasi Radiance dari beberapa model dengan arah bukaan ke Timur pada kondisi *intermediate sky with sun* 16 Oktober pkl. 11.00 di Yogyakarta.

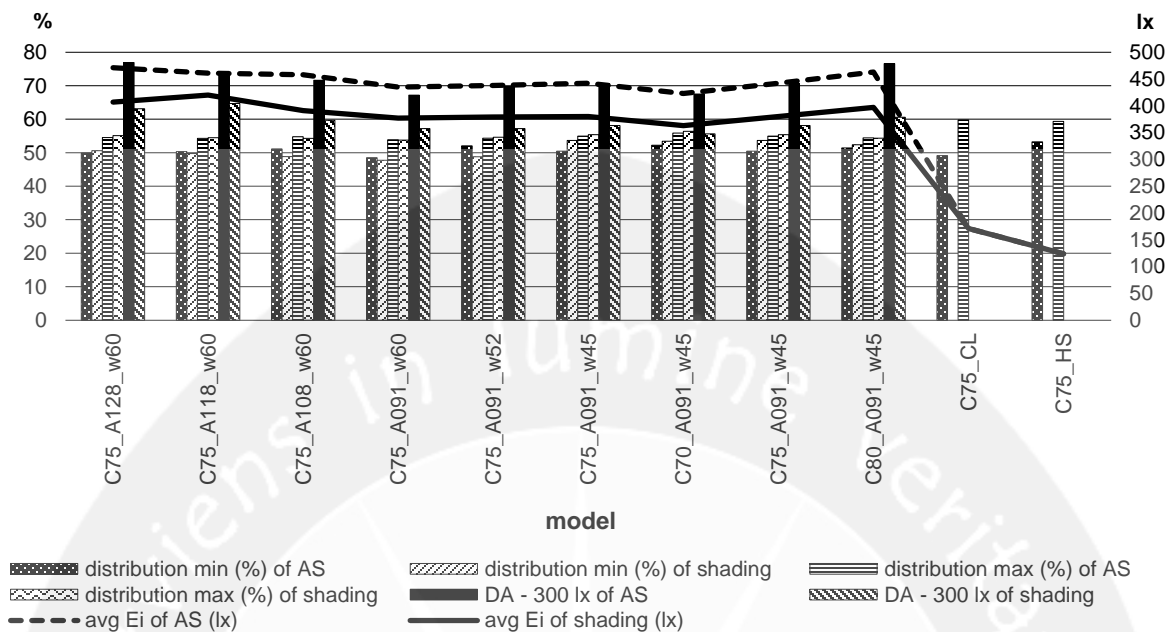


**Gambar IV-4.** Tingkat terang hasil simulasi Radiance dari beberapa model dengan arah bukaan ke Timur pada kondisi *intermediate sky with sun* 21 Desember pkl. 16.00 di Singapura.

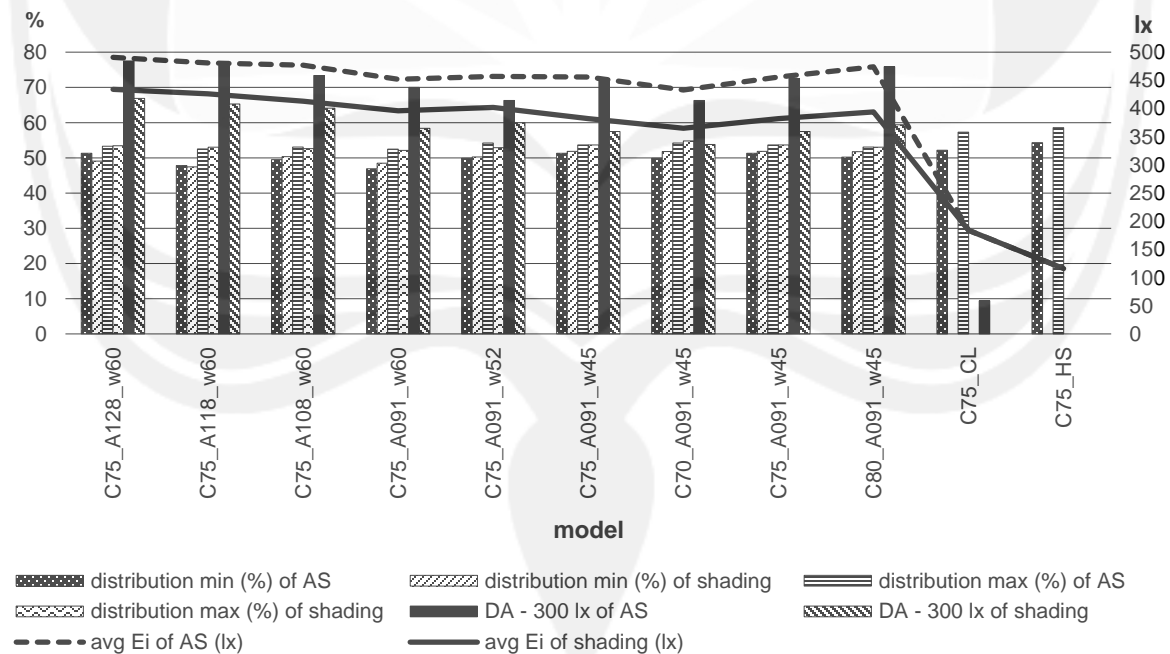


**Gambar IV-5.** Tingkat terang hasil simulasi Radiance dari beberapa model dengan arah bukaan ke Timur pada kondisi *intermediate sky with sun* 21 Juni pkl. 16.00 di Yogyakarta.

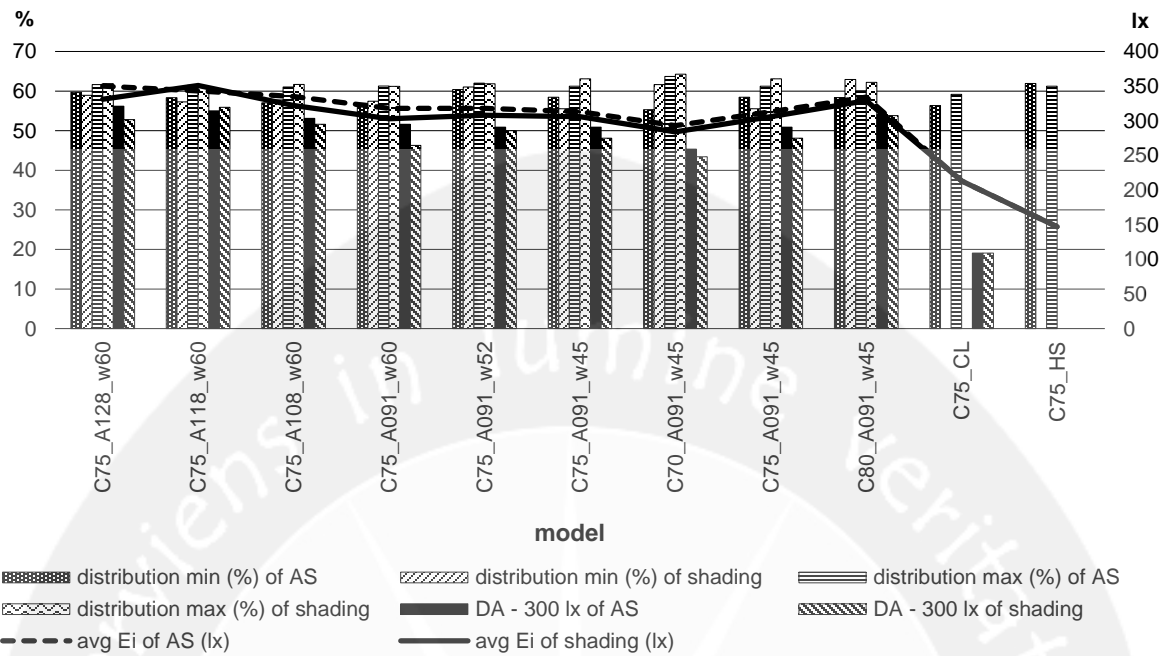
Secara umum pola kinerja pencahayaan alami dari AS dan sistem peneduh baru di Singapura dan di Yogyakarta hampir sama. Perbedaan lokasi (antara Singapura dan Yogyakarta) menciptakan perbedaan tingkat DA pada kolektor yang menghadap ke Timur saat matahari berada di zenith dan terutama di titik terjauh dari kolektor. Pada saat matahari berada di zenith aplikasi AS dan sistem peneduh baru di Singapura mampu mencapai DA hingga hampir 100% (dicapai oleh tipe C75\_A128\_w60), sedangkan aplikasi AS di Yogyakarta hanya mencapai DA hingga 80% (tipe kolektor yang sama). Aplikasi sistem peneduh baru di Yogyakarta bahkan hanya mencapai DA maksimum < 65%. Saat matahari berada di titik terjauh dari kolektor aplikasi AS di Singapura mampu mencapai DA hingga 43% dan capaian DA aplikasi sistem peneduh baru sedikit di bawahnya. Sementara di Yogyakarta pada kondisi langit yang hampir sama DA aplikasi AS dan sistem peneduh baru hampir mendekati 0%. Tingkat capaian distribusi Ei pada kedua lokasi mirip (< 60%), kecuali pada saat matahari berada di titik terjauh dari kolektor aplikasi AS dan sistem peneduh baru di Singapura yang mampu mencapai > 60%.



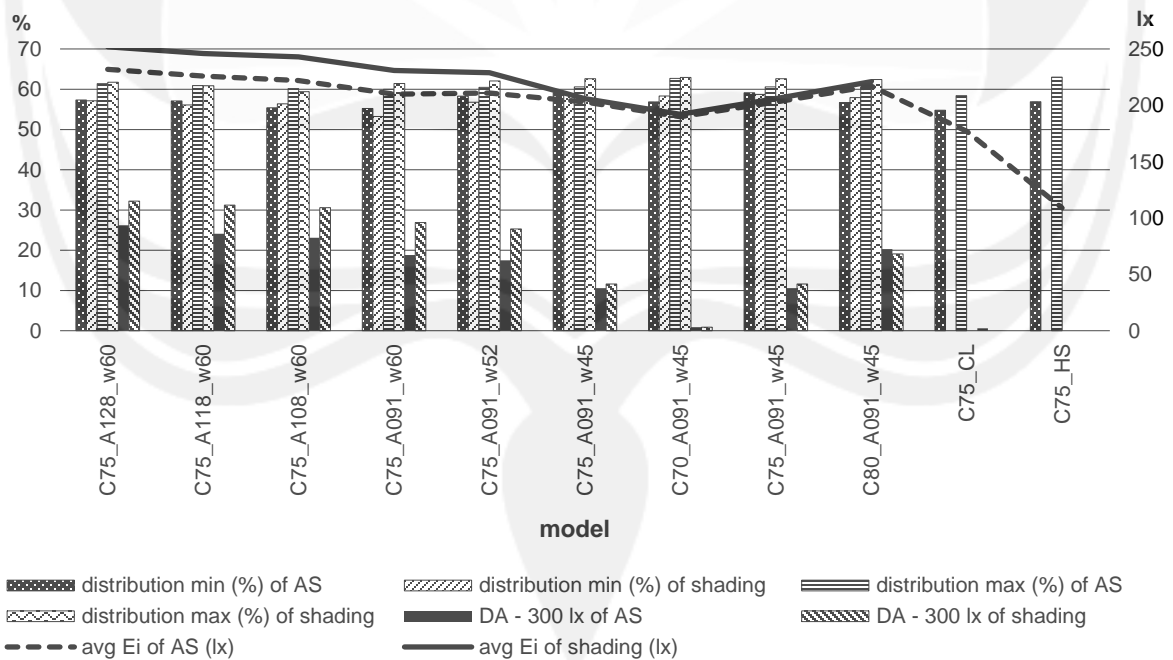
**Gambar IV-6.** Tingkat terang hasil simulasi Radiance dari beberapa model dengan arah bukaan ke Selatan pada kondisi *intermediate sky with sun* 21 Maret pkl. 12.00 di Singapura.



**Gambar IV-7.** Tingkat terang hasil simulasi Radiance dari beberapa model dengan arah bukaan ke Utara pada kondisi *intermediate sky with sun* 21 September pkl. 12.00 di Yogyakarta.



**Gambar IV-8.** Tingkat terang hasil simulasi Radiance dari beberapa model dengan arah bukaan ke Selatan pada kondisi *intermediate sky with sun* 21 Juni pkl. 16.00 di Singapura.



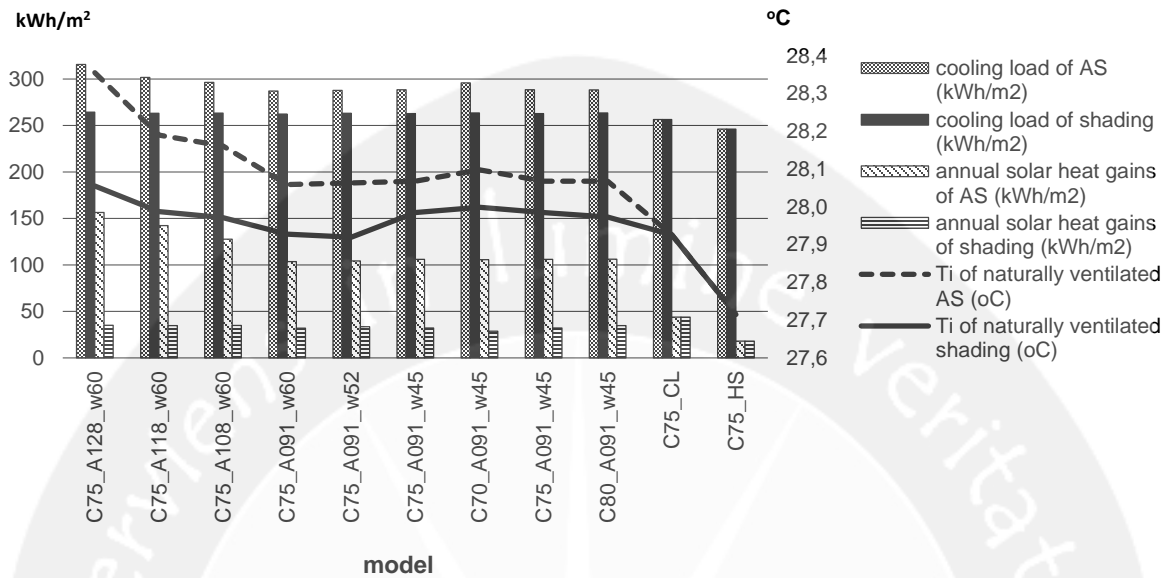
**Gambar IV-9.** Tingkat terang hasil simulasi Radiance dari beberapa model dengan arah bukaan ke Utara pada kondisi *intermediate sky with sun* 21 Desember pkl. 16.00 di Yogyakarta.

Untuk kolektor dengan arah hadap ke katulistiwa perbedaan lokasi menciptakan perbedaan tingkat capaian DA saat matahari berada di titik terjauh dari kolektor. Aplikasi AS dan sistem peneduh baru di Singapura mampu mencapai DA hingga mendekati 60%, sementara di Yogyakarta capaian DA aplikasi AS dan sistem peneduh baru < 35%. Pada arah hadap ini secara umum aplikasi AS dan sistem peneduh baru di Yogyakarta menghasilkan Ei rata-rata yang lebih tinggi daripada Ei rata-rata aplikasi di Singapura.

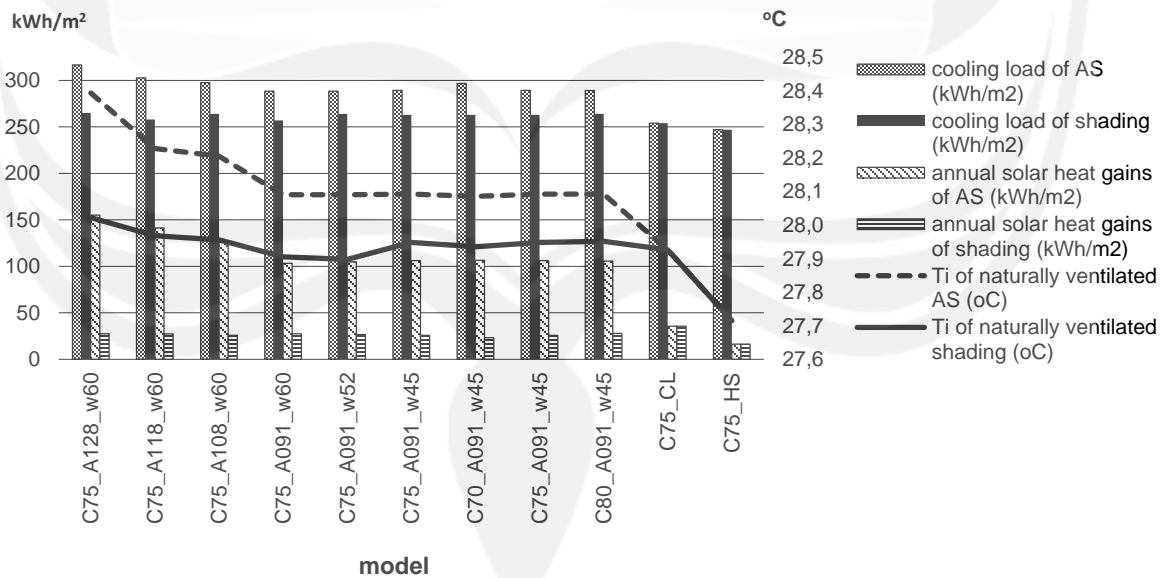
Dari aspek *Daylight Autonomy* (DA-2%) pada kondisi *overcast sky* (DF) secara umum AS sedikit lebih baik daripada sistem peneduh dengan kisaran nilai 60% - 70%. Hanya pada model *clerestory* dengan tinggi 80 cm (C80\_A091\_w45) saja yang menciptakan DA-2% yang sedikit lebih tinggi. Sedangkan pada kondisi *intermediate sky with sun*, justru beberapa model sistem peneduh dengan arah bukaan ke Utara mampu menciptakan DA-300 lx yang lebih tinggi pada 21 Desember pkl. 16.00 di Yogyakarta. Perbedaan yang signifikan (hingga 50 lx - 100 lx) terjadi pada saat matahari ada di zenith pada kondisi *intermediate sky with sun* (arah ke Timur pada 16 Oktober pkl. 11.00 dan ke Utara pada 21 September pkl. 12.00 di Yogyakarta dan arah ke Selatan pada 21 Maret pkl. 12.00 di Singapura). Tampaknya sistem peneduh baru lebih efektif untuk cahaya difus, sedangkan AS menjadi efektif untuk cahaya langsung.

Secara umum sistem peneduh baru mampu sedikit memperbaiki distribusi tingkat terang secara horisontal yang dihasilkan oleh AS, meskipun belum ada yang mencapai 70%. Tingkat distribusi cahaya secara horisontal ini lebih buruk dibandingkan dengan tingkat distribusi cahaya secara horisontal yang dihasilkan oleh bukaan cahaya dengan teritisan. Pada kondisi *overcast sky* tingkat distribusi cahaya secara horisontal (minimum) bukaan cahaya dengan teritisan mampu mencapai 75%. Akan tetapi, kinerja pencahayaan alami dari segi DF dan Ei rata-rata, maupun DA bukaan cahaya dengan teritisan sangat rendah. Perbedaan DF hingga 1,5% dan Ei hingga 400 lx, sedangkan selisih DA-2% hingga 70% dan DA-300 lx hingga 60%. Teritisan tidak mampu menciptakan ruangan yang cerah yang berkontribusi besar pada peningkatan kinerja, produktivitas dan menjaga kesehatan pengguna ruangan. Secara umum kinerja pencahayaan alami AS yang paling unggul dan diikuti dengan sistem peneduh baru.

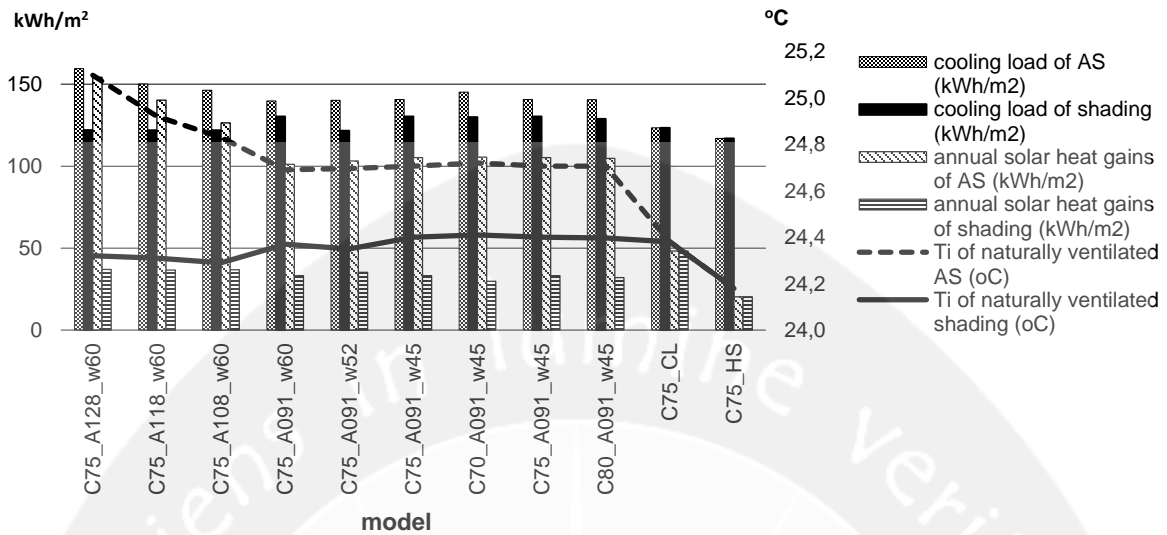
## IV.2.2 Solar Heat Gain dan Suhu Udara Ruangan



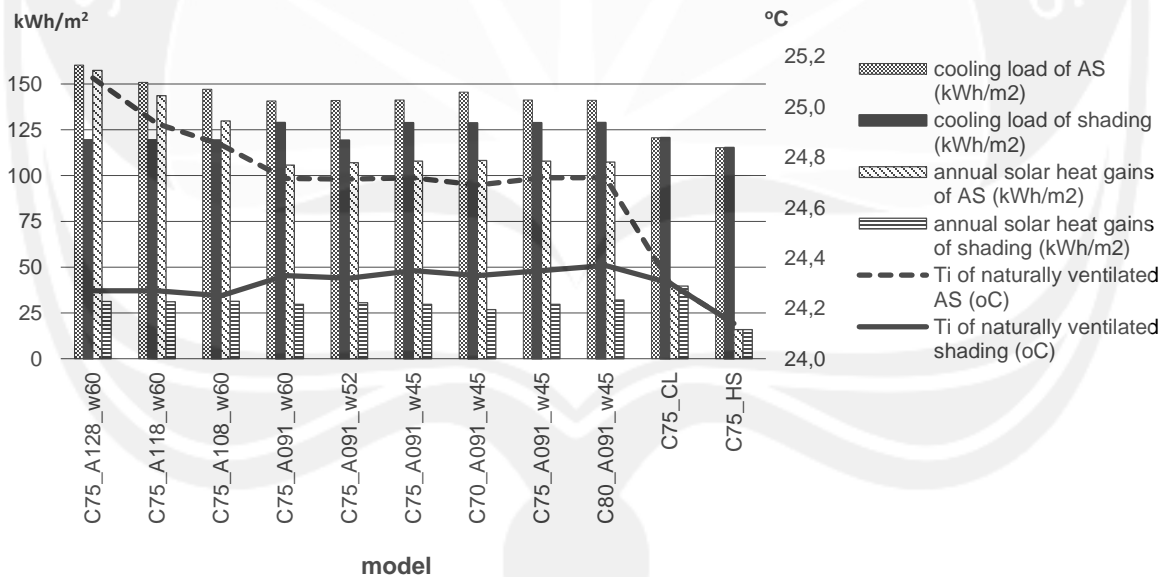
**Gambar IV-10.** Beban penyejukan (*cooling load*) dan *Solar Heat Gain* dalam 1 tahun (kWh/m<sup>2</sup>), serta rata-rata suhu udara di dalam ruangan (°C) hasil simulasi EnergyPlus beberapa model kolektor dan bukaan cahaya yang menghadap ke Timur di Singapura.



**Gambar IV-11.** Beban penyejukan (*cooling load*) dan *Solar Heat Gain* dalam 1 tahun (kWh/m<sup>2</sup>), serta rata-rata suhu udara di dalam ruangan (°C) hasil simulasi EnergyPlus beberapa model kolektor dan bukaan cahaya yang menghadap ke Selatan di Singapura.



**Gambar IV-12:** Beban penyejukan (*cooling load*) dan *Solar Heat Gain* dalam 1 tahun (kWh/m<sup>2</sup>), serta rata-rata suhu udara di dalam ruangan (°C) hasil simulasi EnergyPlus beberapa model kolektor dan bukaan cahaya yang menghadap ke Timur di Yogyakarta.



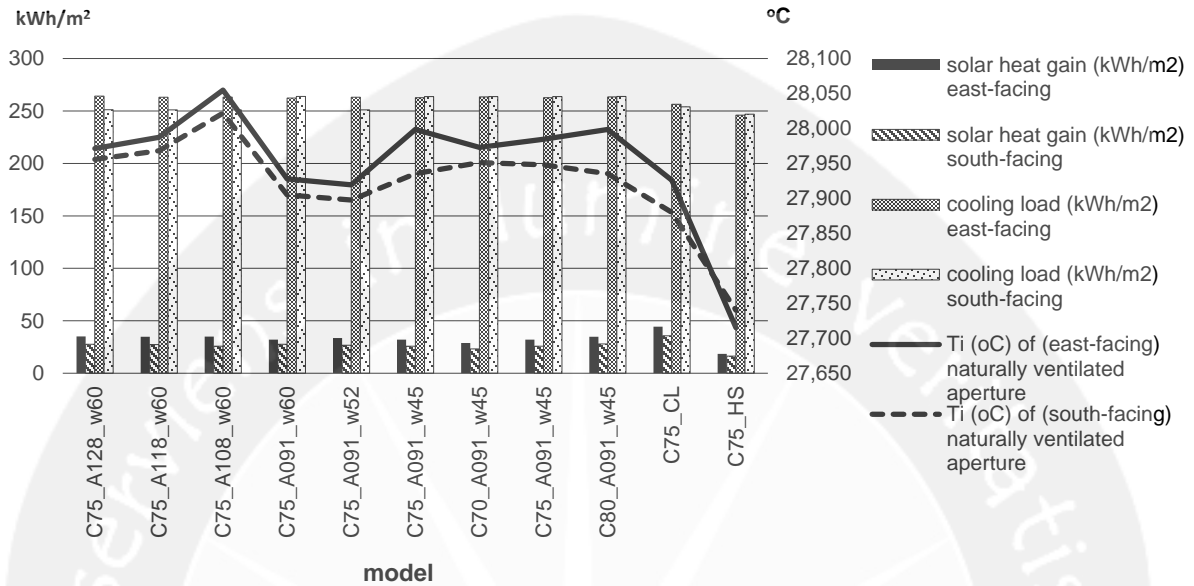
**Gambar IV-13:** Beban penyejukan (*cooling load*) dan *Solar Heat Gain* dalam 1 tahun (kWh/m<sup>2</sup>), serta rata-rata suhu udara di dalam ruangan (°C) hasil simulasi EnergyPlus beberapa model kolektor dan bukaan cahaya yang menghadap ke Utara di Yogyakarta.

Simulasi EnergyPlus pada beberapa model dengan variasi (i) lebar kolektor, (ii) sudut sebaran cahaya kolektor dan (iii) tinggi bukaan cahaya (Gambar IV-10, Gambar IV-11, Gambar IV-12 dan Gambar IV-13) menunjukkan beberapa indikasi:

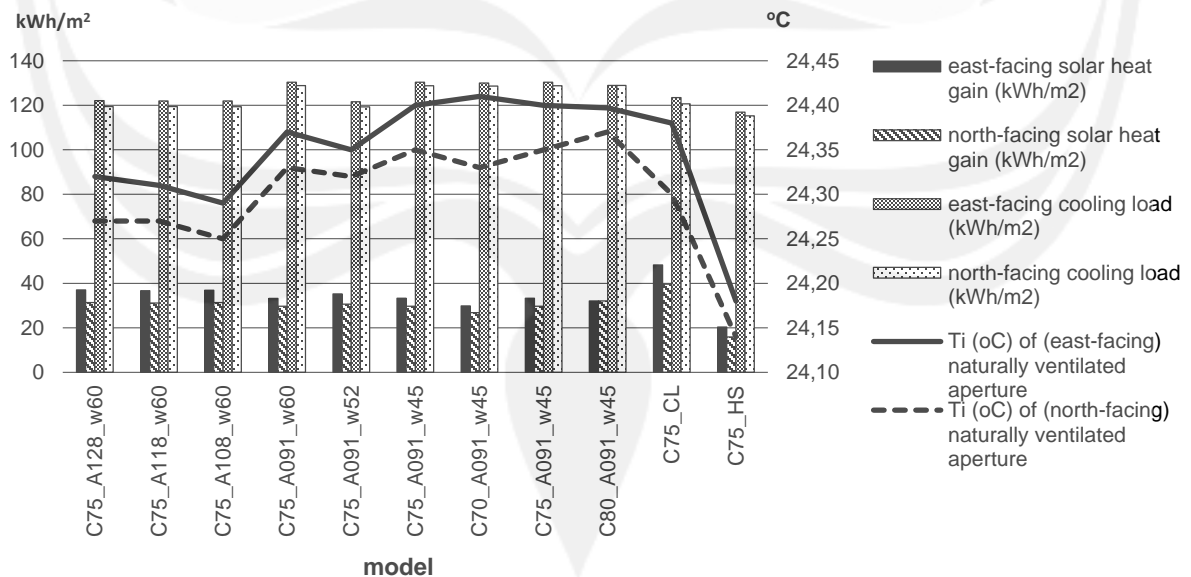
- Penambahan lebar kolektor akan meningkatkan *solar heat gain* secara signifikan.
- Akan tetapi rata-rata suhu udara di dalam ruangan tidak semata-mata ditentukan oleh *solar heat gain* (penambahan lebar kolektor).
- Peningkatan sudut sebaran cahaya kolektor cenderung tidak menurunkan *solar heat gain* dan rata-rata suhu udara di dalam ruangan secara signifikan.
- Peningkatan tinggi bukaan cahaya (*clerestory*) menunjukkan peningkatan *solar heat gain* dan rata-rata suhu udara di dalam ruangan.
- Modifikasi kolektor pada sistem peneduh baru tidak memodifikasi *solar heat gain*, beban penyejukan tahunan maupun rata-rata suhu udara di dalam ruangan secara signifikan.
- Desain kolektor parabolik yang tepat akan menciptakan suhu udara ruangan yang lebih rendah (C75\_A091\_w52 di Singapura dan C75\_A108\_w60 di Yogyakarta) dibandingkan *clerestory* saja, tetapi tetap lebih tinggi dibandingkan teritisan miring 30°.
- Meskipun sistem peneduh baru mampu menghasilkan *solar heat gain* yang lebih rendah daripada *clerestory*, tetapi beban penyejukannya relatif masih tinggi.

Jika dibandingkan dengan hasil simulasi ruang dengan bukaan cahaya konvensional (Gambar IV-12), model sistem peneduh baru dengan desain kolektor tertentu mampu menurunkan *solar heat gain* dalam 1 tahun hingga 12,5 kWh/m<sup>2</sup> untuk bukaan cahaya konvensional. Sistem peneduh baru mampu menurunkan *solar heat gain* dalam 1 tahun hingga sekitar 75 kWh/m<sup>2</sup> dibandingkan dengan *solar heat gain* dalam 1 tahun yang dihasilkan oleh AS. Akan tetapi model dengan sistem peneduh baru menghasilkan rata-rata suhu di dalam ruang yang lebih tinggi daripada ruangan dengan *fenestration* konvensional yang disebutkan di atas, meskipun perbedaannya hanya 0,02 K untuk bukaan cahaya konvensional dan 0,23 K untuk bukaan cahaya yang dilengkapi dengan teritisan miring 30°. Perpindahan panas secara konvektif kemungkinan berpengaruh besar dalam menentukan rata-rata suhu udara di dalam ruangan. Meskipun *solar heat gain* pada sistem peneduh baru lebih rendah daripada bukaan cahaya konvensional, Gambar IV-14 menunjukkan beban penyejukan sistem peneduh baru

sedikit lebih tinggi daripada beban penyejukan bukaan cahaya konvensional dan yang dilengkapi dengan teritisan, terutama sistem peneduh baru yang menghadap ke Timur.



**Gambar IV-14:** Solar Heat Gain dalam 1 tahun (kWh/m<sup>2</sup>), beban penyejukan dalam 1 tahun (kWh/m<sup>2</sup>) dan rata-rata suhu udara di dalam ruangan (°C) hasil simulasi EnergyPlus beberapa model sistem peneduh dan bukaan cahaya di Singapura.



**Gambar IV-15:** Solar Heat Gain dalam 1 tahun (kWh/m<sup>2</sup>), beban penyejukan dalam 1 tahun (kWh/m<sup>2</sup>) dan rata-rata suhu udara di dalam ruangan (°C) hasil simulasi EnergyPlus beberapa model sistem peneduh dan bukaan cahaya di Yogyakarta.

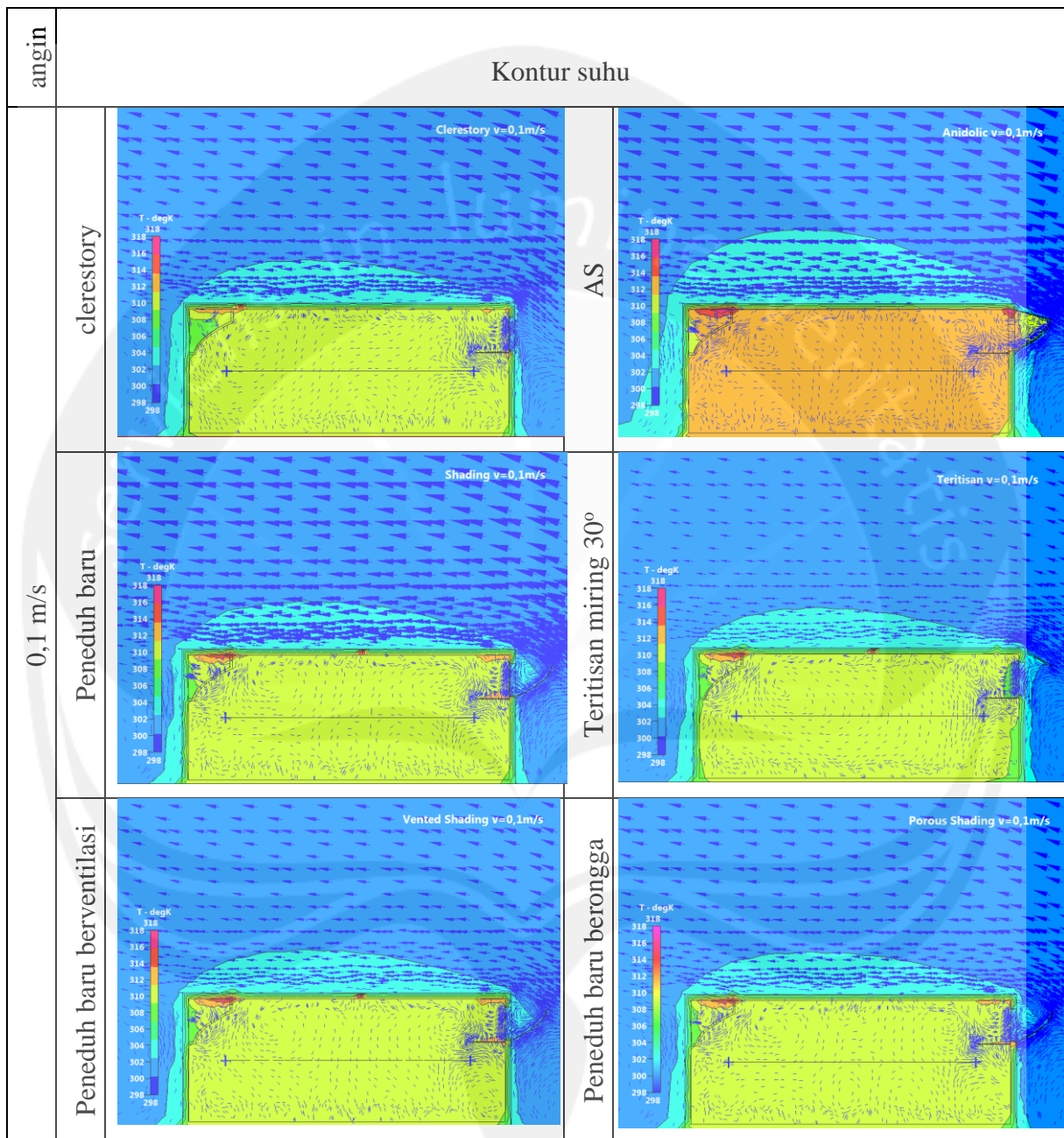
Hasil simulasi beban penyejukan menunjukkan sistem peneduh baru mampu menurunkan beban penyejukan yang dihasilkan oleh ruang dengan AS (Gambar IV-10 hingga IV-15). Akan tetapi selisih beban penyejukan ini tidak sebesar selisih *solar heat gain*-nya. Ada kemungkinan sistem peneduh membuat perangkap bagi udara panas di antara sistem peneduh dan kaca pada *clerestory*. Diperlukan kajian lebih rinci terkait dengan kemungkinan kontribusi perpindahan panas secara konvektif.

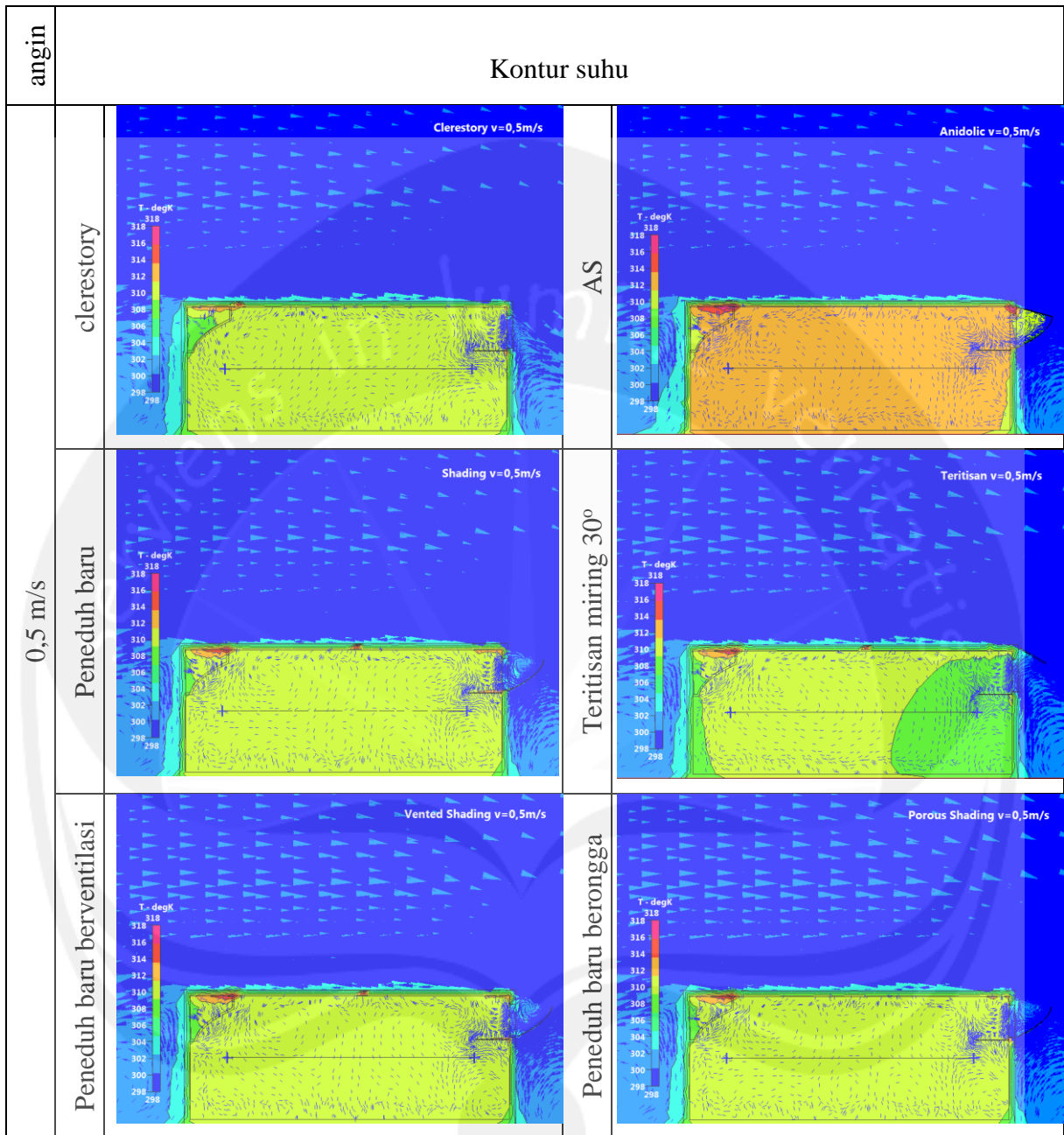
#### IV.2.3 Optimasi

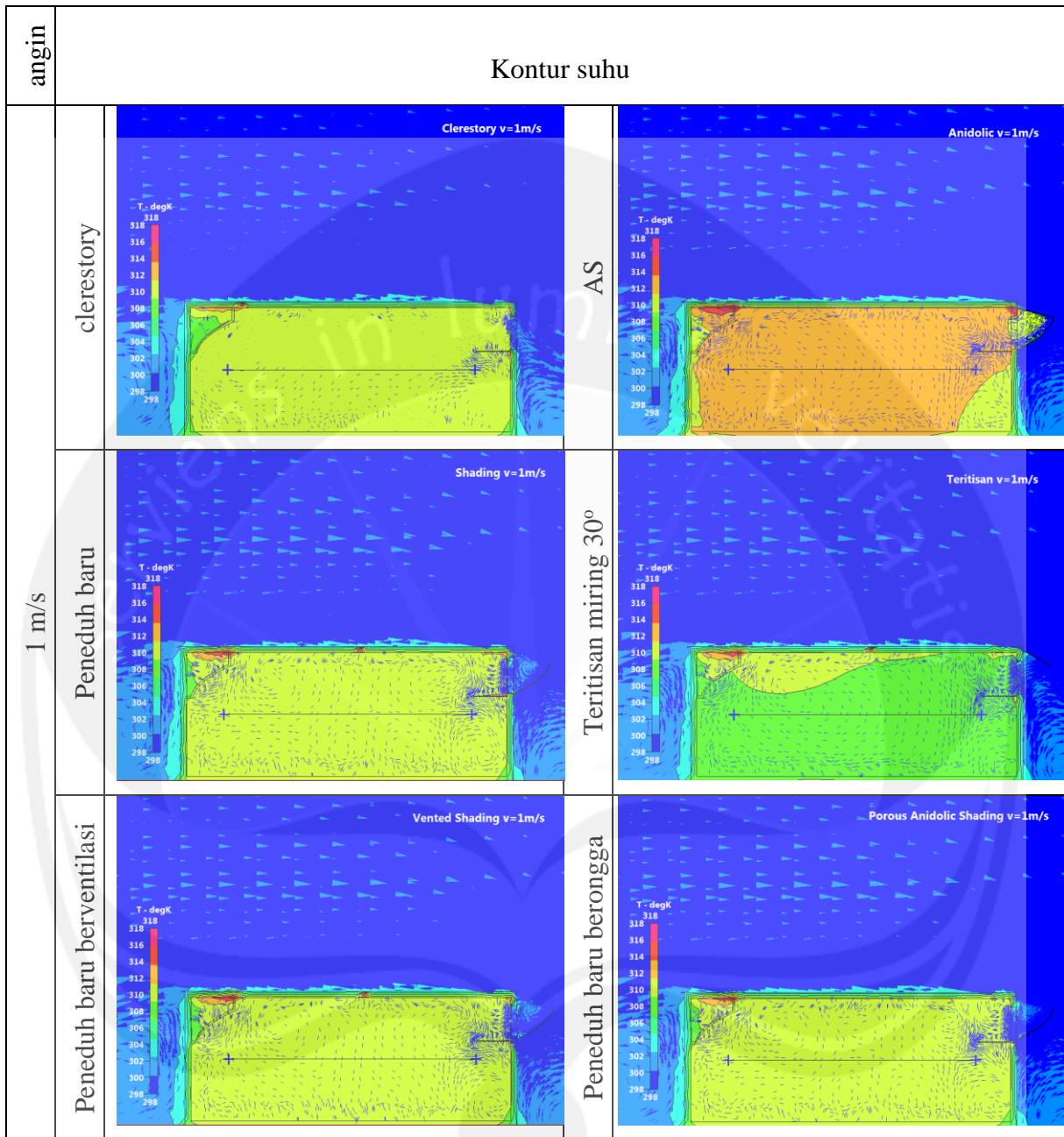
Sebagaimana simulasi pencahayaan alami pada AS, pada sistem peneduh kondisi optimal (tingkat terang/faktor cahaya alami yang cukup dengan distribusi relatif merata) dicapai oleh kombinasi antara kolektor dengan lebar 91 cm dengan sudut pancaran medium ( $45^\circ$ ) dan *clerestory* yang maksimal (80 cm). Selanjutnya untuk memperbaiki kinerja termal, khususnya untuk memperbaiki perpindahan panas secara konvektif, sistem peneduh dilakukan penambahan ventilasi. Eksperimen berikutnya dilakukan kajian termal dampak dari 2 variasi ventilasi pada model sistem peneduh. Variasi I dengan menambahkan ventilasi pada bagian bawah sistem peneduh sehingga panel yang melengkung pada kolektor parabolik membentuk celah dengan ukuran tertentu (Gambar pada draft paten). Variasi II sama dengan variasi I dengan penambahan ventilasi pada panel yang melengkung (Gambar pada draft paten). Untuk mendapatkan hasil yang rinci pada setiap bagian ruang dan komponennya, dilakukan simulasi Computational Fluid Dynamic (CFD). Kinerja perbaikan sistem peneduh dikomparasikan dengan kinerja *clerestory* saja, *clerestory* dengan teritisan  $30^\circ$ , dan AS.

Gambar-gambar pada Tabel IV-2 menunjukkan kinerja termal ruangan dengan peneduh baru (tanpa ventilasi dan dengan ventilasi) yang mirip dengan kinerja termal ruangan dengan *clerestory* saja maupun dengan teritisan miring  $30^\circ$  pada saat kecepatan angin rendah (0,1 m/s). Namun, ketika kecepatan angin meningkat kinerja termal ruangan dengan peneduh baru belum sebaik kinerja termal ruangan dengan teritisan miring  $30^\circ$  meskipun sudah ditambahkan ventilasi. Keberadaan ventilasi sedikit menurunkan suhu udara ruangan. Sistem peneduh yang porous (ventilasi pada badan kolektor) menghasilkan suhu udara ruangan yang sedikit lebih rendah daripada sistem peneduh dengan ventilasi di bawah.

**Tabel IV-2.** Kontur suhu dan kecepatan aliran udara beberapa model dengan variasi 3 kondisi kecepatan angin di Yogyakarta.







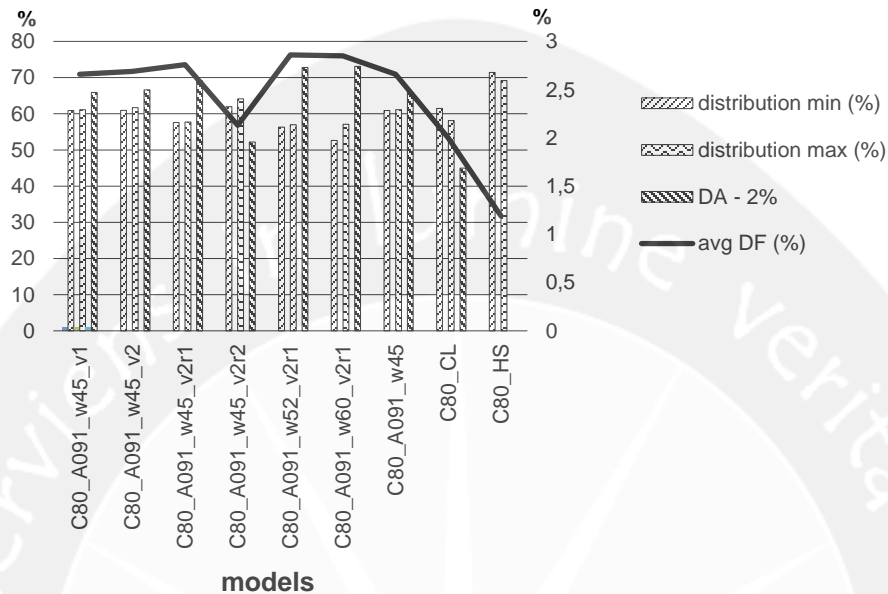
Hasil simulasi Radiance menunjukkan penambahan ventilasi pada sisi bawah (C80\_A091\_w45\_v1) tidak mengubah nilai DF, distribusi DF dan persentase nilai  $DF \geq 2\%$  (Gambar IV-16). Sedikit peningkatan pada distribusi tingkat terang minimum sebesar 2,5% pada kondisi langit sedang dengan sinar matahari 1 April pkl. 11:00 di Singapura untuk kolektor yang menghadap ke Timur. Sedangkan, penambahan ventilasi bawah dan pada badan

kolektor (C80\_A091\_w45\_v2) justru mampu meningkatkan nilai DF (0,03%), distribusi DF (0,1% dan 0,5%) dan persentase nilai DF  $\geq 2\%$  sebesar 0,7% (Gambar IV-16), maupun tingkat terang rata-rata (8 lx), persentase tingkat terang  $> 300$  lx (0,3%) serta distribusinya (1,7% dan 0,1%) pada kondisi langit sedang dengan sinar matahari 1 April pkl. 11:00 di Singapura untuk kolektor yang menghadap ke Timur. Akan tetapi, pada kondisi langit sedang dengan sinar matahari 16 Oktober pkl. 11:00 untuk kolektor yang menghadap ke Timur di Yogyakarta penambahan ventilasi bawah dan pada badan kolektor justru sedikit menurunkan tingkat terang rata-rata (2,6 lx) serta distribusi tingkat terang minimumnya (1%) (Gambar IV-18).

Dapat disimpulkan penambahan ventilasi bawah dan pada badan kolektor diperlukan terutama untuk memperbaiki kinerja termal sistem peneduh baru. Selanjutnya diperlukan perbaikan kinerja termal yang lebih signifikan agar peneduh baru minimal memiliki kinerja termal yang sama dengan teritisan miring  $30^\circ$  dengan kinerja pencahayaan alami yang masih tinggi. Untuk itu dilakukan modifikasi penempatan bidang kaca yang bertujuan meningkatkan efek pembayangan melalui 2 cara. Cara I dengan membuat bidang kaca menjorok ke dalam ruangan (C80\_A091\_w45\_v2r1). Gambar model disajikan pada draft paten. Cara II dengan menambah elemen peneduh horisontal dan vertikal pada bidang kaca (C80\_A091\_w45\_v2r2). Perbaikan model (r1) juga diterapkan pada model kolektor dengan sudut sebaran cahaya  $52^\circ$  dan  $60^\circ$ .

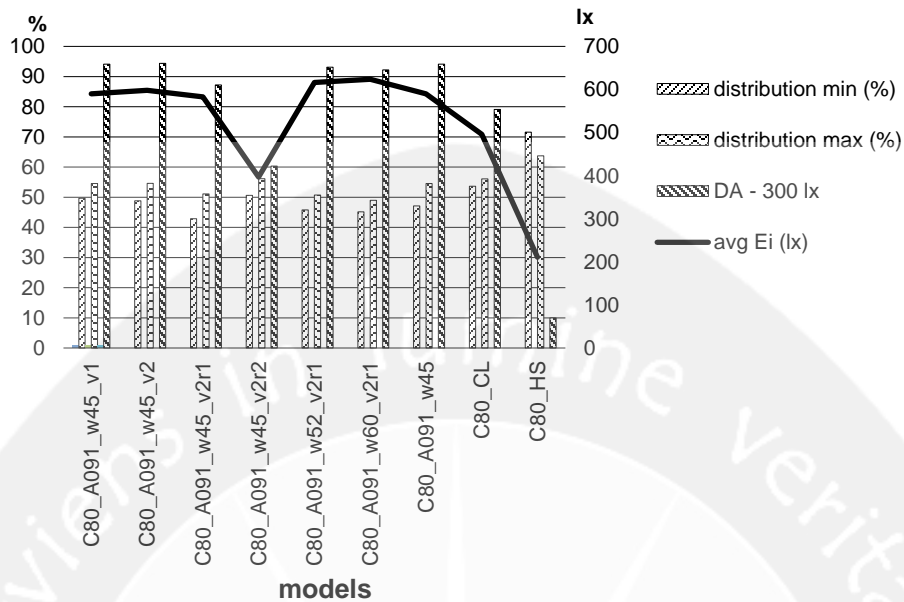
Modifikasi pada bidang kaca sedikit meningkatkan nilai DF rata-rata (0,1%) dan persentase DF  $> 2\%$  sebesar 3,2% untuk model C80\_A091\_w45\_v2r1, tetapi menurunkan nilai DF rata-rata yang cukup besar untuk model C80\_A091\_w45\_v2r2 sebesar 0,53%, meskipun distribusi DF-nya hanya mengalami sedikit penurunan (Gambar IV-16). Hasil simulasi pada kondisi langit sedang dengan sinar matahari pada 1 April pkl. 11:00 untuk kolektor yang menghadap ke Timur di Singapura pada Gambar IV-17 menunjukkan sedikit penurunan kinerja pencahayaan alami pada model C80\_A091\_w45\_v2r1 baik pada tingkat terang rata-rata (7 lx) dan persentase tingkat terang  $> 300$  lx (6,9 %) maupun distribusinya (4,2% dan 3,4%). Hal ini dapat dipahami karena bidang pantulan cahaya matahari yang ada di zenith berkurang luasannya. Sementara pada model C80\_A091\_w45\_v2r2 justru terjadi sedikit

peningkatan pada distribusi tingkat terang (3,5% dan 1,6%), tetapi pada tingkat terang rata-rata (193 lx) dan persentase tingkat terang > 300 lx terjadi penurunan cukup signifikan (33,8%).

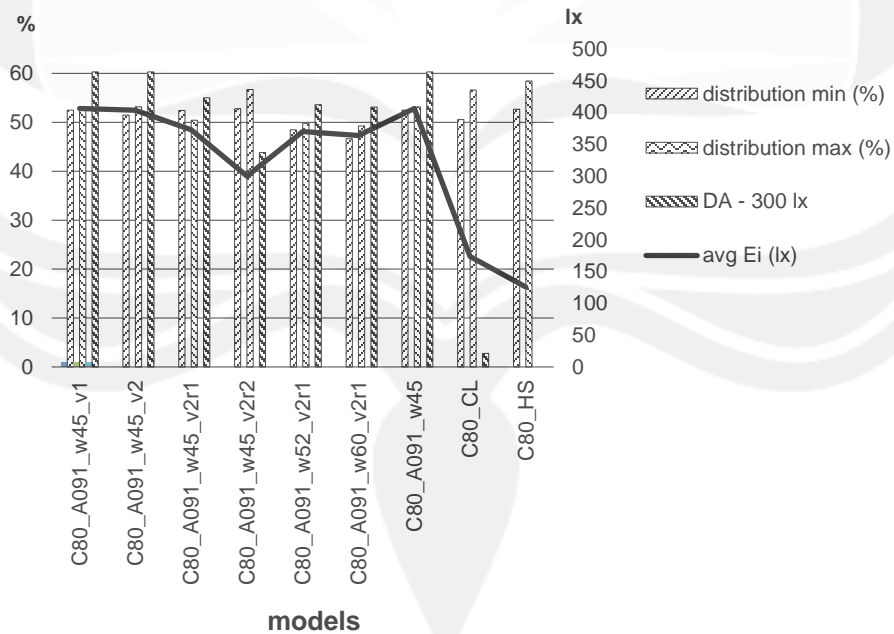


**Gambar IV-16.** DF beberapa model model-model revisi dengan variasi sudut sebaran kolektor parabolik yang dikomparasikan dengan model tanpa ventilasi, model dasar (*clerestory* saja), dan model teritisan miring 30°.

Hal yang sama terjadi pada hasil simulasi pada kondisi langit sedang dengan sinar matahari pada 16 Oktober pkl. 11:00 untuk kolektor yang menghadap ke Timur di Yogyakarta pada Gambar IV-18 menunjukkan sedikit penurunan kinerja pencahayaan alami pada model C80\_A091\_w45\_v2r1 baik pada tingkat terang rata-rata (33 lx) dan persentase tingkat terang > 300 lx (5,3%) maupun distribusinya (0,1% dan 2,7%). Hal ini dapat dipahami karena bidang pantulan cahaya matahari yang ada di zenith berkurang luasannya. Sementara pada model C80\_A091\_w45\_v2r2 justru terjadi sedikit peningkatan pada distribusi tingkat terang (0,3% dan 3,6%), tetapi pada tingkat terang rata-rata (106,2 lx) dan persentase tingkat terang > 300 lx terjadi penurunan cukup signifikan (16,5%). Secara umum dapat disimpulkan bahwa revisi posisi clerestory yang masuk ke dalam (r1) memungkinkan peningkatan penetrasi cahaya alami secara difus, tetapi menurunkan penetrasi cahaya alami langsung.



**Gambar IV-17.** Tingkat terang beberapa model model-model revisi dengan variasi sudut sebaran kolektor parabolik yang dikomparasikan dengan model tanpa ventilasi, model dasar (*clerestory* saja), dan model teritisan miring 30° untuk kondisi langit sedang dengan sinar matahari pada 1 April pkl. 11:00 yang menghadap ke Timur di Singapura.



**Gambar IV-18.** Tingkat terang beberapa model model-model revisi dengan variasi sudut sebaran kolektor parabolik yang dikomparasikan dengan model tanpa ventilasi, model dasar (*clerestory* saja), dan model teritisan miring 30° untuk kondisi langit sedang dengan sinar matahari pada 16 Oktober pkl. 11:00 yang menghadap ke Timur di Yogyakarta.

Penambahan ventilasi dan perbaikan posisi clerestory yang dilakukan pada kolektor dengan sudut sebaran  $52^\circ$  mampu meningkatkan DF rata-rata sebesar 0,2% dan persentase nilai  $DF \geq 2\%$  sebesar 6,9%. Akan tetapi, distribusi DF mengalami penurunan sebesar 4,6% dan 4,2% (Gambar IV-16). Pada kondisi langit sedang dengan sinar matahari pada 16 Oktober pkl. 11:00 untuk kolektor yang menghadap ke Timur di Yogyakarta pada Gambar IV-18 model ini menyebabkan penurunan pada tingkat terang rata-rata (36,1 lx), persentase tingkat terang > 300 lx (6,7%) serta distribusi tingkat terang (4% dan 3,3%). Sementara, pada kondisi langit sedang dengan sinar matahari pada 1 April pkl. 11:00 untuk kolektor yang menghadap ke Timur di Singapura model dengan sudut sebaran  $52^\circ$  hanya mampu meningkatkan tingkat terang rata-rata sebesar 26 lx. Persentase tingkat terang > 300 lx serta distribusi tingkat terang mengalami penurunan masing-masing sebesar 1%, 1,3% dan 3,8% (Gambar IV-17).

Penambahan ventilasi dan perbaikan posisi clerestory yang dilakukan pada kolektor dengan sudut sebaran  $60^\circ$  mampu meningkatkan DF rata-rata sebesar 0,19% dan persentase nilai  $DF \geq 2\%$  sebesar 7,2%. Akan tetapi, distribusi DF mengalami penurunan sebesar 8,3% dan 4% (Gambar IV-16). Pada kondisi langit sedang dengan sinar matahari pada 16 Oktober pkl. 11:00 untuk kolektor yang menghadap ke Timur di Yogyakarta pada Gambar IV-18 model ini menyebabkan penurunan pada tingkat terang rata-rata (42,4 lx), persentase tingkat terang > 300 lx (7,2%) serta distribusi tingkat terang (5,8% dan 3,9%). Sementara, pada kondisi langit sedang dengan sinar matahari pada 1 April pkl. 11:00 untuk kolektor yang menghadap ke Timur di Singapura model dengan sudut sebaran  $60^\circ$  mampu meningkatkan tingkat terang rata-rata sebesar 33,5 lx. Persentase tingkat terang > 300 lx serta distribusi tingkat terang mengalami penurunan masing-masing sebesar 1,9%, 2% dan 5,5% (Gambar IV-17).

Hasil simulasi yang lebih lengkap untuk model-model yang sudah diperbaiki ditampilkan Tabel IV-3, Tabel IV-4 dan Tabel IV-5. Secara umum perbedaan sudut sebaran cahaya kolektor dan perbaikan posisi clerestory tidak menghasilkan perubahan nilai yang sangat signifikan. DF rata-rata tertinggi dicapai oleh model C80\_A091\_w52\_v2r1 dan DA (persentase  $DF > 2\%$ ) tertinggi dicapai oleh model C80\_A091\_w60\_v2r1. Sedangkan distribusi DF terbaik dicapai oleh C80\_A091\_w45\_v2.

**Tabel IV-3.** Hasil simulasi pencahayaan alami model-model revisi dengan variasi sudut sebaran kolektor parabolik yang menghadap ke Timur di Singapura dengan Radiance-Ecotect.

models	DF - overcast sky				Ei - intermediate sky with sun, 1 April 11:00				Ei - intermediate sky with sun, 21 Dec 16:00			
	distribution	distribution	DA	avg DF	distributio	distributio	DA	avg Ei	distributio	distribution	DA	avg Ei
	min (%)	max (%)	2%	(%)	n min (%)	n max (%)	300 lx	(%)	n min (%)	max (%)	300 lx	(%)
C80_A091_w45_v2	61,0	61,7	66,6	2,69	48,8	54,6	94,4	598	68,01	64,02	35,3	267,6
C80_A091_w45_v2r1	57,6	57,7	69,1	2,76	42,9	51,1	87,2	583	65,83	59,13	37,2	275,0
C80_A091_w52_v2r1	57,0	57,0	72,8	2,86	46,4	50,7	93,1	616	65,51	57,73	36,6	271,7
C80_A091_w60_v2r1	55,8	57,0	73,1	2,85	45,2	50,0	92,2	624	58,06	57,45	35,0	268,7

**Tabel IV-4.** Hasil simulasi pencahayaan alami model-model revisi dengan variasi sudut sebaran kolektor parabolik yang menghadap ke Timur di Yogyakarta dengan Radiance-Ecotect.

models	DF - overcast sky				Ei - intermediate sky with sun, 16 Oct 11:00				Ei - intermediate sky with sun, 21 Jun 16:00			
	distribution	distribution	DA	avg DF	distributio	distributio	DA	avg Ei	distributio	distribution	DA	avg Ei
	min (%)	max (%)	2%	(%)	n min (%)	n max (%)	300 lx	(%)	n min (%)	max (%)	300 lx	(%)
C80_A091_w45_v2	61,0	61,7	66,6	2,69	51,5	53,2	60,3	404	62,26	63,51	38,4	279,4
C80_A091_w45_v2r1	57,6	57,7	69,1	2,76	52,4	50,4	55,0	373	61,11	58,63	38,1	277,8
C80_A091_w52_v2r1	57,0	57,0	72,8	2,86	48,5	49,8	53,6	370	55,57	57,86	36,3	277,1
C80_A091_w60_v2r1	55,8	57,0	73,1	2,85	46,6	49,3	53,1	364	54,46	56,80	35,9	270,9

**Tabel IV-5.** Hasil simulasi pencahayaan alami model-model revisi dengan variasi sudut sebaran kolektor parabolik yang menghadap ke Utara di Yogyakarta dengan Radiance-Ecotect.

models	DF - overcast sky				Ei - intermediate sky with sun, 21 September 12:00				Ei - intermediate sky with sun, 21 Dec 16:00			
	distribution	distribution	DA	avg DF	distributio	distributio	DA	avg Ei	distributio	distribution	DA	avg Ei
	min (%)	max (%)	2%	(%)	n min (%)	n max (%)	300 lx	(%)	n min (%)	max (%)	300 lx	(%)
C80_A091_w45_v2	61,0	61,7	66,6	2,69	51,5	53,3	59,4	392	58,9	61,8	19,7	220,8
C80_A091_w45_v2r1	57,6	57,7	69,1	2,76	51,9	50,9	56,6	374	56,0	58,3	21,9	225,0
C80_A091_w52_v2r1	57,0	57,0	72,8	2,86	47,8	50,3	54,1	372	57,7	56,8	25,0	234,0
C80_A091_w60_v2r1	55,8	57,0	73,1	2,85	44,6	50,1	54,1	372	55,3	55,7	25,6	235,0

Standar deviasi (SD) untuk setiap kondisi dan parameter serta model terbaik pada kondisi langit sedang dengan matahari ditampilkan pada Tabel IV-6. SD untuk rata-rata DF hanya 0,08 dan SD untuk parameter lain dalam % <5%. SD untuk tingkat terang rata-rata < 19 lx dengan SD tertinggi pada kondisi langit sedang pada model dengan kolektor menghadap ke Timur dengan matahari di Singapura, yang berarti < 3,2% dari tingkat terang rata-rata sebesar 600 lx.

Dapat disimpulkan perubahan posisi *clerestory* dan sudut sebaran cahaya kolektor tidak mengubah secara signifikan nilai-nilai parameter kinerja pencahayaan alami.

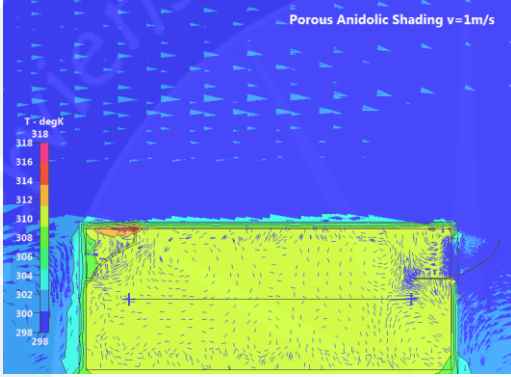
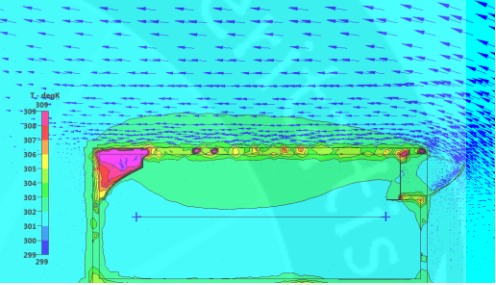
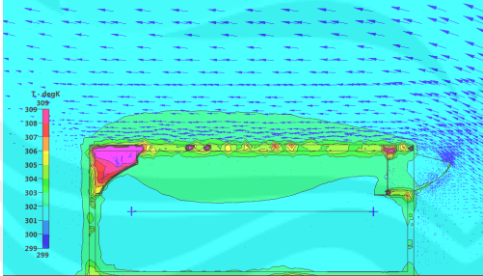
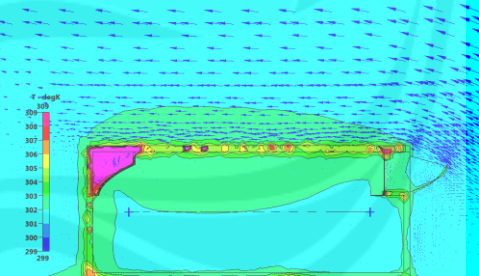
Tabel IV-6. Model terbaik untuk setiap parameter dan kondisi langit serta standar deviasinya (SD).

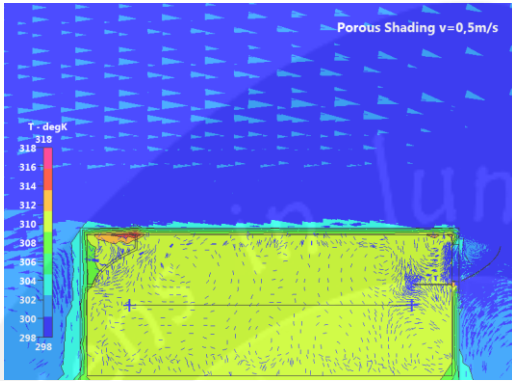
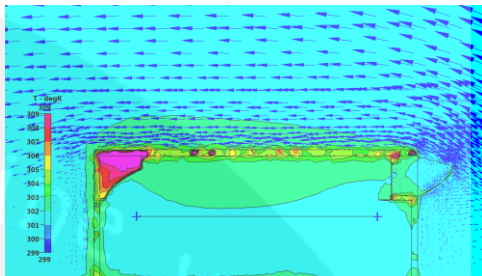
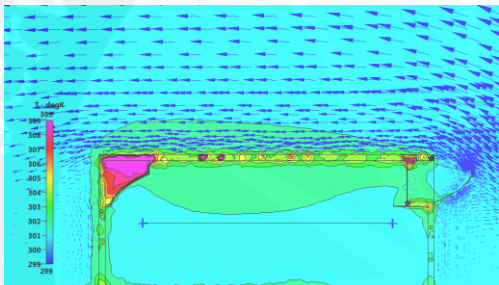
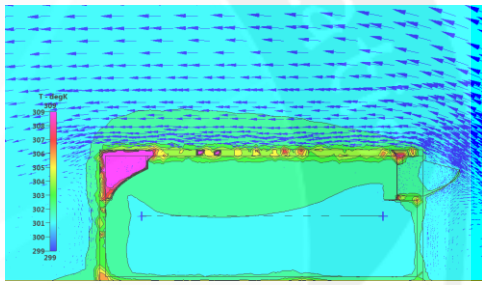
Arah hadap, lokasi, kondisi langit/waktu	Ei/DF	SD	DA	SD	Distr. min	SD	Distr. max	SD
Langit berawan	W52_v2r1	0,08	W60_v2r1	3,12	w45_v2	2,22	w45_v2	2,26
Timur, Singapura, langit sedang dengan matahari pada 1 April pkl. 11:00	W60_v2r1	18,24	w45_v2	3,15	w45_v2	2,48	w45_v2	2,06
Timur, Yogyakarta, langit sedang dengan matahari pada 16 Oktober pkl. 11:00	w45_v2	17,73	w45_v2	3,30	w45_v2	2,68	w45_v2	1,73
Utara, Yogyakarta, langit sedang dengan matahari pada 21 September pkl. 12:00	w45_v2	9,71	w45_v2	2,53	w45_v2	3,43	w45_v2	1,47
Timur, Singapura, langit sedang dengan matahari pada 21 Desember pkl. 16:00	w45_v2r1	3,30	w45_v2r1	1,05	w45_v2	4,34	w45_v2	3,05
Timur, Yogyakarta, langit sedang dengan matahari pada 21 Juni pkl. 16:00	w45_v2	3,71	w45_v2	1,26	w45_v2	3,91	w45_v2	2,97
Utara, Yogyakarta, langit sedang dengan matahari pada 21 Desember pkl. 16:00	W60_v2r1	6,93	W60_v2r1	2,76	w45_v2	1,61	w45_v2	2,68

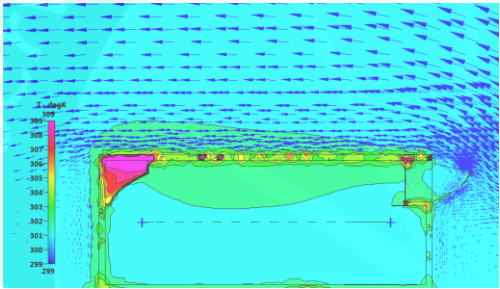
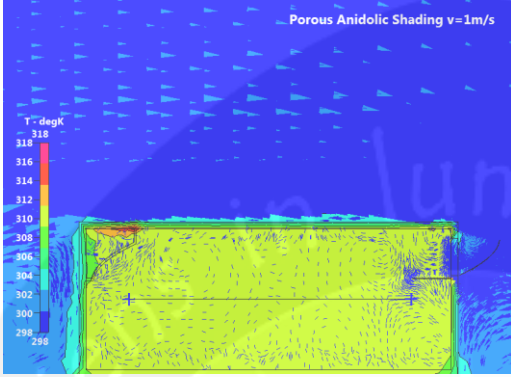
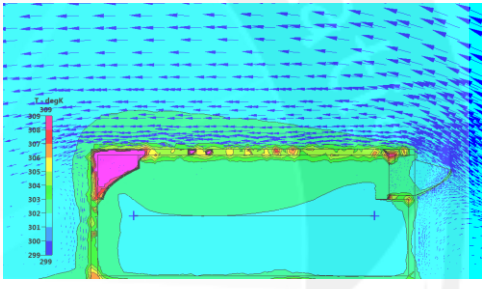
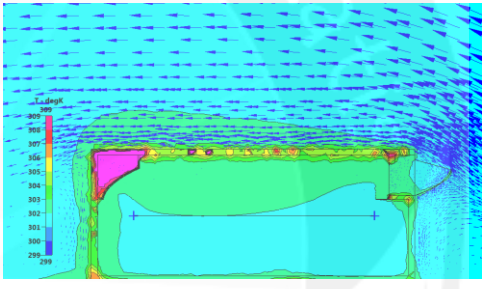
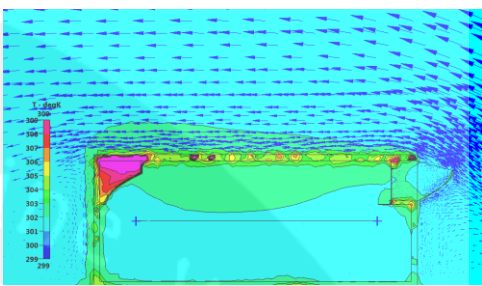
Hasil simulasi CFD-ACE untuk model dengan perbaikan posisi *clerestory* mampu menurunkan suhu udara di dalam ruangan yang sangat signifikan sebagaimana ditampilkan pada Tabel IV-7. Jika pada hasil simulasi pertama suhu udara ruangan dengan teritisan (model dengan suhu udara ruangan terendah) antara 35,84°C - 36,28°C dan suhu udara ruangan dengan *clerestory* saja antara 36,78°C - 37,22°C, perbaikan posisi *clerestory* dengan ventilasi bawah dan pada badan kolektor mampu menurunkan suhu udara ruangan hingga berkisar antara 28,77°C - 28,82°C. Model C80\_A091\_w52\_v2r1 merupakan model terbaik berdasarkan hasil simulasi CFD-ACE dengan kisaran suhu udara ruangan 28,77°C - 28,79°C. Capaian kinerja

termal yang tinggi terlebih jika dibandingkan dengan model terdahulu yang hanya dengan ventilasi yaitu antara 36,78°C – 37,27°C dan suhu udara sekitar (kondisi awal) sebesar 28,5°C.

**Tabel IV-7.** Kontur suhu dan kecepatan aliran udara beberapa model dengan ventilasi dan modifikasi posisi bidang kaca dengan variasi 3 kondisi kecepatan angin di Yogyakarta.

angin	Kontur suhu			
0,1 m/s	R8H3.2C80_A091_w45_v2r1		R8H3.2C80_A091_w45_v2r3	
	R8H3.2C80_A091_w52_v2r3		R8H3.2C80_A091_w45_v2r3	

angin	Kontur suhu	
0,5 m/s	<p>R8H3.2C80_A091_w45_v2r1</p> 	<p>R8H3.2C80_A091_w45_v2r3</p> 
	<p>R8H3.2C80_A091_w52_v2r3</p> 	<p>R8H3.2C80_A091_w45_v2r3</p> 

0,5 m/s		angin	Kontur suhu		
R8H3.2C80_A091_w52_v2r3		R8H3.2C80_A091_w45_v2r1		R8H3.2C80_A091_w45_v2r3	
R8H3.2C80_A091_w45_v2r3		R8H3.2C80_A091_w45_v2r3			

## V. KESIMPULAN

Penerapan prinsip *edge-ray* pada sistem peneduh mampu menghasilkan fungsi ganda. Sistem peneduh yang berbentuk parabola ini merupakan sistem pencahayaan alami dengan kinerja tinggi berdasarkan hasil simulasi Radince-Ecotect. Faktor cahaya alami yang dihasilkan oleh ruangan dengan sistem peneduh baru ini sebesar  $>1\%$  lebih tinggi daripada faktor cahaya alami bukaan cahaya tanpa penghalang dan  $>1,5\%$  lebih tinggi daripada faktor cahaya alami bukaan cahaya dengan teritisan miring  $30^\circ$ . Sistem peneduh parabolik ini juga melindungi bukaan cahaya dari radiasi matahari langsung yang akan menurunkan kinerja termal ruangan ataupun meningkatkan beban penyejukan. Hasil simulasi EnergyPlus menunjukkan sistem peneduh baru ini menghasilkan radiasi panas terkumpul yang lebih rendah daripada AS, *clerestory* saja. Akan tetapi beban penyejukan sistem peneduh baru masih lebih tinggi daripada model dengan *clerestory* saja.

Penerapan ventilasi pada sistem peneduh (kolektor parabolik) sedikit memperbaiki kinerja termal ruangan. Ventilasi ini juga meningkatkan DF ruangan (cahaya difus) tetapi sedikit menurunkan tingkat terang yang ditentukan juga oleh cahaya langsung. Perubahan posisi *clerestory* yang bertujuan untuk menciptakan efek peneduhan pada bidang kaca dengan mengandalkan pencahayaan alami difus yang ditransmisikan melalui bidang kaca mampu menurunkan suhu udara ruangan yang sangat signifikan. Secara umum kinerja pencahayaan alami model ini menurun secara tidak signifikan. Model terbaik dari sisi kinerja termal adalah model dengan sudut sebaran cahaya  $52^\circ$ .

## VI. DAFTAR PUSTAKA

### VI.1 PATEN

- Koester, H 1981, *Solar control and shading system - has inclined reflectors preventing mid-day summer sun striking heat-absorbent outside wall of building*, DE 2942497 A1.
- Koester, H 1994, *Lichtlenkelemente für Tageslicht*, DE patent 4310717 A1.
- Koester, H 1995, *Multifunctional climate luminaire*, DE patent 4335446 A1.
- Maxson, MC dan Ekholm, M 2010, *Passive solar wire screen for buildings*, US patent 2010/0101565 A1.
- Bartenbach, C, Moeller, M, Lanzenberger, R 1987, *Arrangement for illuminating a room with daylight*, US patent 4699467 A.
- Stilles, MR 1994, *Apparatus and method for optimizing useful sunlight reflected into a room*, US patent 5285315 A.
- Digert, NE dan Holtz, MJ 2002, *Mini-optical light shelf daylighting system*, US patent 6480336 B2.
- Allardyce, JD, Eveland, MS, Krochmal, AR, Cornish JR 2009, *Insulated glass window shade*, US patent 7543623.
- Huff, CJ dan Huff, CJ 2011, *Curved light shelf system for daylighting and interior space*, US patent 8027092 B1.
- Thout, KW dan Andersen, M 2014, *Passive louver-based daylighting system*, US patent 8824051 B2.

### VI.2 NON PATEN

- Abboushi, BK 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.
- ASHRAE 2009, *ASHRAE Handbook: Fundamental, inch-pound edition*. ASHRAE. Atlanta, GA.
- Binarti, F 2009, *Energy-Efficient Window for Classroom in Warm Tropical Area*. *11<sup>th</sup> International IBPSA Conference*, Glasgow, Scotland, UK, July 27-30, 1655-1662.
- Binarti, F dan Satwiko, P 2015a, *Long-term monitoring and simulations of the daylighting and thermal performance of an anidolic daylighting system on a tropical urban house*. In: *6th International of Building Physics Conference*, Turin, Italy, on 14-17 June 2015. *Energy Procedia* 78,1787-1792, DOI: 10.1016/j.egypro.2015.11.307.

- Binarti, F dan Satwiko, P 2016, An east-facing anidolic daylighting system on a tropical urban house, *Indoor and Built Environment* vol. 25(4): 691-702. Doi: 10.1177/1420326X15574787.
- Binarti, F dan Satwiko, P 2015b, *Model dan Rules of Thumb Sistem Pencahayaan Alami Terpadu untuk Menciptakan Interior yang Ramah Lingkungan*, Laporan Penelitian Hibah Bersaing Tahun ke-2, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Yogyakarta.
- Crawley, DB, Lawrie, LK, Winkelmann, FC, Buhl, WF, Pedersen, CO, Strand, RK, Liesen, RJ, Fisher, DE, Witte, MJ, Henninger, RH, Glazer, J, and Shirey, D 2013, *EnergyPlus v.8.1*, Atlanta, Georgia.
- Ellis, PG 2003, *Development and Validation of the Unvented Trombe Wall Model in EnergyPlus*, Master Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA.
- Jelle, BP, Hynd, A, Gustavsen, A, Arasteh, D, Goudey, H dan Hart, R 2012, Fenestration of Today and Tomorrow: A State-of-the-Art Review and Future Opportunities, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 96: 1-28.
- Kandar, MZB, Nikpur, M, Mohammadi, MP 2013, Investigating the performance of anidolic daylighting system with respect to building orientation in tropical area, *IRACST* 3(1): 74-79.
- Linhart, F dan Scartezzini, JL 2010, Minimizing lighting power density in office rooms equipped with anidolic daylighting systems, *Solar Energy* 84: 587–595.
- Linhart, F, Wittkopf, SK dan Scartezzini, JL 2010, Performance of anidolic daylighting systems in tropical climates, parametric studies for identification of main influencing factors, *Solar Energy* 84: 1085–1094.
- Loutzenhiser, PG, Manz, H, Carl, S, Simmler, H, Maxwell, GM 2008, Empirical validations of solar gain models for a glazing unit with exterior and interior blind assemblies, *Energy and Buildings* 40:330-340.
- Manz, H, Loutzenhiser, P, Frank, T, Strachan, PA, Bundi, R, Maxwell, G 2004, Series of experiments for empirical validation of solar gain modeling in building energy simulation codes – experimental setup, test cell characterization, specifications and uncertainty analysis, *Building and Environment* 41:1784-1797.
- Marsch, A 2005, Ecotect Software v.5.5, Square One, Cardiff.
- Praditwattanakit, R, Chaiwiwatworakul, P, Chirarattananon, S 2013, Anidolic concentrator to enhance the daylight use in tropical buildings, *International Conference on Alternative Energy in Developing Countries and Emerging Economies*. Bangkok, Thailand, 30–31 May 2013, [ftp://202.28.64.61/04.April2013/Dowload/print/139\\_Rut%20Praditwattanakit.docx](ftp://202.28.64.61/04.April2013/Dowload/print/139_Rut%20Praditwattanakit.docx) (2013, diakses 7 Agustus 2014).
- Scartezzini, JL, dan Courret, G 2002, Anidolic daylighting systems. *Solar Energy*; 73: 123–135.

Ward, G 2002, *Desktop Radiance Software*. Lawrence Berkeley Laboratory, California.

Winston, R, Minano, JC, Benitez, P 2005, *Nonimaging Optics*, Elsevier, San Francisco, California.

Wittkopf, SK, Grobe, LO, Compagnon, R, Kampf, J, Linhart, F, Scartezzini, JL 2010, Ray tracing study for non-imaging daylight collectors, *Solar Energy*; 84: 986–996.

Zhu, D, Hong, T, Yan, D, dan Wang, C 2012, *Comparison of building energy modeling programs: building loads*, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) – 6034E, LA.

