

KODE/RUMPUN ILMU: 426/TEKNIK ARSITEKTUR

A



UNIVERSITAS ATMA JAYA YOGYAKARTA

**PENGUKURAN EMPIRIS SEBAGAI DASAR PENENTUAN MODEL RADIASI
PROGRAM CFD UNTUK SIMULASI KINERJA TERMAL
BUKAAN CAHAYA**

**TEMA PENELITIAN UNIVERSITAS
Kebencanaan**

**TOPIK PENELITIAN UNIT
Kelestarian Lingkungan**

Ketua

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

Anggota

Jackobus Ade Prasetya Seputra, ST., MT.
(NPP.10.11.799/NIDN. 0506028201)

LAPORAN

PENELITIAN INTERNAL KELOMPOK

Laboratorium Perencanaan dan Perancangan Teknologi
Arsitektural Program Studi Arsitektur
Fakultas Teknik

Februari 2017

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

LEMBAR PENGESAHAN LAPORAN PENELITIAN INTERNAL PERORANGAN		
1	Judul Proposal Penelitian	Pengukuran Empiris Sebagai Dasar Penentuan Model Radiasi Program CFD Untuk Simulasi Kinerja Termal Bukaan Cahaya
2	Kategori Penelitian	Penelitian diorientasikan pada artikel jurnal
3	Tema Penelitian Universitas	Kebencanaan
4	Topik Penelitian Unit	Kelestarian Lingkungan
5	Bebas SKS Penelitian	(3) sks Berlaku semester Gasal 2016/2017
IDENTITAS PENELITI		
6	Nama Peneliti (Ketua)	Floriberta Binarti, S.T., Dipl.NDS. Arch.
	Jabatan/Golongan	Lektor / IIID
	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
	Nama Peneliti (Anggota)	Jackobus Ade Prasetya Seputra, ST., MT.
	Jabatan/Golongan	Asisten Ahli/IIIB
	NPP/NIDN	10.11.799 0506028201
	Bidang Keahlian	Arsitektur
	Unit/Fakultas/Jurusan	Unit Jurusan/Program Studi
		Fakultas Teknik Arsitektur
	Alamat Rumah	
	No. Telp/Faks/Email Peneliti	adeprasetya@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. 20.000.000,00
	Jumlah Total	Rp. 20.000.000,00
9	Terbilang	ratus ribu rupiah
10	Spesifikasi <i>outcome</i> penelitian	Menghasilkan draft artikel jurnal.


Yogyakarta, 6 Februari 2017



Mengetahui dan Menyetujui
Dekan Fakultas Teknik



Prof. Dr. Yoyong Ariadi, M.Eng., Ph.D.
NPP.07.88.203 / NIDN.0515015901

Ketua Peneliti:


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

Mengetahui dan Menyetujui
Ketua LPPM




Dr. Purno Supriatna Samaya, SE., M.Si.
NPP.02.94.528 / NIDN.0524107001
L P P M

KATA PENGANTAR

Kajian tentang elemen jendela kaca dan perlengkapannya (*fenestration*) seakan tiada habisnya. Banyak aspek yang dapat ditinjau. Penelitian ini lebih fokus pada kemampuan model pada program Computational Fluid Dynamics (CFD) di dalam melakukan simulasi kinerja termal bukaan cahaya. Konteks iklim tropis lembab menjadikan studi ini lebih menarik karena posisi pergerakan matahari terhadap bangunan yang lebih variatif dibandingkan dengan posisi pergerakan matahari di daerah dengan lintang tinggi.

Puji syukur kepada Tuhan atas terselesaikannya laporan penelitian ini, meskipun masih banyak kekurangan. Tentunya studi ini tidak berhenti sampai dengan laporan ini. Studi yang melengkapi masih sangat dibutuhkan di masa mendatang.

Akhir kata saya selaku peneliti mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah mendukung kelancaran proses pelaksanaan penelitian ini. Terima kasih peneliti ucapkan kepada tim surveyor yang telah membantu selama pengukuran empiris. 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 di masa depan.

Yogyakarta, Februari 2017

ABSTRAKSI

Bukaan cahaya memiliki peran penting dalam menentukan besarnya konsumsi energi pada bangunan, terutama di daerah tropis dengan luas bukaan cahaya yang dominan. Bukaan cahaya tidak hanya berkaitan dengan kinerja pencahayaan alami, melainkan juga kinerja termal bangunan. Pengaruh bukaan cahaya pada kinerja termal dapat dikatakan memiliki peranan utama karena kinerja termal menentukan beban penyejukan bangunan yang memiliki kontribusi terbesar di dalam konsumsi energi bangunan. Saat ini penggunaan program simulasi sebagai piranti untuk memperkirakan kinerja termal bangunan pada tahap desain sudah bersifat wajib. Akurasi simulasi merupakan kunci utama yang menentukan apakah hasil simulasi tersebut dapat diandalkan. Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan salah satu program simulasi termal yang rinci dan dikenal akurat. Program CFD menyediakan beberapa model radiasi yang didasarkan pada asumsi-asumsi yang berbeda. CFD-ACE+ menyediakan 4 model radiasi. Pemakaian model yang tepat akan menghasilkan simulasi yang akurat. Untuk melihat kesesuaian atau akurasi model, studi ini melakukan komparasi antara hasil simulasi dengan menggunakan model radiasi yang dipilih dan hasil pengukuran empiris pada model ruang yang memiliki sebuah bukaan cahaya. Ada 4 macam bukaan cahaya yang distudi, yakni: *clerestory* tanpa peneduh (UC), *clerestory* dengan peneduh (CE), *anidolic daylighting system* (ADS) dan *anidolic solar shading* (ASS). Hasil komparasi dengan model Surface to Surface (STS) menunjukkan bahwa model STS lebih cocok digunakan pada model yang tidak memiliki pembayangan yang kuat/intensif.

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

DAFTAR ISI

(Berdasarkan SK Rektor Nomor 101/HP/Per.Pen/2012).....	2
LEMBAR PENGESAHAN	2
LAPORAN PENELITIAN INTERNAL PERORANGAN.....	2
Yogyakarta, 6 Februari 2017	3
Ketua Peneliti:.....	3
Floriberta Binarti, ST., Dipl. NDS. Arch.....	3
NPP:07.94.520 / NIDN:0520096901	3
KATA PENGANTAR	4
ABSTRAKSI	5
DAFTAR ISI.....	6
I. PENDAHULUAN.....	10
I.1 LATAR BELAKANG	10
I.2 RUMUSAN MASALAH.....	11
I.3 TUJUAN PENELITIAN.....	12
I.4 BATASAN MASALAH.....	12
I.5 URGENSI PENELITIAN.....	12
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	13
II.1 BUKAAN CAHAYA UNTUK DAERAH TROPIS LEMBAB	13
II.2 MODEL RADIASI PADA PROGRAM CFD.....	14
II.2.1 Pengantar Radiasi.....	15

II.2.2	Model Surface to Surface.....	17
II.2.3	<i>Discrete Ordinate Model (DOM)</i>	19
II.2.4	Metode Monte Carlo (MC)	22
II.3	PENGUKURAN EMPIRIS KINERJA TERMAL	23
II.3.1	Kualitas data hasil pengukuran empiris	24
II.3.2	Metodologi validasi empiris	25
II.3.3	Pengukuran Properti Termal Bahan di Lapangan.....	26
III.	METODE PENELITIAN.....	30
III.1	BAGAN ALIR PENELITIAN	30
	Penelitian ini dilakukan dengan susunan langkah sebagai berikut:.....	30
III.2	TOLOK UKUR KINERJA TERMAL BUKAAN CAHAYA.....	30
III.3	VARIASI MODEL BUKAAN CAHAYA.....	31
III.3.1	Bukaan Cahaya Atas (<i>Clerestory</i>)	31
III.3.2	<i>Clerestory</i> dengan Teritisan.....	32
III.3.3	Anidolic Daylighting System (ADS).....	33
III.3.4	<i>Clerestory</i> dengan Piranti Peneduh Multifungsi.....	34
III.4	PENGUKURAN EMPIRIS.....	34
III.4.1	Fasilitas Uji	34
III.4.2	Pengukuran Properti Termal Bahan Fasilitas Uji	37
III.4.3	Pengukuran Kinerja Termal Bukaan Cahaya.....	38
III.5	METODE SIMULASI.....	40
III.5.1	Pemodelan Kinerja Termal Bukaan Cahaya dengan CFD.....	40
III.5.2	Simulasi Radiasi dengan Tiga Model Radiasi CFD-ACE+.....	41
IV.	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	42
IV.1	HASIL PENGUKURAN EMPIRIS	42
IV.2	HASIL SIMULASI CFD-ACE+	48
V.	KESIMPULAN DAN SARAN.....	52

V.1 KESIMPULAN.....	52
V.2 SARAN.....	52
VI. DAFTAR PUSTAKA	53

DAFTAR GAMBAR

Gambar II-1. Diskretisasi kubah unit di dalam CAFVM	20
Gambar III-1. Diagram Tulang Ikan Penelitian	30
Gambar III-2. Model uji dengan bukaan cahaya atas (<i>clerestory</i>) tanpa peneduh.....	31
Gambar III-3. Model uji dengan bukaan cahaya atas dengan peneduh.....	32
Gambar III-4. Model uji dengan <i>Anidolic Daylighting System</i>	33
Gambar III-5. Model uji dengan <i>Piranti Peneduh Parabolik</i>	34
Gambar III-6. Situasi fasilitas uji (sumber: Google earth, 2015).....	35
Gambar III-7. Rencana tapak fasilitas uji dan posisi pengukuran.....	36
Gambar III-8. Dari kiri ke kanan: tampak samping kiri, tampak belakang, tampak muka dan tampak samping kanan fasilitas uji berikut ukurannya.	37
Gambar III-9. <i>Micro weather station</i> di rooftop gedung Kampus Universitas Atma Jaya Yogyakarta di Babarsari.....	39
Gambar III-10. Posisi 3 titik pengukuran kondisi iklim indoor	39

DAFTAR TABEL

Tabel III-1. Properti termal dan optis bahan bangunan penyusun fasilitas uji	37
Tabel III-2. Tolok ukur dan alat ukur	40
Tabel IV-1. Hasil pengukuran empiris empat model bukaan	42
Tabel IV-2. Profil kondisi termal ruang luar pada 10 September 2016.....	46
Tabel IV-3. Profil kondisi termal ruang luar pada 16 September 2016.....	46
Tabel IV-4. Profil kondisi termal ruang luar pada 22 September 2016.....	47
Tabel IV-5. Profil kondisi termal ruang luar pada 3 Oktober 2016.....	48

I. PENDAHULUAN

I.1 LATAR BELAKANG

Bukaan cahaya sering diklasifikasikan sebagai jendela, meskipun fungsi bukaan cahaya lebih sempit daripada fungsi jendela. Bukaan cahaya yang hanya berfungsi menyalurkan cahaya alami ke dalam ruang sering disebut bidang transparan. Cahaya alami yang masuk ke ruangan melalui bukaan cahaya juga menyertakan panas. Perambatan panas melalui bukaan cahaya sendiri terjadi dalam 3 cara, yaitu: konduktif, konvektif dan radiatif. Oleh sebab itu, perambatan energi pada bukaan cahaya lebih rumit daripada bidang yang opaque (Manz, 2004). Desain bukaan cahaya tidak hanya mempengaruhi kinerja pencahayaan alami ruangan di tempat bukaan cahaya diaplikasikan, tetapi juga kinerja termalnya. Dengan demikian, studi tentang bukaan cahaya di bidang energi bangunan sangat penting, karena bukaan cahaya merupakan elemen bangunan yang berpengaruh besar pada konsumsi energi bangunan, baik untuk penyejukan ruangan maupun untuk penggunaan lampu sebagai pengganti pencahayaan alami.

Pada daerah tropis lembab yang terpapar radiasi matahari yang tinggi, kinerja termal ruangan dengan bukaan cahaya banyak dipengaruhi oleh perambatan panas secara radiasi daripada secara konduksi (ASHRAE, 2009). Semakin luas bidang transparan yang melingkupi ruangan, semakin besar porsi perpindahan panas secara radiasi. Kecepatan angin di daerah tropis lembab yang cenderung rendah membuat peranan perpindahan panas secara konvektif relatif kecil. Secara global, radiasi matahari yang jatuh pada bidang transparan dapat berupa radiasi langsung dan radiasi difus. Karena radiasi panas di daerah tropis lembab sebagian dipantulkan dan sebagian disebarkan oleh awan maupun uap air yang terkandung di dalam udara, maka radiasi yang mencapai permukaan bidang cenderung difus, tetapi kuat dan menyilaukan (Hyde, 2008).

Dewasa ini perkembangan teknologi komputer yang cepat menyediakan banyak program simulasi yang digunakan untuk menganalisa kinerja termal secara dinamis, lebih efisien waktu dan biaya dibandingkan dengan pengukuran pada bangunan yang nyata. Tingkat

program simulasi menjadi salah satu kunci keandalan hasil simulasi yang dapat digunakan untuk pengambilan keputusan di samping faktor pengguna dan data yang diinput pada saat proses simulasi. Akurasi program ditentukan oleh algoritma yang digunakan yang sebenarnya merupakan pemodelan kondisi fisik yang ada dalam kehidupan nyata, sehingga pergeseran antara hasil simulasi dan yang nyata merupakan hal wajar dan masih dapat diterima jika hasil simulasi mencapai 95% tingkat kepercayaan.

Computational Fluid Dynamic (CFD) banyak digunakan untuk simulasi kinerja termal secara rinci. Studi ini menggunakan CFD-ACE+ sebagai program simulasi kinerja termal bukaan cahaya. Hasil validasi yang pernah dilakukan menunjukkan program CFD-ACE+ cukup akurat di dalam menganalisis perilaku termal udara di dalam bangunan (Cheng dkk., 2006; Ejlali dkk., 2009). Meski demikian, hasil simulasi CFD sangat ditentukan oleh kesesuaian model (perpindahan panas, turbulensi, konveksi dan radiasi) yang dipilih dengan kasus yang ditangani. Pada simulasi bukaan cahaya, model radiasi CFD akan berpengaruh besar pada hasil simulasi kinerja termal karena perpindahan panas yang melalui bukaan cahaya di daerah tropis lembab sebagian besar secara radiatif, meskipun perpindahan panas secara konvektif juga akan berpengaruh signifikan ketika kecepatan angin di lokasi cukup tinggi. Untuk menentukan model radiasi CFD yang paling sesuai untuk simulasi setiap bukaan cahaya, pengukuran empiris yang dilakukan secara cermat menjadi cara yang tepat sebagai pembanding hasil program simulasi, khususnya pada kasus dengan aliran energi yang cukup rumit seperti yang terjadi pada bukaan cahaya. Pengukuran empiris penting dilakukan untuk mengatasi keterbatasan pemodelan dalam sebuah program.

I.2 RUMUSAN MASALAH

1. Bagaimana hasil simulasi kinerja termal dari beberapa variasi bukaan cahaya yang dianalisis dengan model radiasi tertentu pada program CFD?
2. Bagaimana hasil pengukuran empiris kinerja termal dari beberapa variasi bukaan cahaya?
3. Seberapa besar pergeseran antara hasil simulasi CFD dan hasil pengukuran kinerja termal dan pencahayaan alami dari beberapa variasi bukaan cahaya?

4. Model radiasi CFD mana yang paling sesuai untuk setiap variasi bukaan cahaya?

I.3 TUJUAN PENELITIAN

- a) Mengamati kinerja termal yang nyata dari beberapa variasi bukaan cahaya.
- b) Meneliti pergeseran hasil simulasi CFD terhadap hasil pengukuran empiris kinerja termal dari beberapa variasi bukaan cahaya dengan menggunakan beberapa model radiasi.
- c) Menentukan model radiasi CFD yang tepat untuk setiap variasi bukaan cahaya.

I.4 BATASAN MASALAH

Studi simulasi dan pengukuran kinerja pencahayaan alami dan termal bukaan cahaya ini terbatas pada 4 variasi bukaan cahaya yang diaplikasikan pada kantor atau ruang kelas. Pengukuran lapangan dilakukan di Yogyakarta (3 km dari kampus UAJY) dalam jangka pendek dengan mengandalkan data iklim yang diukur di Kampus IV UAJY dengan menggunakan *micro weather station* sebagai data kondisi eksterior.

I.5 URGENSI PENELITIAN

- Kajian ini diharapkan dapat digunakan sebagai acuan di dalam pengukuran kinerja termal bukaan cahaya, terutama bukaan cahaya yang inovatif seperti *anidolic system* hingga bukaan cahaya yang umum yang tanpa elemen peneduh maupun dengan elemen peneduh secara empiris maupun dengan simulasi CFD-ACE.
- Kajian ini juga diharapkan dapat digunakan sebagai acuan di dalam memodelkan beberapa macam bukaan cahaya dengan menggunakan program CFD-ACE.

II. TINJAUAN PUSTAKA

II.1 BUKAAN CAHAYA UNTUK DAERAH TROPIS LEMBAB

Bukaan cahaya mengalami evolusi dari masa ke masa, baik dari desain geometrik maupun bahan bidang transparannya. *Clerestory* atau bukaan cahaya yang terletak pada dinding eksterior bagian atas merupakan bukaan cahaya yang paling awal. *Clerestory* yang paling dasar ditutup dengan bidang transparan berupa kaca bening tunggal. Meskipun teknologi kaca mengalami perkembangan pesat, kaca bening tunggal masih banyak diaplikasikan terutama pada bangunan kelas menengah ke bawah di daerah tropis (dua musim).

Untuk meningkatkan distribusi pencahayaan alami dan kenyamanan pandangan penghuni keluar ruangan, bidang transparan dibagi menjadi dua bagian. Bagian atas berupa *clerestory* yang dilengkapi dengan panel interior horisontal yang diletakkan di bawah *clerestory*. Bagian bawah berupa jendela pandang yang perlu dilengkapi dengan piranti peneduh eksternal untuk menciptakan kenyamanan visual dan termal bagi penghuni serta ruangan yang efisien energi. 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). Dalam perkembangannya *clerestory* pada rak cahaya dapat dilengkapi dengan piranti peneduh adaptif untuk mencegah pemanasan yang berlebihan di daerah beriklim panas atau dengan radiasi matahari tinggi (Aboushi, 2013).

Dari segi material bidang transparan, dikenal beberapa terobosan jenis kaca dengan properti termooptikal yang tinggi. Kaca dengan *low-e coating* dikembangkan untuk mencegah radiasi panas yang tinggi, dengan membiarkan cahaya tampak masuk ke ruangan. Tingkat keawetan dan kondensasi merupakan masalah yang masih harus diselesaikan (Jelle dkk., 2012). Kaca electrochromic merupakan jenis kaca pintar yang menggunakan aliran listrik pada lapisan tipis yang berfungsi sebagai pembayang di dalam kaca. Komponen ini mampu menjadikan kaca bersifat adaptif, yaitu dengan menurunkan kemampuan mentransmisikan radiasi panas dan cahaya tampak pada saat langit cerah dan meningkatkan kemampuan

mentransmisikan panas dan cahaya tampak pada saat langit mendung (Jelle dkk., 2012). Sayangnya, harga kaca jenis ini masih di luar jangkauan aplikasi secara luas untuk daerah tropis lembab yang sebagian besar tergolong negara berkembang.

Anidolic system (AS) merupakan sistem pencahayaan alami yang terdiri dari kolektor parabolik yang terletak di luar ruangan dengan bidang kaca yang menghadap ke *zenith*, bukaan cahaya, saluran cahaya dan difuser yang berada di dalam ruangan. Dengan menerapkan prinsip *edge-ray* sistem ini mampu mencapai kinerja pencahayaan alami dengan efisiensi yang tinggi (Scartezzini dan Couret, 2002; Linhart dkk., 2010, Praditwattanakit dkk., 2013, Binarti dan Satwiko, 2016). Namun demikian, hasil kajian termal AS yang cukup detail di daerah tropis lembab (Binarti dan Satwiko, 2015; Binarti, 2016) menunjukkan sistem ini mentransmisikan radiasi panas matahari yang tinggi karena bidang transparan pada AS menangkap cahaya matahari saat di *zenith* dengan tingkat radiasi panas yang tinggi. Radiasi panas yang terkumpul tidak akan berdampak termal pada ruangan yang mengaplikasikan AS jika ukuran kolektor dan bukaan cahayanya relatif kecil (Binarti dan Satwiko, 2015b). Untuk aplikasi AS pada ruangan yang lebar, dampak termal perlu diperhitungkan.

Piranti peneduh parabolik multifungsi merupakan pengembangan prinsip *edge-ray* yang memiliki kinerja pencahayaan alami yang tinggi, tetapi relatif tidak meningkatkan suhu ruangan meskipun piranti peneduh parabolik dan *clerestory*-nya berukuran cukup besar (Binarti, 2016). Meskipun kajian kinerja pencahayaan alami dan termal model peneduh baru ini sudah pernah dilakukan (Binarti, 2016), akan tetapi kajian termal tersebut belum menggunakan pemodelan perpindahan panas secara radiasi yang divalidasi dengan hasil pengukuran empiris.

II.2 MODEL RADIASI PADA PROGRAM CFD

CFD-ACE+ merupakan program simulasi fluida dinamis (*computational fluid dynamics*) yang dikembangkan oleh Grup ESI untuk menganalisis suhu (udara dan permukaan) serta aliran udara. Analisis CFD-ACE+ didasarkan pada metode numerik yang diatur oleh persamaan aliran fluida dan perpindahan panas yang mengacu pada hukum konservasi

mekanika fluida Navier-Stokes yang diuraikan dalam 3 persamaan (ESI Group, 2014), yaitu: persamaan kontinuitas (persamaan 1), persamaan momentum (persamaan 2), dan persamaan energi (persamaan 3).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (\text{persamaan 1})$$

$$\rho \left(\frac{d\mathbf{u}}{dt} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{f} \quad (\text{persamaan 2})$$

$$\rho \left(\frac{dT}{dt} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (\mathbf{k} \cdot \nabla T) + \dot{q} \quad (\text{persamaan 3})$$

Untuk menyelesaikan permasalahan aliran fluida dan perpindahan panas secara dinamis CFD-ACE+ didukung oleh banyak model. Beberapa yang terkait dengan kinerja termal bukaan cahaya adalah model perpindahan panas secara konduksi, turbulensi, dan radiasi. Pada simulasi kinerja termal bukaan cahaya di daerah tropis lembab karena perpindahan panas secara radiatif memiliki kontribusi yang sangat besar, penentuan model radiasi sangat menentukan validitas hasil simulasi.

Beberapa model radiasi yang tersedia pada program CFD secara umum adalah Discrete Transfer Radiation (DTRM), P-1 Radiation, Rosseland Radiation, Surface-to-Surface (STS), Discrete Ordinate Model (DOM), dan Monte Carlo. Sedangkan pada program CFD-ACE+ model radiasi yang tersedia adalah STS, DOM, P1, dan Monte Carlo (ESI Group, 2014). Studi ini hanya membahas STS, DOM, dan Monte Carlo sesuai dengan yang dianggap sesuai untuk digunakan pada simulasi bukaan cahaya. Paparan tentang teori radiasi digunakan untuk mengantar teori pemodelan radiasi dan parameter yang harus disiapkan pada pengukuran empiris.

II.2.1 Pengantar Radiasi

Radiasi merupakan bentuk transmisi gelombang cahaya yang tidak membutuhkan media hantar. Radiasi panas terjadi pada gelombang infra merah. Radiasi panas yang dilepas oleh bahan merupakan fungsi dari pangkat empat suhu mutlak bahan tersebut. Oleh karenanya, perpindahan panas secara radiasi menjadi dominan pada suhu tinggi.

Radiasi pada benda hitam merupakan penjelasan perpindahan panas secara radiasi yang sempurna, baik sebagai pelepas maupun penyerap panas. Dengan hukum mekanika kuantum dapat dijelaskan faktor-faktor yang menentukan besarnya energi benda hitam yang dilepas, yaitu: konstanta Planck, konstanta Boltzmann, panjang gelombang radiasi, kecepatan rambat gelombang cahaya, indeks refraktif media, dan suhu mutlak. Dari sini dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Energi yang dilepas pada semua panjang gelombang meningkat ketika suhu meningkat,
2. Tenaga yang dilepas pada spektrum puncak akan bergerak menuju panjang gelombang yang lebih pendek ketika suhu meningkat.

Distribusi spektral Planck memberikan intensitas radiasi maksimum yang setiap benda dapat melepaskannya di dalam ruang hampa pada panjang gelombang dan suhu tertentu. Energi yang dilepas pada pita panjang gelombang yang disyaratkan untuk kalkulasi pada radiasi bukan abu-abu¹ diperoleh melalui kalkulasi area di bawah kurva Planck.

Semua materi tidak ada yang memiliki kemampuan melepas maupun menyerap panas sebagaimana benda hitam. Pada materi bukan benda hitam tenaga yang dilepas oleh permukaannya pada suhu tertentu ke media dengan indeks refraktif n ditentukan oleh emisivitas kubah bumi total dari permukaan tersebut yang besarnya beragam antara 0 dan 1. Emisivitas sendiri secara umum merupakan fungsi dari bahan, kondisi permukaan, panjang gelombang radiasi dan suhu permukaan. Ketika radiasi jatuh pada permukaan, sebagian energinya diserap, sebagian dipantulkan dan sisanya ditransmisikan tergantung dari daya serap (α), daya pantul (ρ) dan daya transmisi (τ). Perilaku ini dapat dituliskan dengan persamaan 14.

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \dots\dots\dots (persamaan 4)$$

¹ Radiasi abu-abu atau *greybody radiation* adalah radiasi pada benda dengan emisivitas konstan < 1 sebagai pendekatan yang dianggap tepat untuk benda-benda pada pita spektrum tertentu yang kecil. *Greybody radiation* tidak ada di alam nyata, tetapi digunakan untuk komputasi setiap panjang gelombang secara individu.

Menurut hukum Kirchhoff, di dalam keseimbangan termal emisivitas permukaan sama dengan koefisien serapnya. Dan pada permukaan opaque, emisivitas permukaan ditambah koefisien pantul sama dengan 1.

Karakteristik serap dan emisivitas gas tergantung pada kondisi termodinamik gas tersebut. Secara umum gas menyerap dan melepas panas hanya pada pita panjang gelombang yang sempit, sehingga hampir semua gas tidak termasuk benda abu-abu. Banyak gas (termasuk udara yang dibahas pada studi ini) relatif transparan terhadap radiasi termal pada rentang suhu yang biasa terjadi di dalam permasalahan teknik, sehingga keberadaannya dapat diabaikan (bukan media penghantar). Perpindahan panas secara radiatif untuk media abu-abu (melepas, menyerap dan menyebarkan panas) merupakan fungsi arah pancaran radiasi, intensitas radiasi yang ditentukan oleh posisi, arah, konstanta Planck dan konstanta Boltzmann.

II.2.2 Model Surface to Surface

Surface-to-surface (STS) merupakan model yang dapat digunakan untuk menghitung perpindahan radiasi di dalam ruang yang dilingkupi dengan permukaan difus abu-abu. Oleh karenanya, model ini tidak memperhitungkan radiasi spekular dan media hantar dan hanya didukung oleh radiasi abu-abu. Pengabaian terhadap radiasi yang diserap, dilepas dan disebarkan merupakan asumsi utama dari model ini, sehingga hanya radiasi “surface to surface” yang diperhitungkan. Pada model STS, perpindahan energi antara dua permukaan tergantung pada ukuran, jarak dan orientasi antar permukaan. Parameter ini dihitung dengan fungsi geometrik yang disebut “view factor”. Metode surface-to-surface view factor inilah yang digunakan untuk menghitung besarnya energi yang jatuh pada suatu permukaan yang berasal dari permukaan lain. View factor merupakan pecahan dari energi yang meninggalkan permukaan yang jatuh pada permukaan.

Secara matematis fluks energi yang jatuh pada permukaan dijelaskan dengan persamaan 5.

$$q_k = \sum_j \epsilon_j A_j F_{jk} T_j^4 - \epsilon_k A_k T_k^4 \quad \text{(persamaan 5)}$$

Di mana : A_k = luas permukaan k dan A_j = luas permukaan j
 F_{jk} = view factor antara permukaan j dan permukaan k

$q_{in,k}$ = fluks energi yang jatuh pada permukaan k
 $q_{out,j}$ = fluks energi yang meninggalkan permukaan j

Untuk permukaan N, hubungan pendekatan ke view factor dijelaskan dengan persamaan 6-7.

Untuk $j = 1, 2, 3, \dots, N$ (persamaan 6)

Sehingga:

$$= + \sum \dots\dots\dots$$
 (persamaan 7)

Di mana : J_k = energi yang dilepas (radiosity) oleh permukaan k
 E_k = daya melepas energi permukaan k

Persamaan 7 mewakili persamaan-persamaan N yang dapat diformulasikan dalam bentuk matriks dengan K sebagai matriks NxN, J adalah vektor radiosity dan E adalah vektor daya melepas energi, seperti yang dijelaskan pada [persamaan matriks radiosity](#) (8):

$$\mathbf{KJ} = \mathbf{E} \dots\dots\dots$$
 (persamaan 8)

Dengan demikian, view factor antara 2 permukaan infinite i dan j adalah sebagai berikut:

$$= \int \int \dots\dots\dots$$
 (persamaan 9)

Di mana : F_{ij} ditentukan oleh kenampakan dari dA_j hingga dA_i .
 $F_{ij} = 1$, jika dA_j tampak dari dA_i ;
 dan 0 jika sebaliknya.

Kelemahan dari model radiasi ini yaitu radiasi yang terjadi pada benda padat semi transparan tidak dapat diselesaikan. Meskipun model ini dapat diaplikasikan untuk berbagai geometri, baik 3D, 2D planar atau 2D aksisimetris (ESI Group, 2014), model ini tidak dapat bekerja pada kondisi pelingkup yang bersifat periodik. Model STS tidak difasilitasi dengan pilihan abu-abu dan bukan abu-abu.

(.) (.) = (persamaan 10)

Integral dari persamaan 10 adalah:

$$\rho - \rho' = \int_{\Omega} (\rho, \rho') (\rho' - \rho) (\rho - \rho', \rho') \rho', (\rho)$$

(persamaan 11)

Di mana: $E = \sigma T^4$ = tenaga yang dilepas benda hitam
 k = konstanta Boltzmann
 q_s = *surface radiation flux*
 $\rho = E - (1 - \epsilon)/\epsilon$ = radiosity
 n dan n' normal pada r dan r'

inti K didefinisikan sebagai: $K(r, r') = \frac{(\rho, \rho')}{4 |r - r'|^2}$

jika v adalah fungsi yang terlihat didefinisikan sebagai:

$$(\rho, \rho') = \int_{\Omega} \rho' \rho \cos \theta \, d\Omega$$

Persamaan-persamaan di atas dapat ditulis sebagai:

$$\rho - \rho' = \int_{\Omega} f(\rho, \rho') \rho' \rho \cos \theta \, d\Omega \dots \dots \dots (\text{persamaan 12})$$

STS cocok digunakan untuk simulasi pertukaran radiasi termal antar permukaan difus yang membentuk sebuah rangkaian tertutup yang berisi medium yang tidak menyerap, melepas atau menyebarkan radiasi (Mathew, 2010). Dari hasil studi yang dilakukan oleh Sun dkk. (2016) menunjukkan bahwa model STS cukup akurat di dalam menganalisis kinerja termal kaca ganda dengan *Venetian blind*.

II.2.3 Discrete Ordinate Model (DOM)

Sesuai dengan namanya, DOM memberikan solusi perpindahan panas secara radiatif dengan membagi semua koordinat, sumbu x, y, z dan termasuk sudut (θ) dan frekuensi (ϕ), menjadi titik-titik grid yang elemen-elemen terkecil (*discrete*) atau sel-sel grid. Pada model MC, akan ada alarm secara otomatis yang menginformasikan jika tenaga komputer tidak mencukupi. Tidak demikian halnya dengan DOM yang bisa saja memberikan hasil yang tampak masuk akal, tetapi mungkin salah sama sekali. Di dalam hal ini pengalaman di dalam pemodelan sangat berperan penting.

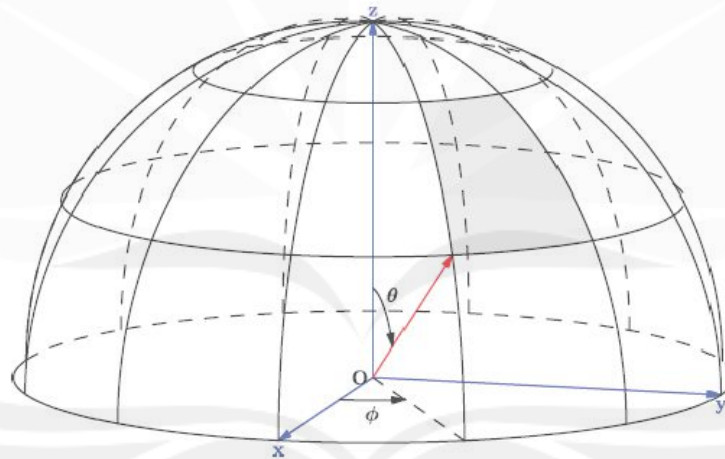
Ada dua pendekatan yang digunakan sebagai solusi *Radiatif Transfer Equation (RTE)*, yaitu:

1. *Sn Discrete Ordinate Method (SnDOM)*
2. *Control Angle Finite Volume Method (CAFVM)*

Pada SnDOM Distribusi arah intensitas digantikan dengan serangkaian arah diskrit yang mencakup solid angle 4. Integral *solid angle* didekati secara numerik. Akurasi model ini sangat tergantung pada skim kuadratur (Hassanzadeh, 2007). Skim kuadratur Sn yang disediakan CFD-ACE+ adalah: S4, S6, S8 dan S12. Jumlah arah ordinat yang digunakan dalam komputasi radiasi ketika menggunakan skim tersebut yaitu: 24, 28, 80 dan 168 di dalam penyelesaian permasalahan 3 dimensional; dan 1,5 darinya di dalam kasus 2 dimensi dengan atau tanpa aksimetri. S4 yang mempertimbangkan 12 arah ordinat pada kasus 2 dimensi (24 pada 3 dimensi) merupakan pilihan default. Sedangkan, CAFVM membutuhkan spesifikasi jumlah sel

(N) dan N pada arah polar (θ) dan azimuth (ϕ) sebagaimana digambarkan di bawah ini.

dan diambil dengan mengacu ke total jumlah sel kendali di dalam diskritisasi kubah unit penuh.



Gambar II-1. Diskretisasi kubah unit di dalam CAFVM

Persamaan *discrete-ordinate* dapat ditulis sebagai berikut:

$$\begin{matrix} + & + \\ \hline & \hline \end{matrix}$$

$$= -(+) ++$$

$$\Sigma = \dots$$

(persamaan 13)

- Di mana,
- m = arah keluar
 - m' = arah masuk
 - W_m = berat (untuk arah m)
 - α = cosinus arah x
 - β = cosinus arah y
 - γ = cosinus arah z

Pada kondisi keseimbangan termodinamika lokal, panas radiatif netto di dalam sel komputasi sama dengan selisih antara energi yang diserap dan energi yang dilepaskan yang digambarkan oleh persamaan 19.

$$= \Sigma \nu \Sigma$$

$$\Sigma$$

$$-] \dots$$

(persamaan 14)

di mana, $V = \text{volume sel}$

Model radiasi *Discrete Ordinates Model* or DOM cocok untuk digunakan pada media hantar pekat dan memiliki akurasi arah yang baik. Model ini menyelesaikan persamaan perpindahan radiatif (RTE) untuk jumlah *discrete solid angles* terbatas yang masing-masing diasosiasikan dengan arah vektor dan bersifat tetap pada sumbu Cartesian. Kelemahan model ini terletak saat diaplikasikan pada media multifase yang dipengaruhi oleh suhu dan properti radiasi dari fase-fase yang berbeda. DOM juga tidak begitu akurat untuk media yang tipis secara optik. Properti radiatifnya juga sangat tergantung pada panjang gelombang cahaya (ESI Group, 2014).

Penerapan DOM untuk menganalisa suhu pada penyerap radiasi matahari distudi oleh Gomez dkk. (2013). Karena DOM tidak cocok untuk simulasi bahan yang dapat berubah fase di mana properti suhu dan radiasi dari fase-fase berbeda seharusnya diperhitungkan, Gomez dkk. melakukan modifikasi dengan mempertimbangkan pengaruh fase padat dan gas. Hasil

modifikasi berhasil memperbaiki tingkat akurasi DOM jika dikomparasikan data pengukuran (Gomez dkk., 2013).

Metode *Control Angle Finite Volume Method* (CAFVM) merupakan prosedur solusi aliran fluida yang populer karena mampu menyelesaikan secara eksak melalui persamaan konservasi pada area tertentu (*finite volume*). Penggantian kuadratur pada DOM dengan *finite solid angles* pada FVM tidak hanya menyelesaikan permasalahan konservasi energi, tetapi juga memantapkan metode yang menggunakan filosofi dan grid komputasi yang sama dengan penyelesaian aliran fluida. Berdasarkan studi yang dilakukan oleh Chai (1994) dan Raithby (1999), FVM memiliki tingkat kinerja dan akurasi yang lebih baik. Raithby (1999) melakukan studi komprehensif tentang kesalahan diskritisasi spasial dan angular dengan persamaan-persamaan diskrit pada FVM yang diturunkan untuk media abu-abu (tidak tergantung pada panjang gelombang). FVM dapat diaplikasikan pada media non abu-abu. Pendekatan abu-abu yang digunakan untuk penyederhanaan.

II.2.4 Metode Monte Carlo (MC)

Pada metode Monte Carlo (MC) dengan skim *ray tracing*, pancaran energi dilepas dari sebuah permukaan dan dilacak hingga diserap oleh permukaan yang sama atau permukaan lainnya dengan menggunakan angka-angka secara acak untuk memastikan pada arah mana foton akan diproses setelah peristiwa penyebaran. Proses ini diulang-ulang untuk ratusan bahkan jutaan foton hingga mencapai jalur yang akan diikuti oleh foton-foton. Semakin banyak foton yang digunakan akan semakin kecil gangguan di dalam menghasilkan gambar (*Monte Carlo noise*).

Secara umum persamaan perpindahan secara radiasi pada metode MC dapat dipecahkan dengan melacak foton atau pancaran energi melalui *discrete control volume*. Absorpsi, emisi dan penyebaran panas terjadi di dalam setiap volume kendali. Oleh karenanya, metode ini merupakan metode yang boros secara komputasi (ESI Group, 2014).

Perpindahan energi antara beragam permukaan aktif secara radiasi dapat digambarkan dengan persamaan 15.

$$S = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{A_i} \delta_{ij} = \sum_{j=1}^n \frac{Q_j}{A_j} \dots \dots \dots \text{(persamaan 15)}$$

Di mana,

- Q_i = heat flux (W)
- q_i = kepadatan heat flux (W/m^2)
- A_i = area (m^2)
- δ_{ij} = kronecker delta
- ϵ_j = emisivitas dari permukaan aktif secara radiasi j
- R_{ij} = matriks perpindahan radiasi (pecahan radiasi yang dilepas oleh permukaan aktif secara radiasi i dan diserap oleh permukaan aktif secara radiasi j)
- T_i = suhu rata-rata permukaan aktif secara radiasi j (K)

Dapat dikatakan, MC merupakan satu dari metoda yang paling akurat untuk kalkulasi perpindahan panas secara radiatif karena kemampuannya mengkomputasi semua arah perpindahan panas secara radiatif dalam arus secara kontinyu dan menghitung osilasi yang kuat di dalam properti radiatif. MC juga merupakan satu-satunya metode yang dapat menyelesaikan perpindahan panas radiatif pantulan non-difus dari dinding.

Metode MC tidak dapat menyelesaikan perpindahan panas radiatif melalui gas hantar. Media penghantar yang bisa dikalkulasi adalah yang ada di dalam benda padat. Model ini tidak mendukung interaksi langsung antara dua benda padat semi transparan dan tidak dapat digunakan pada dinding yang tipis (ESI Group, 2014).

II.3 PENGUKURAN EMPIRIS KINERJA TERMAL

Pengukuran empiris merupakan metode validasi program simulasi yang dapat menghasilkan baku kebenaran yang mendekati kondisi nyata. Dua metode validasi yang lain adalah metode analitik dan uji komparasi antar program simulasi. Meskipun kedua metode terakhir ini berbiaya rendah, tetapi hanya dapat dilakukan untuk kasus sederhana dan tertentu saja (untuk metode analitik) atau tidak menghasilkan baku kebenaran yang mendekati kondisi nyata (untuk metode uji komparasi).

Pengukuran empiris bertujuan untuk memperoleh data monitoring dari bangunan nyata, *test cell* atau eksperimen laboratorium yang nantinya dikomparasikan dengan hasil simulasi. Oleh karena itu, kedekatan dengan baku kebenaran kondisi yang nyata sangat ditentukan oleh

akurasi dan tingkat kerumitan pengukuran empiris. Ketidakpastian eksperimental dapat terjadi disebabkan oleh kalibrasi instrumen pengukuran, diskritisasi spasial/temporal atau pengetahuan yang kurang sempurna tentang obyek eksperimen yang disimulasikan (Judkoff, 2008). Struktur bangunan yang dijadikan obyek pengukuran oleh Judkoff (2008) diklasifikasikan menjadi *test box*, *test cell*, rumah kosong, rumah berpenghuni, dan bangunan komersial berpenghuni. Masing-masing memiliki kelebihan dan kelemahan. Penentuan macam struktur bangunan ditentukan oleh jenis data monitoring yang dibutuhkan atau tingkat kerumitan kasus yang disimulasi, maupun biaya. Paparan berikut menjelaskan gambaran fasilitas uji yang ada berikut proses monitoringnya.

II.3.1 Kualitas data hasil pengukuran empiris

PASSYS (Strachan, 1993) memberikan batasan kriteria bagi data yang dapat dikelompokkan sebagai data dengan kualitas tinggi harus bersifat komprehensif, rinci, dengan ketidakpastian yang kecil, dicek dan dibersihkan, serta didokumentasikan secara utuh. Lebih lanjut metodologi validasi empiris diperbaiki oleh Lomas dkk. (1997) yang menguraikan 9 kriteria yang dibagi menjadi 3 kelompok, yaitu:

a. Rangkaian data yang dapat diterima

1. Struktur bangunan harus tidak termasuk sistem pemanasan maupun penyejukan ruang dengan sistem surya aktif.
2. Data cuaca harus dikumpulkan pada tapak bangunan tersebut.
3. Data kinerja bangunan yang diukur dan data cuaca harus tersedia minimal pada interval per jam.

b. Rangkaian data yang berguna

Mencakup 3 kriteria rangkaian data yang dapat diterima dengan penambahan kriteria sebagai berikut:

4. Semua dari 3 elemen utama cuaca, yaitu: suhu udara, kecepatan angin, radiasi matahari langsung dan difus harus diukur pada tapak bangunan untuk periode perbandingan secara menyeluruh.
5. Struktur bangunan tidak ditinggali dan tidak berisi komponen surya pasif yang secara eksplisit tidak dapat dimodelkan dan setiap zona di dalam bangunan harus memiliki pengendali instalasi pemanas dan atau penyejuk sendiri.

6. Infiltrasi yang diukur dan di mana perlu tingkat aliran udara antar zona tersedia untuk perioda perbandingan secara menyeluruh.

c. Rangkaian data berkualitas tinggi

Mencakup kriteria 1-6 dengan penambahan kriteria sebagai berikut:

7. Struktur bangunan tidak berisi komponen atau sistem pengendali lingkungan yang tidak dapat dimodelkan secara eksplisit oleh program yang divalidasi.
8. Media data harus bertipe siap pakai dan berhubungan dekat dengan institusi yang memonitor.
9. Data untuk tapak yang belum pernah menghasilkan data untuk validasi untuk data tersebut, karena kesalahan eksteral, dengan ketidakpastian yang tidak dapat diterima yang sudah dikenali, harus tidak diikuti.

II.3.2 Metodologi validasi empiris

Metodologi validasi empirik lebih lanjut diperbaiki di dalam IEA-SHC Task 22 dan dijelaskan secara rinci oleh Palomo Del Barrio dan Guyon (2003). Di situ diuraikan bahwa tujuan prinsip dari validasi empirik adalah untuk membandingkan perilaku sistem yang aktual yang sesuai dengan kompleksitas dunia nyata yang diprediksikan oleh model komputer. Komponen penting dari validasi empirik adalah untuk membuat perbandingan antara data yang diukur dan data yang diprediksikan dari model komputer yang bersangkutan. Dalam kerangka ini, diusulkanlah metode untuk pengecekan validitas model, yaitu:

- Analisis sistematis dari residu yang berisi deteksi pola-pola tidak tetap, kalkulasi rata-rata dan standart deviasi, serta analisis fungsi kepadatan spektral.
- Perbandingan antara pengukuran dan simulasi yang mempertimbangkan gangguan pengukuran dan ketidakpastiam data input model. Persetujuan antara model dan kenyataan dinyatakan baik jika tumpang tindih signifikan antara rangkaian ketidakpastian simulasi dan pengukuran.
- Estimasi ranah spektral dari aplikasi model tersebut yang memberikan batasan jangkauan frekuensi dari eksitasi di mana tidak ada perbedaan signifikan antara model simulasi dan pengukuran yang diharapkan.

Strachan dkk. (2015) menguraikan 9 langkah yang diterapkan sebagai metodologi validasi empiris dengan menggunakan model bangunan berskala 1:1. Tiga dari sembilan langkah yang penting dilakukan pada studi ini sebagai persiapan validasi empiris adalah:

1. Desain eksperimental. Memodelkan bangunan terpilih dengan menggunakan serangkaian data iklim lokal yang mewakili. Tujuan pertama dari langkah ini adalah untuk mendesain eksperimen menyeluruh dengan menentukan konstanta waktu bangunan, sekuens uji yang cocok, besarnya input panas dan variasi pada suhu internal. Tujuan kedua untuk mendesain skim monitoring dengan uji sensitivitas untuk mengidentifikasi parameter simulasi penting yang perlu untuk diukur.
2. Persiapan eksperimen dengan mengkalibrasi dan memasang semua sensor yang disyaratkan, menginstal dan mengecek sistem pengambilan data dan memprogram penyejuk udara yang disyaratkan.
3. Spesifikasi eksperimen dengan mengembangkan spesifikasi yang menggambarkan semua parameter bangunan untuk pemodelan.

Lebih lanjut dipaparkan persyaratan utama yang harus dipertimbangkan di dalam memilih bangunan yang digunakan sebagai fasilitas uji (Strachan dkk., 2015), yaitu: ketersediaan bangunan selama pengujian, detail-detail bangunan dan sistem yang ada di dalamnya terdokumentasi, peralatan yang dikalibrasi tingkat tinggi, kemampuan memisahkan bagian-bagian bangunan untuk pengujian awal, pilihan peralatan pemanas/penyejuk ruangan, dan tidak dihuni (untuk mencegah ketidakpastian yang signifikan).

II.3.3 Pengukuran Properti Termal Bahan di Lapangan

a. Konduktivitas Termal

Validasi hasil simulasi dari program komputer merupakan salah satu fungsi pengadaan fasilitas uji. Untuk memperoleh hasil validasi yang dapat diandalkan, properti fisik bahan-bahan fasilitas uji maupun benda uji menjadi salah satu faktor penentu. Untuk mendapatkan data properti fisik (terutama resistansi termal atau R-value) bahan fasilitas uji (yang sudah dibangun di lapangan) secara umum dapat menggunakan 2 cara, yaitu: (1) *destructive sampling method*, dan (2) *non destructive method*.

Destructive sampling method yaitu dengan melubangi elemen yang akan dicari untuk melihat elemen-elemen penyusun berikut ketebalannya. Selanjutnya R-value dihitung dengan menggunakan nilai-nilai R-value setiap elemen penyusun yang diperoleh dari pabrik atau hasil pengukuran laboratorium yang sudah disertifikasi (dapat diperoleh pada standart UNI 10351:1994) dan persamaan 4 (mengacu ke ISO 6946:2008).

=
(persamaan 4)

Non destructive method. *Non destructive method* merupakan cara untuk menentukan R-value yang dapat memberikan hasil yang lebih akurat dengan menentukan gradien suhu dari hasil pengukuran *heat-flux* di lapangan (Desogus et al., 2011). Metode kedua akan dijelaskan lebih rinci pada alinea-alinea berikutnya. Secara garis besar ada 2 kondisi yang dapat dipilih untuk mendapatkan nilai R-value dengan *non destructive method*, yaitu: *steady-state* dan dinamis. Cara *non destructive method* ini juga digunakan pada pengujian dengan fasilitas uji yang disebutkan pada bagian II.2.1 Fasilitas Uji. Akurasi hasil sangat ditentukan oleh akurasi pengukuran suhu permukaan dan *heat-flux* yang berkaitan dengan jumlah, tipe, lokasi dan perlindungan sensor. Tujuh puluh dua jam merupakan waktu pengukuran untuk setiap sample bahan yang dianggap cukup. Semakin kecil perbedaan suhu di dalam dan di luar ruangan (<10 K) akan semakin kurang akurat hasilnya. Dengan menggunakan *thermal chamber* yang merupakan rangkaian dari *cold chamber* dan *warm chamber*, perbedaan suhu dapat diatur (Desogus et al., 2011).

Transmitansi termal bahan (U-value) atau resistansi termal bahan (R-value) dapat diperoleh dari pengukuran aliran panas (Q) yang melalui elemen bangunan dan suhu pada kedua permukaannya (luar: T_{out} dan dalam: T_{in}) dengan mengacu standart ISO 9869:19974. Cara ini akan menghasilkan U-value yang akurat jika aliran panas berlangsung dalam kondisi *steady-state* (Tadeu et al., 2014) dengan menggunakan rumus berikut ini:

=
(persamaan 5)

Dengan menambahkan sensor suhu pada permukaan dinding (T_{ddg}) dapat dihitung resistansi termal bahan dengan persamaan 6.

$$\dots\dots\dots(persamaan 6)$$

Untuk kondisi luar yang dinamis ada dua cara yang dapat digunakan. Cara pertama dengan melakukan pengukuran dalam rentang waktu yang lama sehingga dapat diperoleh estimasi yang tepat untuk perilaku *steady-state* ekuivalen. Ini merupakan cara yang sederhana tetapi kurang akurat, kecuali jika efek *thermal mass* bahan diabaikan. Jika aliran panas berubah arah, maka hasilnya menjadi tidak akurat.

Cara kedua dengan menerapkan model dinamis yang memperhitungkan variasi suhu permukaan dan tingkat aliran panas. Metode dinamis yang dikembangkan oleh Roulet dkk. (1987) memperhitungkan variasi termal di dalam persamaan perpindahan panasnya. Metode ini melakukan komputasi tingkat aliran panas dari pengukuran suhu di lapangan (dengan 2 buah heat flow meter dan beberapa sensor suhu permukaan) melalui serangkaian persamaan linear yang dapat ditulis dalam persamaan matriks sebagai berikut:

$$= () \dots\dots\dots(persamaan 7)$$

Dengan z:

$$= () ()^{-1} () = () \dots\dots\dots(persamaan 8)$$

Di mana $(X)^T$ = transposed matriks (X)

Metode ini memberikan hasil yang cukup akurat untuk pengukuran 6, 12 dan 24 jam. Waktu pengukuran yang lebih lama memberi hasil yang tidak sebaik lama pengukuran tersebut. Lamanya pengukuran juga harus disesuaikan dengan tebal material. Untuk bahan yang sangat ringan pengukuran 1 malam sudah cukup.

Cara dinamis yang digunakan oleh Desogus et al. (2011) melalui pengukuran suhu permukaan dan *heat-flux* pada/di dalam *thermal chamber*. R-value dihitung dengan menggunakan persamaan 9.

$$= \frac{\Sigma_{=1}^{-}}{\Sigma_{=1}^{-}} \dots\dots\dots(persamaan 9)$$

Solar reflectance (daya pantul) bahan dapat diukur pada panjang gelombang radiasi matahari dari 250 hingga 2500 nm dengan spektrofotometer yang kemudian dikomputasi dengan program GLAD berdasarkan EN 410 (Manz, 2004).

b. Emisivitas Bahan

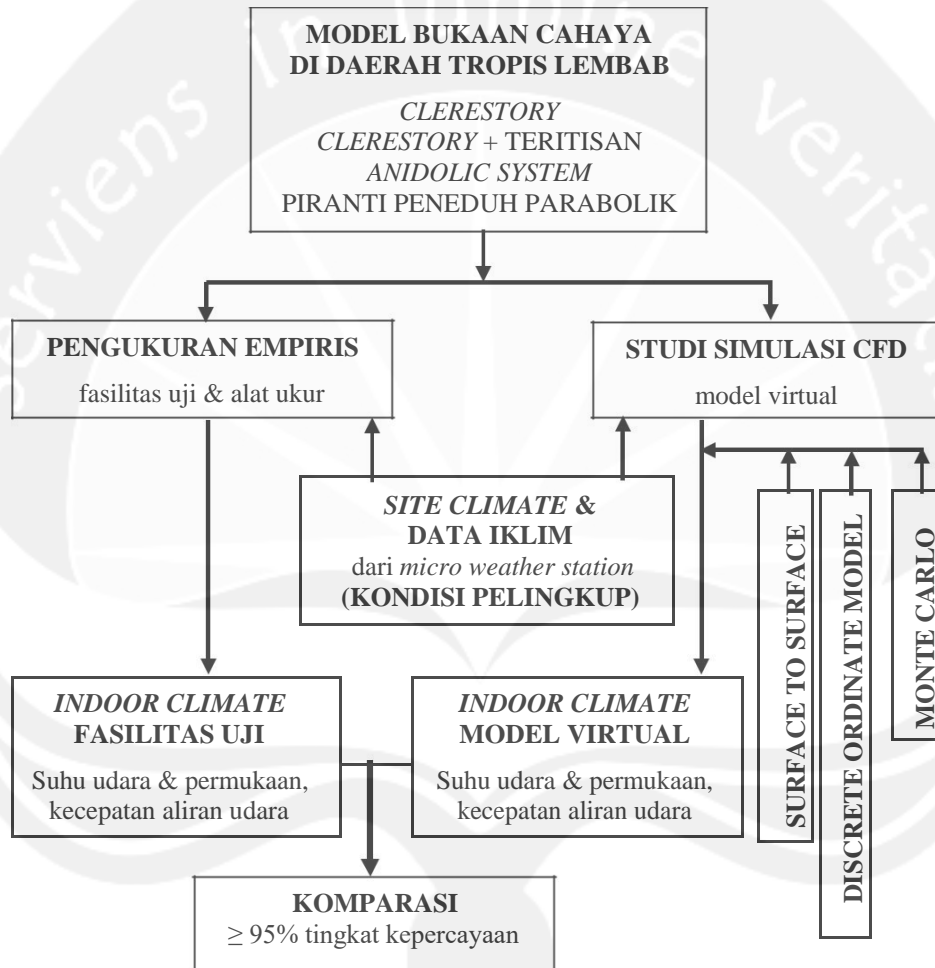
Besarnya emisivitas bahan merupakan perbandingan dari besarnya radiasi permukaan dan besarnya radiasi benda hitam. Rentang nilai emisivitas bahan adalah 0 hingga 1 (emisivitas benda hitam). Nilai emisivitas bergantung pada jenis bahan, karakteristik permukaan, sudut dan arah emisi, panjang gelombang atau spektrum infra merah, dan suhu permukaan. Besarnya emisivitas benda hitam dapat diukur dengan menggunakan termometer infra merah yang dikalibrasi dengan sumber benda hitam atau benda dengan bahan yang menyerap semua panjang gelombang. Menurut Rakruengdet dkk. (2016) ada 6 macam emisivitas yang ditentukan oleh panjang gelombang dan arah radiasi, yaitu: (1) emisivitas arah spektrum, (2) emisivitas hemisferik spektrum, (3) emisivitas arah total, (4) emisivitas hemisferik total, (5) emisivitas pita, dan (6) emisivitas efektif.

Ada beberapa cara yang dapat digunakan untuk menentukan nilai emisivitas bahan. Karena emisivitas merupakan fungsi dari kondisi permukaan bahan dan suhu permukaan, pengukuran emisivitas bahan dapat dilakukan dengan kamera infra merah. Pengaruh sudut pengambilan gambar pada suhu permukaan bahan yang diukur dengan kamera infra merah (termografi) perlu dipahami agar hasil pengukuran emisivitas valid. Oleh karena itu, diperlukan konsistensi besarnya sudut terhadap permukaan bahan. Pengaruh sudut pengukuran semakin besar pada bahan yang berdaya pantul tinggi (Fronapfel dan Stolz, 2006). Rakruengdet dkk. (2016) menganjurkan suhu permukaan yang diukur harus lebih tinggi daripada suhu di sekitarnya. Pada pengukuran di laboratorium untuk menciptakan kondisi tersebut dapat dilakukan dengan pemanasan sampel bahan.

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 TERMAL BUKAAN CAHAYA

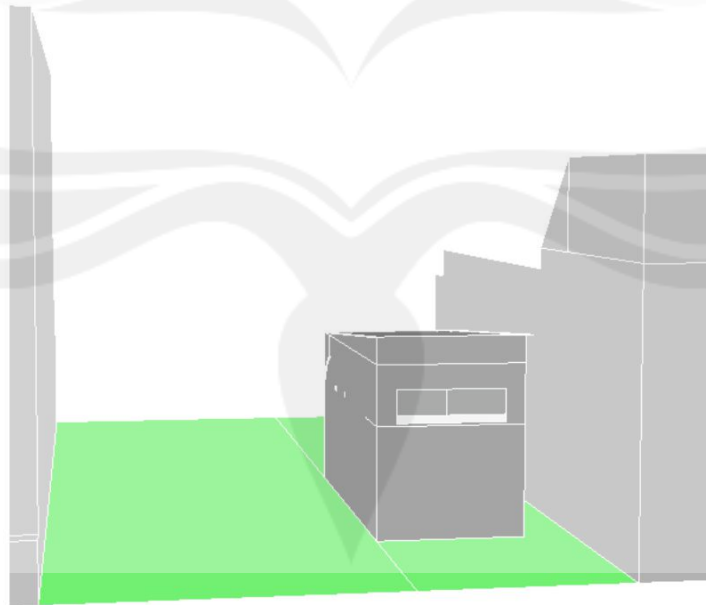
Kinerja termal suatu ruangan/bangunan terkait dengan tingkat kenyamanan termal yang dicapai. Tingkat kenyamanan termal dapat diukur dengan menggunakan indeks lingkungan.

Ada beberapa indeks lingkungan, tetapi pada prinsipnya indeks tersebut dapat ditentukan dari kombinasi 2 atau lebih tolok ukur sebagai berikut: suhu udara, *mean radiant temperature*, kelembaban, dan kecepatan aliran udara (ASHRAE, 2009). Pengukuran empiris akan dilakukan untuk mengetahui 4 tolok ukur tersebut, tetapi hanya 3 tolok ukur, yaitu: suhu udara, *mean radiant temperature*, dan kecepatan aliran udara, yang akan disimulasikan dengan program CFD.

III.3 VARIASI MODEL BUKAAN CAHAYA

Ada 4 variasi bukaan cahaya yang akan distudi, yaitu: *clerestory* saja, *clerestory* dengan teritisan, AS dan piranti peneduh parabolik. Keempat variasi memiliki ukuran bukaan cahaya yang sama, yaitu lebar 255 cm dan tinggi 60 cm. Di dalam ruangan dan di bawah bukaan cahaya terdapat panel horisontal dengan panjang sesuai dengan panjang bersih ruangan dan lebar 120 cm. Panel horisontal terbuat dari bahan yang sama dengan bahan plafond yaitu gipsum yang dicat putih murni.

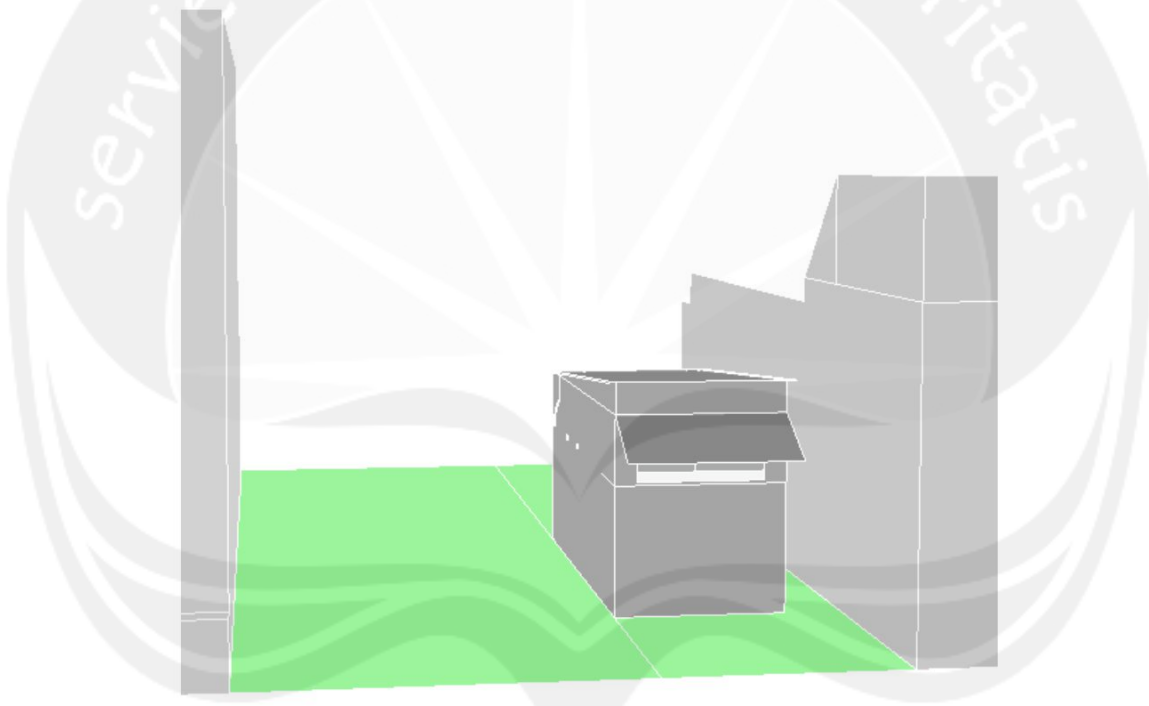
III.3.1 Bukaan Cahaya Atas (*Clerestory*)



Gambar III-2. Model uji dengan bukaan cahaya atas (*clerestory*) tanpa peneduh

Bukaan cahaya atas termasuk jendela vertikal yang paling dasar yang ditempatkan di bagian atas dinding guna penetrasi cahaya alami secara maksimal sesuai dengan perbandingan antara tinggi dinding terhadap lebar ruangan. Karena posisinya yang ada di bagian atas dan terpapar radiasi matahari (tanpa peneduh), keberadaan bukaan cahaya atas dapat menyebabkan buoyancy di dalam ruangan. Bidang kaca ekspos tanpa peneduh juga menyebabkan efek penurunan suhu permukaan bidang kaca secara konveksi akibat aliran angin menjadi relatif leluasa.

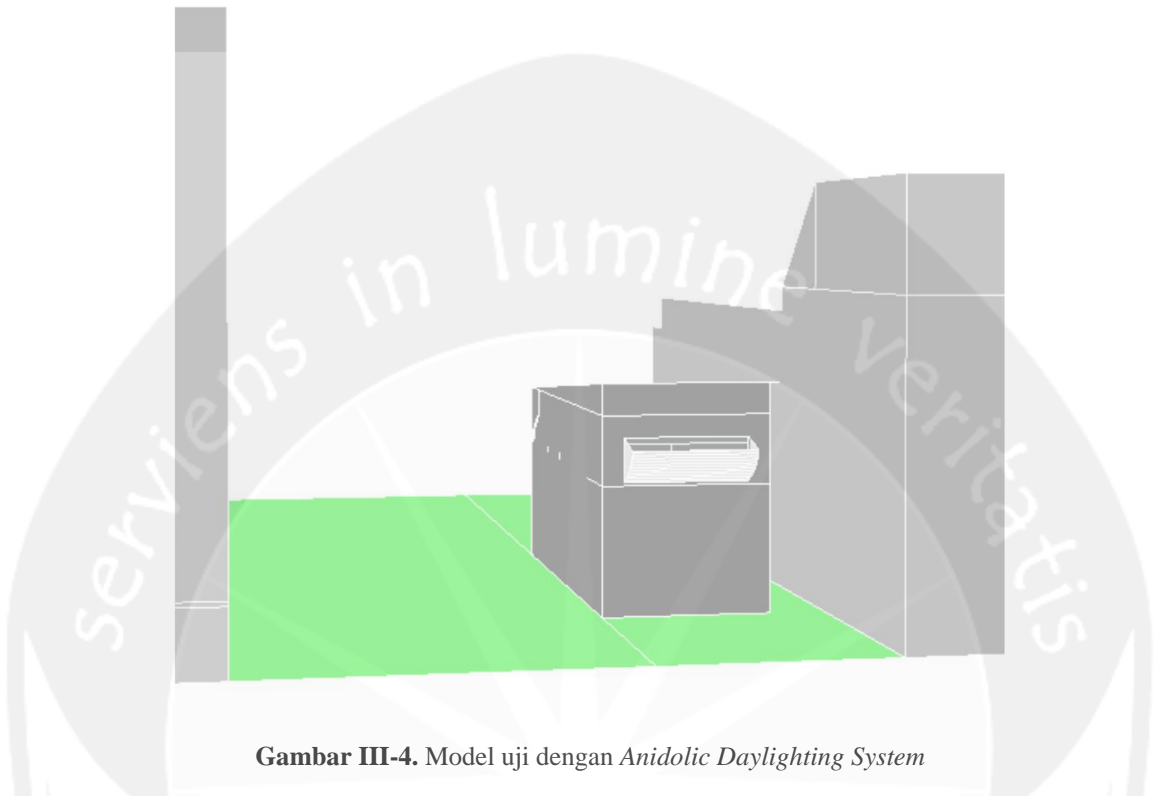
III.3.2 Clerestory dengan Teritisan



Gambar III-3. Model uji dengan bukaan cahaya atas dengan peneduh

Piranti peneduh horisontal yang dimiringkan (teritisan) merupakan jenis peneduh yang dikenal efektif mencegah masuknya radiasi matahari langsung. Namun, keberadaan teritisan juga mengurangi tingkat terang di dalam ruangan dari cahaya alami sehingga cenderung menciptakan nuansa suram. Teritisan juga menghambat efek penurunan suhu permukaan bidang kaca secara konvektif.

III.3.3 Anidolic Daylighting System (ADS)

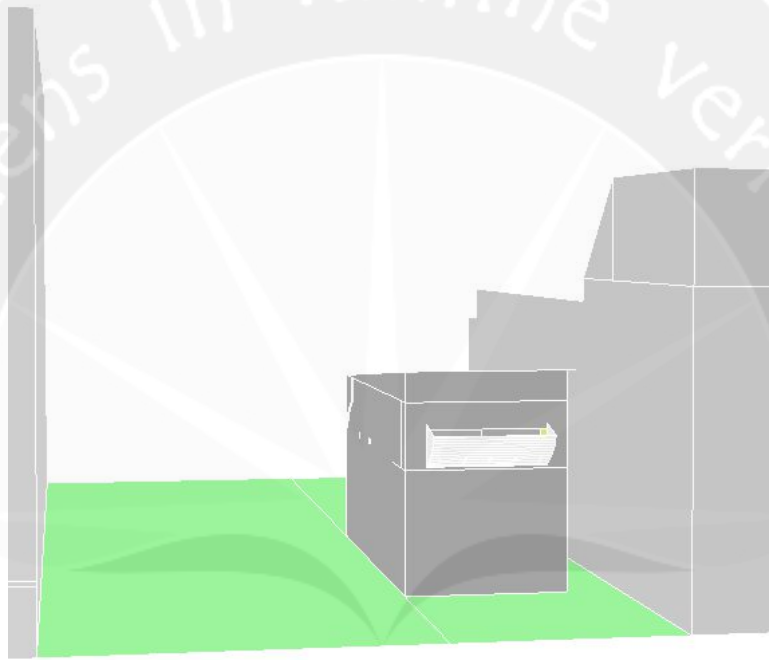


Gambar III-4. Model uji dengan *Anidolic Daylighting System*

ADS dan piranti peneduh parabolik (ASS) menggunakan kolektor parabolik berbahan stainless steel dengan sudut sebaran cahaya 52° , lebar 57 dan tinggi 70 cm. Hasil studi tentang ADS membuktikan ADS mampu menciptakan pencahayaan alami yang sangat efisien. Namun, aplikasi ADS di daerah tropis lembab menunjukkan tingginya radiasi panas yang terkumpul yang akan berpengaruh secara signifikan pada beban penyejukan (ruangan ber-AC) atau suhu udara ruangan (ruangan dengan ventilasi alami). Keberadaan bidang kaca horisontal di bagian atas yang terekspos memungkinkan penurunan suhu permukaan bidang kaca secara konvektif, meskipun kemungkinan efek yang dihasilkan kecil terlebih jika dibandingkan dengan efek perpindahan panas secara radiasi.

III.3.4 Clerestory dengan Piranti Peneduh Multifungsi

Piranti peneduh parabolik (ASS) merupakan piranti peneduh dalam bentuk kolektor parabolik berbahan stainless steel dengan sudut sebaran cahaya 52° lebar 57 dan tinggi 70 cm, yang diberi lubang ventilasi pada bagian bawah dan pada badan kolektor. Pada model ASS ini bidang kaca dimasukkan ke dalam ruangan dengan kedalaman 40 cm. Efek penurunan suhu bidang kaca ASS secara konvektif dibahas secara detail oleh Binarti (2016)



Gambar III-5. Model uji dengan *Piranti Peneduh Parabolik*

III.4 PENGUKURAN EMPIRIS

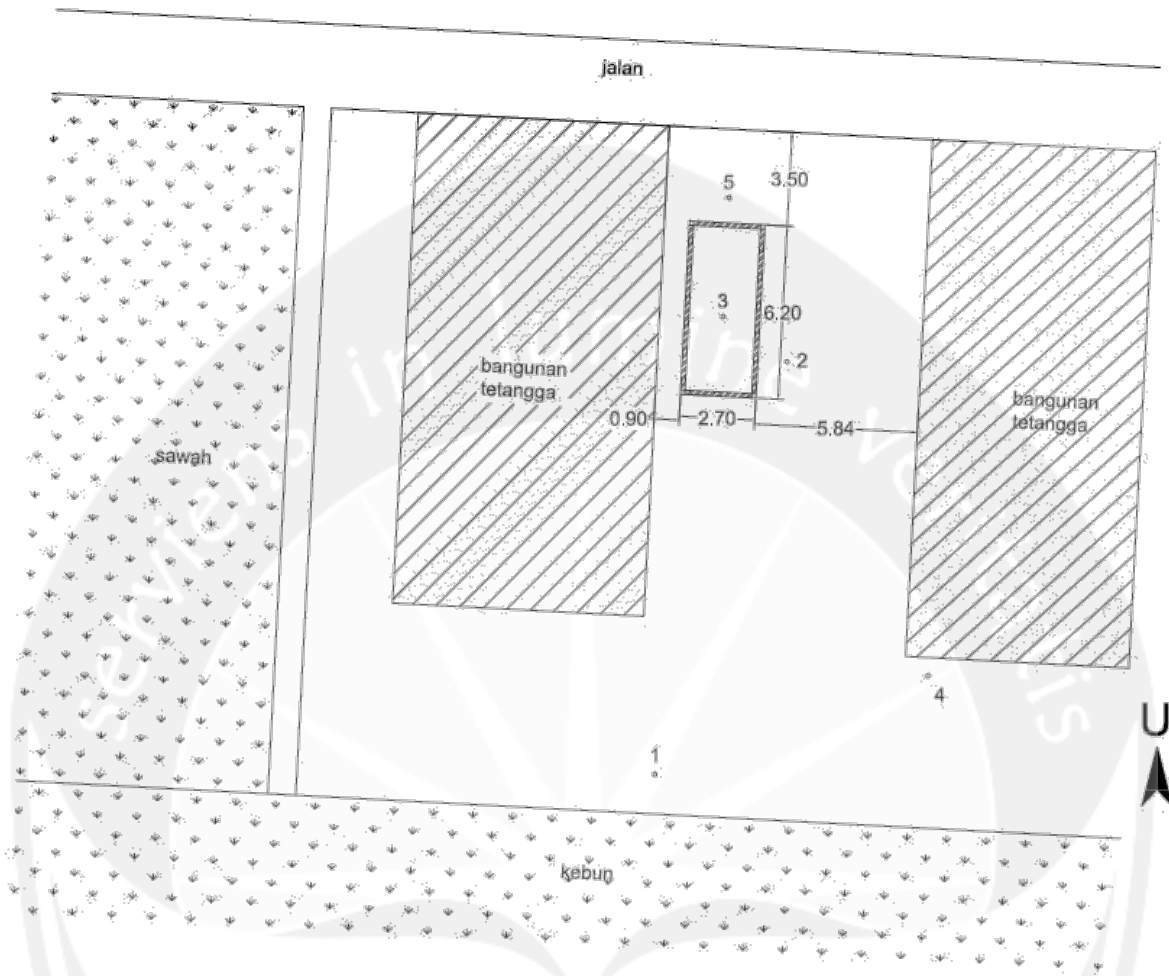
III.4.1 Fasilitas Uji

Secara geografis fasilitas uji berada di $-7^{\circ} 49'24.55''$ Lintang Selatan dan $110^{\circ} 24'31.56''$ Bujur Timur. Fasilitas ini terletak di daerah permukiman dengan kepadatan rendah hingga menengah karena sebagian lahan di sekitarnya masih kosong di Desa Jaranan, Kecamatan Banguntapan, Kabupaten Bantul, Provinsi D.I. Yogyakarta (**Gambar III-6**). Lahan di Utara tapak masih berwujud perkebunan tebu/jagung yang diselingi dengan pertanian kacang tanah

dan rumah-rumah penduduk dengan posisi membujur. Lahan di sisi Utara berbatasan dengan jalan lingkungan yang berada di antara tapak dan perkebunan. Sisi Timur tapak berbatasan dengan rumah tinggal 3 lantai yang memenuhi hampir 100% tapak yang dimiliki. Bangunan bertingkat ini menciptakan bayangan pada sebagian hingga keseluruhan bangunan pada pagi hari. Lahan di sisi Selatan tapak masih kosong dengan rumput liar dan beberapa semak belukar yang menutup lahan. Di sisi Barat tapak berdiri bangunan rumah tinggal 1 lantai yang sedang dalam proses pembangunan. Bangunan baru yang hanya berjarak sekitar 1 m dari bangunan uji menciptakan pembayangan yang intensif mulai sekitar pkl. 14.00.

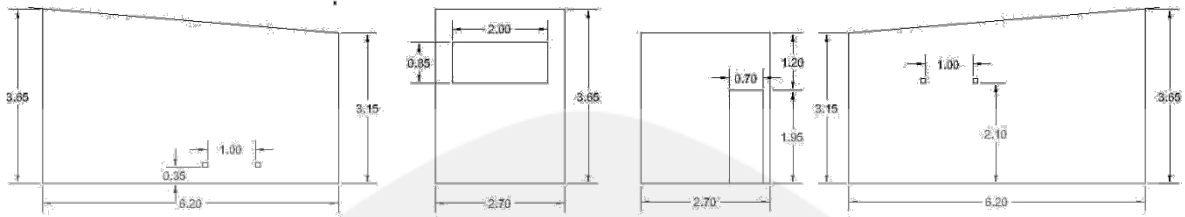


Gambar III-6. Situasi fasilitas uji (sumber: Google earth, 2015)



Gambar III-7. Rencana tapak fasilitas uji dan posisi pengukuran

Fasilitas uji berupa sebuah bangunan dengan ukuran seperti yang ditampilkan pada **Gambar III-7** dan **Gambar III-8** Bukaannya ditempatkan pada dinding sisi Utara, tepatnya membentuk sudut 3° terhadap arah Utara (sudut azimuth). Dengan posisi ini bukaan cahaya dibayangi oleh bangunan bertingkat di sisi Timur pada pagi hari (**Gambar III-7**).



Gambar III-8. Dari kiri ke kanan: tampak samping kiri, tampak belakang, tampak muka dan tampak samping kanan fasilitas uji berikut ukurannya.

III.4.2 Pengukuran Properti Termal Bahan Fasilitas Uji

Tabel III-1 menjelaskan bahan-bahan penyusun fasilitas uji berikut properti termal yang mengacu ke sumber tertentu.

Tabel III-1. Properti termal dan optis bahan bangunan penyusun fasilitas uji

Elemen bangunan	Bahan	t	k	d	c	a
Dinding	Pasangan batako ½ batu diplester kedua sisi	120				
Lantai	Semen dicat coklat tua	100	0,38	1200	1000	0,6
Pintu	PVC putih	35	0,17	1390	900	0,1
Plafond, rak cahaya internal, dan difuser	Gypsum dengan rangka kayu dicat putih murni	13	0,16	640	1150	0,1
Atap dan teritisan dengan rangka kayu	asbes	25	0,36	700	1050	0,6
Kolektor parabolik	Stainless steel	1	17	7900	460	0,2
Elemen bangunan	Bahan	t	U	SHGC	VLT	
Bidang transparan	Kaca bening 5 mm	5	5,778	0,881	0,819	

Catatan:

t = tebal (mm); k = konduktivitas termal (W/m.K); d = kepadatan (kg/m^3); c = panas spesifik (J/kgK); a = solar absorptance; U = transmitansi termal ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$); SHGC = solar heat gain coefficient; VLT = visible light transmittance.

Sebelum dilakukan pengukuran kinerja termal bukaan cahaya, bahan-bahan penyusun fasilitas uji yang belum diketahui properti termalnya yang baku, dilakukan pengukuran properti termal di lapangan (*on-site measurement*). Hampir semua bahan penyusun tidak mengalami perubahan bentuk atau tambahan bahan penyusun dari bahan yang diproduksi oleh pabrik.

Hanya bahan dinding saja yang mengalami penambahan plesteran. Untuk nilai k semua bahan (kecuali dinding) mengacu ke nilai baku yang dikeluarkan oleh pabrik atau referensi.

Emisivitas bahan diukur dengan menggunakan kamera infra merah. Emisivitas stainless steel (Rakruengdet dkk., 2016):

Jenis bahan	Panjang gelombang (μm)	Suhu (K)	Emisivitas	Sumber
Stainless steel	8-14	303-473	0,34-0,52	T. Suesut, N. Nunak, T. Nunak, A. Rotrugs, and Y. Tuppadung, 2011 ²
	8-14	323-473	0,40-0,52	N. Nunak, K. Roonprasag, T. Suesut, and T. Nunak, 2013 ³
	1,5	300-1600	0,40-0,17	F.P. Incropera, D.P. DeWitt, T.L. Bergman, and A.S. Lavine, 2007 ⁴

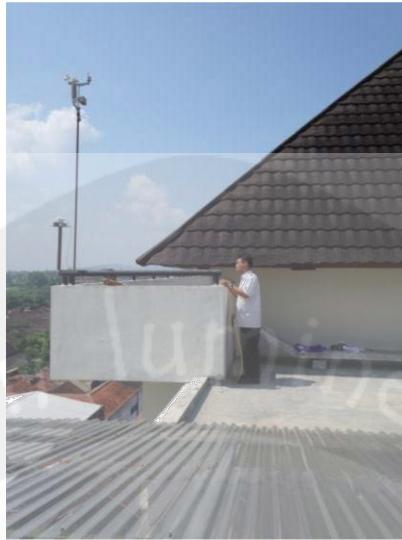
III.4.3 Pengukuran Kinerja Termal Bukan Cahaya

Karena pengukuran empiris kinerja termal keempat variasi bukaan cahaya tidak dilakukan pada saat yang sama, sangat penting untuk melakukan pengukuran kondisi iklim di sekitar fasilitas uji. Studi ini akan menggunakan kondisi iklim di sekitar yang diperoleh dari 2 titik pengukuran. Titik 1 ada di dekat fasilitas uji pada lahan yang relatif kosong (terpapar radiasi matahari) merupakan posisi pengukuran radiasi global. Titik 2 terletak di dekat lubang ventilasi merupakan lokasi pengukuran kecepatan angin. Elemen iklim yang diukur berupa suhu udara, kelembaban relatif, kecepatan angin dan radiasi matahari global. Data iklim secara global diperoleh dari hasil pengukuran dengan *micro weather station* yang ditempatkan di atap Gedung Kampus Santa Theresa yang baru yang berada di Kampus Universitas Atma Jaya Yogyakarta di Babarsari, Kabupaten Sleman dengan posisi geografis $7^{\circ}46'51''$ LS and $110^{\circ}24'56''$ BT. (**Gambar III-9**). Data iklim yang diperoleh berupa suhu udara, kelembaban relatif, arah dan kecepatan angin, curah hujan dan radiasi matahari global.

² T. Suesut, N. Nunak, T. Nunak, A. Rotrugs, and Y. Tuppadung, "Emissivity measurements on material and equipment in electrical distribution system", *International Conference on Control, Automation and Systems*, pp. 1259-1263, Oct. 2011.

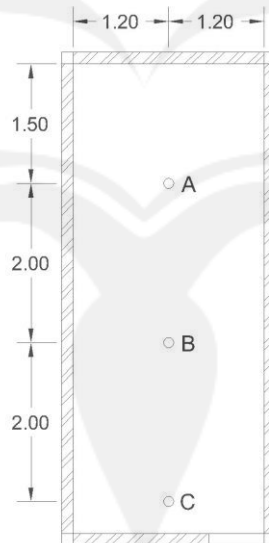
³ N. Nunak, K. Roonprasag, T. Suesut, and T. Nunak, "Emissivity Estimation using Thermographic Camera, *Advanced Materials Research*, Vol. 811, pp. 380-387, 2013.

⁴ F.P. Incropera, D.P. DeWitt, T.L. Bergman, and A.S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6th ed., John Wiley & Sons, 2007, pp. 724 – 839.



Gambar III-9. *Micro weather station* di rooftop gedung Kampus Universitas Atma Jaya Yogyakarta di Babarsari

Pengukuran iklim indoor dilakukan pada 3 titik (titik A, B, dan C) di dalam fasilitas uji dengan ketinggian 50 cm dari atas permukaan lantai (lihat **Gambar III-10**). Suhu permukaan diukur pada setiap titik tengah permukaan interior pelingkup bangunan uji dan titik tengah permukaan eksterior bidang kaca.



Gambar III-10. Posisi 3 titik pengukuran kondisi iklim indoor

Tabel III-2. Tolok ukur dan alat ukur

Lingkup/posisi	Tolok ukur	Alat ukur dan jumlah	Posisi
Iklim lokal	Suhu udara bola kering	Micro weather station	0
	Kelembaban udara relatif	Micro weather station	0
	Arah dan kecepatan angin	Micro weather station	0
	Radiasi	Piranometer Hukseflux	0
Iklim mikro	Radiasi	Power Meter SP2065	1
	Arah dan kecepatan angin	4 in 1 envirometer	2
	Suhu udara bola kering	Hobo UA 002-08	4
Iklim indoor	Suhu udara bola kering	Hobo U12-012	A, B, C
	Kelembaban udara relatif	Hobo U12-012	A, B, C
	Suhu permukaan interior	Kamera infra merah FLiR	3
	Suhu permukaan eksterior	Infra red termometer	5

III.5 METODE SIMULASI

III.5.1 Pemodelan Kinerja Termal Bukaan Cahaya dengan CFD

Untuk mensimulasikan kinerja termal bukaan cahaya dengan CFD-ACE+ model turbulensi yang dipilih adalah model k- ϵ standar dengan kerangka pendekatan matematis RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) yang menyelesaikan persoalan turbulensi melalui berbagai nilai tengah dan operasi rerata. Sedangkan model konduksi merupakan kombinasi dari *pure conduction model* yang menyelesaikan persoalan konduksi murni dari dan ke benda padat lainnya, serta *conjugate heat transfer (CHT)* model untuk mengakomodasi perpindahan kalor dari media padat ke fluida atau sebaliknya.

Kondisi pelingkup menggunakan data iklim tapak yang didukung oleh hasil pengukuran dengan *micro weather station* di Kampus UAJY. Data iklim tapak mencakup suhu udara, kelembaban relatif, radiasi global, dan kecepatan angin. Dari *micro weather station* diperoleh data suhu udara, kelembaban relatif, radiasi global, curah hujan, arah dan kecepatan angin.

Hasil simulasi berupa kontur dan nilai suhu udara, suhu permukaan interior dan kaca, kecepatan dan arah aliran udara. Kelembaban relatif udara tidak ditampilkan pada hasil simulasi.

III.5.2 Simulasi Radiasi dengan Tiga Model Radiasi CFD-ACE+

Setiap model bukaan akan disimulasikan dengan tiga model radiasi CFD-ACE+, yaitu: Surface to Surface Model (STS), Discrete Ordinate Model (DOM), dan Monte Carlo Model (MC). Setiap simulasi menggunakan kondisi pelingkup yang berbeda-beda sesuai dengan kondisi saat model bukaan diukur secara empirik.



IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

IV.1 HASIL PENGUKURAN EMPIRIS

Setiap model bukaan dilakukan pengukuran selama dua hari mulai pkl. 10.30 hingga 13.30 dengan hasil sebagaimana digambarkan pada Tabel IV-1.

Tabel IV-1. Hasil pengukuran empiris empat model bukaan

Jam	Model	Tgl	menit	Titik 1 (indoor)		Titik 2 (indoor)		Titik 3 (indoor)		Outdoor (shading)		Vo m/s	Rad Btuh
				Ti	Rhi	Ti	Rhi	Ti	Rhi	Ti	Rhi		
				(deg C)	(%)	(deg C)	(%)	(deg C)	(%)	(deg C)	(%)		
10.30	ADS	08/09	10,29	31,46	69,71	31,56	70,45	31,26	71,33	32,79	57,95	0,0	80
		10/09	10,29	29,72	71,59	30,39	71,03	30,29	70,95	32,05	56,06	0,5	284
		08/09	10,30	31,28	70,38	31,43	70,84	31,15	71,80	33,00	58,49	0,2	63
		10/09	10,30	29,72	71,59	30,39	70,94	30,24	71,52	32,28	57,53	2,0	282
		08/09	10,31	31,10	70,69	31,31	71,42	31,03	72,21	33,21	58,43	0,0	64
		10/09	10,31	29,74	71,74	30,37	70,99	30,22	71,66	32,36	55,11	0,0	73
	UC	16/09	10,29	29,69	72,88	30,29	73,27	29,79	74,65	34,02	58,39	2,1	270
		17/09	10,29	28,87	75,67	29,17	75,87	29,14	75,84	30,60	70,92	1,1	71
		16/09	10,30	29,64	73,04	30,24	73,32	29,74	74,98	34,10	57,80	2,3	270
		17/09	10,30	28,84	75,84	29,17	75,95	29,14	76,06	30,90	70,97	0	71
		16/09	10,31	29,57	73,22	30,19	73,51	29,72	75,14	34,12	56,95	1,6	272
		17/09	10,31	28,82	75,91	29,17	76,01	29,14	76,48	31,13	68,77	0,4	71
	CE	21/09	10,29	28,74	77,83	29,67	76,44	29,27	77,71	34,62	66,89	0,2	242
		22/09	10,29	29,89	75,71	30,17	77,07	29,82	77,96	33,47	63,05	0,3	260
		21/09	10,30	28,67	78,00	29,57	76,64	29,17	78,02	34,78	65,83	1,4	224
		22/09	10,30	29,82	75,94	30,09	77,19	29,77	78,39	33,68	64,46	0,5	258
		21/09	10,31	28,59	78,24	29,46	76,76	29,09	78,34	34,89	63,00	0,3	235
		22/09	10,31	29,74	76,04	30,07	77,16	29,69	78,59	33,91	66,17	1,4	258
	ASS	01/10	10,29	29,22	77,26	29,69	77,72	29,72	78,35	32,74	65,67	0	277
		03/10	10,29	26,97	80,08	27,75	79,74	27,60	80,19	29,77	75,32	3,1	98
		01/10	10,30	29,19	77,70	29,74	77,92	29,69	78,57	33,05	65,73	0	200
		03/10	10,30	26,97	80,24	27,70	79,86	27,55	80,53	29,94	72,41	0,7	241
		01/10	10,31	29,19	77,89	29,77	77,98	29,72	78,76	33,29	64,25	0	51
		03/10	10,31	26,94	80,37	27,68	79,86	27,51	80,81	30,19	75,37	2,2	262

Jam	Model	Tgl	menit	Titik 1 (indoor)		Titik 2 (indoor)		Titik 3 (indoor)		Outdoor (shading)		Vo	Rad
				Ti	Rhi	Ti	Rhi	Ti	Rhi	Ti	Rhi	m/s	Btuh
				(deg C)	(%)	(deg C)	(%)	(deg C)	(%)	(deg C)	(%)		
11.00	ADS	08/09	10,59	29,57	76,51	30,09	76,97	29,79	76,85	33,89	57,86	1,6	307
		10/09	10,59	29,82	74,40	30,39	73,49	30,07	74,28	35,34	44,48	2,5	224
		08/09	11,00	29,57	76,48	30,09	76,64	29,79	77,57	34,10	56,07	1,1	102
		10/09	11,00	29,82	74,26	30,39	73,86	30,07	74,48	35,42	45,36	2,7	210
		08/09	11,01	29,57	76,31	30,09	76,61	29,79	77,32	34,31	55,07	1,1	81
		10/09	11,01	29,82	74,06	30,39	73,32	30,07	74,34	35,48	45,83	2,6	61
	UC	16/09	10,59	29,24	76,33	29,92	75,71	29,57	77,47	34,78	55,01	2,9	274
		17/09	10,59	28,67	77,62	29,17	78,49	29,12	79,56	33,05	63,08	0,2	125
		16/09	11,00	29,24	76,39	29,92	75,66	29,59	77,62	34,81	54,92	2,4	268
		17/09	11,00	28,69	77,54	29,19	78,55	29,14	79,81	33,16	62,82	1,4	116
		16/09	11,01	29,27	76,42	29,94	75,52	29,59	77,70	34,81	53,72	1,6	270
		17/09	11,01	28,69	77,41	29,19	78,25	29,14	79,76	33,08	61,97	2,2	146
	CE	21/09	10,59	28,02	81,37	28,67	80,31	28,37	82,24	35,56	59,06	1,1	251
		22/09	10,59	29,32	79,14	30,02	79,04	29,62	81,07	35,24	55,50	1,8	289
		21/09	11,00	28,02	81,34	28,67	80,41	28,37	82,29	35,56	59,19	1,8	281
		22/09	11,00	29,32	79,17	30,04	78,91	29,62	81,01	35,29	58,26	0,0	290
		21/09	11,01	28,02	81,37	28,67	80,41	28,37	82,29	35,58	60,64	1,1	284
		22/09	11,01	29,32	79,12	30,07	78,81	29,62	81,04	35,34	56,41	0	277
	ASS	01/10	10,59	29,24	79,70	30,07	79,16	29,84	79,80	34,44	59,31	2,5	237
		03/10	10,59	26,99	82,57	27,48	82,34	27,33	83,06	31,46	69,79	1,5	171
		01/10	11,00	29,27	79,43	30,09	78,73	29,84	79,98	34,41	54,38	3,5	236
		03/10	11,00	26,99	82,57	27,48	82,26	27,36	83,36	31,51	70,18	0,2	188
		01/10	11,01	29,27	79,38	30,09	78,57	29,84	79,82	34,26	54,91	1,7	243
		03/10	11,01	26,99	82,60	27,48	82,31	27,36	83,49	31,56	71,36	1,2	184
11.30	ADS	08/09	11,29	29,82	76,58	30,44	76,65	30,14	77,28	36,85	46,52	0,7	363
		10/09	11,29	29,97	73,64	30,50	72,51	30,27	72,81	33,99	50,16	2,0	284
		08/09	11,30	29,87	76,31	30,50	76,72	30,19	77,82	37,04	45,21	0,5	361
		10/09	11,30	29,99	73,50	30,50	72,17	30,29	72,62	33,84	50,43	0,0	284
		08/09	11,31	29,89	76,40	30,52	76,39	30,22	77,60	37,32	46,88	1,6	368
		10/09	11,31	30,02	73,22	30,55	72,18	30,32	72,88	33,94	52,11	2,0	287
	UC	16/09	11,29	29,69	76,83	30,42	75,02	30,07	77,16	35,26	52,31	3,2	287
		17/09	11,29	29,07	78,77	29,67	79,22	29,49	79,53	32,82	63,87	4,0	122
		16/09	11,30	29,72	76,81	30,44	75,25	30,09	77,16	35,32	52,48	3,4	285
		17/09	11,30	29,09	78,80	29,69	79,09	29,52	79,48	32,72	63,79	2,4	124
		16/09	11,31	29,72	76,56	30,47	75,37	30,09	77,16	35,34	52,52	4,4	288
		17/09	11,31	29,09	78,69	29,69	78,89	29,52	79,54	32,67	65,06	2,7	113
	CE	21/09	11,29	28,39	81,42	29,04	80,92	28,69	82,23	35,53	61,20	0,0	261
		22/09	11,29	29,82	79,49	30,62	78,62	30,14	81,21	36,28	52,25	3,5	144
		21/09	11,30	28,42	81,40	29,07	80,79	28,72	82,26	35,61	63,02	0,0	254
		22/09	11,30	29,82	79,44	30,62	78,32	30,17	80,75	36,07	53,01	2,2	233
		21/09	11,31	28,42	81,40	29,09	80,69	28,72	82,42	35,66	59,33	1,2	264
		22/09	11,31	29,84	79,36	30,65	78,24	30,17	80,54	35,93	52,46	0,0	300
	ASS	01/10	11,29	29,77	78,66	30,67	78,03	30,39	78,85	35,34	54,09	3,2	307
		03/10	11,29	27,21	83,30	27,70	82,83	27,55	83,89	31,64	66,00	0,8	178
		01/10	11,30	29,77	78,61	30,67	77,75	30,42	78,96	35,40	51,47	1,0	306
		03/10	11,30	27,21	83,22	27,70	82,78	27,55	83,82	31,71	67,21	1,4	186
		01/10	11,31	29,79	78,53	30,70	77,92	30,44	78,94	35,42	50,88	1,1	308
		03/10	11,31	27,24	83,15	27,70	82,80	27,58	83,90	31,74	66,35	2,0	170

Jam	Model	Tgl	menit	Titik 1 (indoor)		Titik 2 (indoor)		Titik 3 (indoor)		Outdoor (shading)		Vo	Rad
				Ti	Rhi	Ti	Rhi	Ti	Rhi	Ti	Rhi		
				(deg C)	(%)	(deg C)	(%)	(deg C)	(%)	(deg C)	(%)	m/s	Btuh
12.00	ADS	08/09	11.59	30,419	76,09	31,13	75,08	30,75	76,38	37,59	40,52	1,1	181
		10/09	11.59	30,748	71,67	31,36	71,12	31,08	71,67	34,18	50,02	0,0	276
		08/09	12.00	30,444	75,65	31,13	74,94	30,77	76,21	37,43	40,61	0,0	373
		10/09	12.00	30,773	71,67	31,38	71,27	31,10	71,76	34,18	51,65	0,0	276
		08/09	12.01	30,469	75,32	31,15	74,83	30,80	76,19	37,37	40,80	0,0	200
		10/09	12.01	30,798	71,85	31,41	71,15	31,10	71,85	34,07	50,66	0,0	279
	UC	16/09	11.59	30,268	75,61	31,03	73,81	30,67	75,58	35,82	50,43	2,0	290
		17/09	11.59	29,34	78,47	29,94	78,92	29,72	79,42	31,64	68,59	2,1	295
		16/09	12.00	30,268	75,56	31,03	74,01	30,67	75,66	35,88	49,48	3,1	290
		17/09	12.00	29,34	78,47	29,94	78,84	29,74	79,50	31,69	69,78	4,6	296
		16/09	12.01	30,293	75,51	31,05	73,82	30,70	75,67	35,90	48,38	2,8	290
		17/09	12.01	29,365	78,36	29,97	78,71	29,74	79,58	31,71	66,88	4,0	315
	CE	21/09	11.59	28,891	81,26	29,64	80,70	29,19	82,31	36,28	59,07	0,0	240
		22/09	11.59	30,268	77,92	31,00	76,93	30,60	78,83	34,62	54,60	1,7	289
		21/09	12.00	28,916	81,24	29,67	80,54	29,22	82,42	36,36	56,24	0,0	253
		22/09	12.00	30,268	77,78	31,03	76,93	30,62	78,76	34,68	51,81	1,4	304
		21/09	12.01	28,916	81,27	29,67	80,51	29,24	82,43	36,42	57,37	1,3	254
		22/09	12.01	30,268	77,64	31,03	76,63	30,62	78,73	34,73	53,32	0,0	311
	ASS	01/10	11.59	30,217	77,38	31,08	76,64	30,75	77,85	34,60	55,28	2,0	37
		03/10	11.59	27,456	82,78	27,88	82,37	27,78	83,42	31,38	67,30	2,4	103
		01/10	12.00	30,217	77,38	31,05	76,63	30,72	77,76	34,60	56,76	2,4	33
		03/10	12.00	27,456	82,83	27,88	82,37	27,78	83,47	31,26	66,57	1,4	102
		01/10	12.01	30,217	77,52	31,05	76,63	30,72	77,90	34,55	56,62	2,6	31
		03/10	12.01	27,456	82,80	27,90	82,35	27,78	83,50	31,18	66,73	1,7	100
12.30	ADS	08/09	12.29	30,824	74,93	31,51	72,76	31,08	74,47	36,93	41,43	1,0	306
		10/09	12.29	31,306	70,99	31,92	70,31	31,56	70,75	34,26	48,91	3,4	296
		08/09	12.30	30,824	74,51	31,51	72,73	31,10	74,82	36,80	42,43	1,1	100
		10/09	12.30	31,306	70,85	31,92	69,70	31,59	70,49	34,12	49,26	1,6	293
		08/09	12.31	30,824	74,23	31,51	72,82	31,13	74,96	36,63	43,69	0,5	176
		10/09	12.31	31,331	70,76	31,92	69,79	31,59	70,75	34,05	49,08	0,3	290
	UC	16/09	12.29	30,773	74,33	31,54	71,84	31,20	73,82	37,67	43,20	2,4	333
		17/09	12.29	29,69	77,83	30,29	78,44	30,07	79,05	31,64	67,55	3,4	256
		16/09	12.30	30,773	74,13	31,56	72,22	31,20	73,79	37,73	43,13	2,2	300
		17/09	12.30	29,715	77,92	30,29	78,06	30,07	78,94	31,51	69,19	1,7	279
		16/09	12.31	30,798	74,17	31,59	72,28	31,20	73,96	37,78	42,93	1,3	107
		17/09	12.31	29,715	77,78	30,29	78,03	30,07	78,94	31,56	68,84	2,4	275
	CE	21/09	12.29	29,34	81,06	30,09	79,77	29,67	81,80	37,07	56,59	1,7	100
		22/09	12.29	30,444	77,76	31,26	77,48	30,80	78,49	33,76	60,93	2,8	231
		21/09	12.30	29,365	81,02	30,09	79,74	29,67	81,85	37,18	55,77	1,6	212
		22/09	12.30	30,444	77,81	31,26	77,26	30,80	78,71	33,73	61,42	2,8	324
		21/09	12.31	29,365	80,96	30,09	79,71	29,69	81,94	37,29	55,46	2,4	232
		22/09	12.31	30,444	77,76	31,23	77,25	30,80	78,82	33,65	61,81	2,4	306
	ASS	01/10	12.29	29,865	79,61	30,47	78,86	30,27	79,80	31,69	74,08		
		03/10	12.29	27,53	82,77	27,95	82,25	27,88	83,39	31,00	70,06	0,7	113
		01/10	12.30	29,84	79,61	30,42	78,96	30,27	79,91	31,66	73,30		
		03/10	12.30	27,53	82,79	27,95	82,31	27,88	83,29	31,08	69,58	0,8	100
		01/10	12.31	29,815	79,74	30,42	79,15	30,24	80,07	31,64	74,38		
		03/10	12.31	27,53	82,74	27,95	82,25	27,88	83,39	31,15	70,12	2,4	93

Jam	Model	Tanggal	menit	Titik 1 (indoor)		Titik 2 (indoor)		Titik 3 (indoor)		Outdoor (shading)		Vo	Rad
				Ti	Rhi	Ti	Rhi	Ti	Rhi	Ti	Rhi		
				(deg C)	(%)	(deg C)	(%)	(deg C)	(%)	(deg C)	(%)	m/s	Btuh
13.00	ADS	08/09	12.59	31,05	74,07	31,71	73,51	31,33	73,87	35,90	47,34	1,6	290
		10/09	12.59	31,64	70,09	32,20	69,13	31,82	69,33	34,86	47,71	0,0	284
		08/09	13.00	31,08	73,68	31,74	73,29	31,38	74,36	35,99	46,75	0,7	287
		10/09	13.00	31,64	69,71	32,20	69,07	31,84	69,74	34,89	48,07	1,6	281
		08/09	13.01	31,08	73,68	31,77	73,47	31,41	74,82	36,07	44,93	0,0	284
		10/09	13.01	31,64	69,85	32,20	68,75	31,84	69,60	34,81	46,21	0,4	286
	UC	16/09	12.59	30,95	73,03	31,61	71,34	31,33	72,90	36,17	47,16	1,6	90
		17/09	12.59	29,94	77,30	30,55	77,92	30,32	78,45	32,00	66,42	2,7	300
		16/09	13.00	30,95	72,91	31,61	71,19	31,36	72,96	36,15	46,75	0,9	94
		17/09	13.00	29,97	77,39	30,57	77,62	30,32	78,42	31,87	66,64	3,8	270
		16/09	13.01	30,95	72,83	31,61	71,22	31,36	73,16	36,12	47,36	2,0	96
	17/09	13.01	29,97	77,28	30,57	77,56	30,34	78,45	31,82	66,24	2,4	264	
	CE	21/09	12.59	29,67	80,81	30,42	79,32	30,04	81,48	37,59	52,35	0,0	206
		22/09	12.59	30,39	77,67	31,08	77,39	30,77	78,68	33,11	64,03	0,3	50
		21/09	13.00	29,69	80,74	30,42	79,10	30,04	81,43	37,54	50,95	2,1	182
		22/09	13.00	30,39	77,58	31,05	77,24	30,75	78,67	33,08	67,20	2,3	49
		21/09	13.01	29,69	80,65	30,42	79,21	30,04	81,43	37,54	54,38	2,4	187
	22/09	13.01	30,39	77,58	31,05	77,11	30,75	78,86	33,11	65,43	2,4	55	
	ASS	01/10	12.59	29,62	80,42	30,09	80,01	30,02	80,80	31,13	72,60	4,5	55
		03/10	12.59	27,65	82,98	28,05	82,35	28,00	83,21	30,44	70,69	2,4	118
01/10		13.00	29,62	80,42	30,09	79,90	29,99	80,96	31,10	73,17	3,7	57	
03/10		13.00	27,65	82,87	28,07	82,44	28,00	83,21	30,50	71,25	1,3	125	
01/10		13.01	29,59	80,31	30,09	79,93	29,99	81,04	31,05	72,19	1,7	57	
03/10	13.01	27,65	82,82	28,07	82,33	28,02	83,32	30,42	71,03	3,9	125		
13.30	ADS	08/09	13.29	31,43	73,03	32,18	72,34	31,77	73,12	36,36	42,52	0,9	239
		10/09	13.29	31,74	68,67	32,23	68,16	31,97	69,36	34,23	49,24	1,4	24
		08/09	13.30	31,43	72,80	32,18	72,51	31,77	72,98	36,44	40,50	0,9	237
		10/09	13.30	31,74	68,87	32,20	67,83	31,97	69,41	33,97	50,12	2,4	23
		08/09	13.31	31,46	72,86	32,18	72,51	31,79	73,38	36,50	42,06	1,1	236
		10/09	13.31	31,74	68,58	32,20	67,92	31,94	69,35	33,81	50,27	1,7	24
	UC	16/09	13.29	31,08	73,11	31,77	70,99	31,54	72,10	38,56	41,66	2,0	88
		17/09	13.29	30,12	76,81	30,70	77,17	30,47	77,71	31,92	66,89	1,3	270
		16/09	13.30	31,08	72,88	31,79	71,48	31,54	72,28	38,45	41,75	1,0	86
		17/09	13.30	30,12	76,78	30,70	76,95	30,47	77,93	31,92	66,23	1,3	284
		16/09	13.31	31,08	72,62	31,79	71,51	31,54	72,51	38,45	42,62	1,8	87
	17/09	13.31	30,12	76,70	30,70	76,65	30,47	78,01	32,00	66,24	2,7	300	
	CE	21/09	13.29	29,84	80,69	30,55	78,77	30,22	80,87	36,69	55,31	0,0	185
		22/09	13.29	30,37	77,69	31,00	77,43	30,75	78,59	32,46	65,60	1,5	274
		21/09	13.30	29,84	80,52	30,55	78,85	30,22	80,98	36,85	56,43	0,6	188
		22/09	13.30	30,37	77,85	31,00	77,23	30,75	78,29	32,54	65,34	3,1	74
		21/09	13.31	29,84	80,42	30,55	78,80	30,22	81,01	37,02	54,44	0,6	192
	22/09	13.31	30,37	77,83	31,00	77,07	30,75	78,21	32,61	64,23	3,1	59	
	ASS	01/10	13.29	29,49	80,10	29,94	79,84	29,89	80,51	30,98	71,51	2,4	95
		03/10	13.29	27,75	82,63	28,15	81,93	28,12	82,95	30,75	71,41	1,2	100
01/10		13.30	29,49	80,05	29,94	79,76	29,87	80,56	31,05	71,93	2,5	178	
03/10		13.30	27,78	82,66	28,15	81,95	28,12	82,90	30,75	71,78	0,0	93	
01/10		13.31	29,49	80,02	29,94	79,82	29,89	80,75	31,10	71,85	2,2	190	
03/10		13.31	27,78	82,56	28,17	81,85	28,15	82,93	30,75	70,05	0,2	90	

Selanjutnya dari sekian data hasil pengukuran empirik dipilih data pada saat tertentu yang akan digunakan sebagai input kondisi iklim di sekitar model bangunan uji. Untuk setiap model bukaan dipilih satu waktu tertentu, yaitu sebagai berikut:

- Model ADS menggunakan data pada 10 September pada pkl. 10:30 dengan profil kondisi termal outdoor pkl. 10:30-13:30 adalah sebagai berikut:

Tabel IV-2. Profil kondisi termal ruang luar pada 10 September 2016

Nilai	To (°C)	Rho (%)	Tingkat Terang Langit (lx)	Vo (m/s)	Rad global (W)
Rata-rata	34,10	49,92	22.279	1,29	64,5
Maksimum	35,48	57,53	32.280	2,70	86,7
Minimum	32,05	44,48	12.610	0,00	6,7
Standart Deviasi	0,94	3,34	5.660	1,12	30,8
Pkl. 10:30	32,28	57,53	23.513	2,00	82,6

Kondisi udara luar pada 10 September termasuk relatif panas dibandingkan dengan kondisi termal pada saat pengukuran CE dan ASS. Kondisi langit saat pengukuran cukup cerah hanya pada beberapa saat awan muncul sehingga membuat tingkat terang langit yang sama dengan tingkat terang langit berawan. Kecepatan angin pada tanggal ini termasuk yang paling rendah. Hanya pada pkl. 10:30 kecepatan angin relatif cukup tinggi, meskipun suhu udaranya mendekati suhu udara minimum dan kondisi langit cerah.

- Model UC menggunakan data pada 16 September pada pkl. 10:31 dengan profil kondisi termal outdoor pkl. 10:30-13:30 adalah sebagai berikut:

Tabel IV-3. Profil kondisi termal ruang luar pada 16 September 2016

Nilai	To (°C)	Rho (%)	Tingkat Terang Langit (lx)	Vo (m/s)	Rad global (W)
Rata-rata	36,06	49,47	27.262	2,24	64,7
Maksimum	38,56	58,39	32.280	2,70	97,6
Minimum	34,02	41,66	21.803	0,90	25,2
Standart Deviasi	1,49	5,56	4.281	0,85	27,5
Pkl. 10:31	34,12	56,95	23.056	1,60	79,7

Kondisi udara luar pada 16 September termasuk yang paling panas dengan kondisi langit cerah dibandingkan pada ketiga tanggal terpilih yang lain. Tetapi, kondisi termal pada hari ini diuntungkan oleh kondisi angin yang tidak pernah mati dengan kecepatan rata-rata yang cukup tinggi. Kondisi udara pada waktu terpilih termasuk memiliki suhu yang relatif rendah dengan tingkat terang langit di bawah rata-rata dan kecepatan angin > 1 m/s meskipun masih di bawah rata-rata. Sedangkan radiasi global pada saat terpilih di antara nilai rata-rata dan nilai maksimum.

- Model CE menggunakan data pada 22 September pada pkl. 10:31 dengan profil kondisi termal outdoor pkl. 10:30-13:30 adalah sebagai berikut:

Tabel IV-4. Profil kondisi termal ruang luar pada 22 September 2016

Nilai	To (°C)	Rho (%)	Tingkat Terang Langit (lx)	Vo (m/s)	Rad global (W)
Rata-rata	34,16	59,87	14.397	1,60	64,7
Maksimum	36,28	67,20	17.537	2,70	94,9
Minimum	32,46	51,81	10.442	0,00	14,4
Standart Deviasi	1,20	5,44	2.124	1,19	29,6
Pkl. 10:31	33,91	66,17	17.537	1,40	75,6

Kondisi udara luar pada 22 September termasuk yang rendah, meskipun bukan yang paling rendah. Demikian pula kondisi langit yang hanya sedikit di atas kondisi langit saat pengukuran ASS. Pada saat terpilih suhu udara hanya di antara suhu udara minimum dan suhu udara rata-rata, dengan kelembaban udara relatif dan radiasi global di antara nilai rata-rata dan nilai maksimum. Tingkat terang langit pada saat ini termasuk yang maksimum, meskipun masih termasuk berawan. Kecepatan angin pada saat terpilih tidak tinggi, tetapi masih > 1 m/s.

- Model ASS menggunakan data pada 3 Oktober pada pkl. 10:31 dengan profil kondisi termal outdoor pkl. 10:30-13:30 adalah sebagai berikut:

Tabel IV-5. Profil kondisi termal ruang luar pada 3 Oktober 2016

Nilai	To (°C)	Rho (%)	Tingkat Terang Langit (lx)	Vo (m/s)	Rad global (W)
Rata-rata	30,96	70,03	14.658	1,50	41,0
Maksimum	31,74	75,37	16.781	2,70	76,8
Minimum	29,77	66,00	11.412	0,00	26,4
Standart Deviasi	0,59	2,65	2.024	0,99	15,0
Pkl. 10:31	30,19	75,37	16.300	2,20	76,8

Kondisi udara luar pada 3 Oktober termasuk yang paling dingin dibandingkan dengan kondisi udara luar dari ketiga tanggal terpilih yang lain. Kondisi suhu yang relatif rendah dengan kombinasi kelembaban relatif udara yang paling tinggi, langit berawan selama pengukuran, radiasi global yang rendah dan kecepatan angin yang relatif rendah meskipun masih lebih tinggi daripada kecepatan angin pada saat pengukuran ADS. Pada waktu terpilih kondisi suhu udara di bawah rata-rata dengan kelembaban relatif dan radiasi global maksimum, tingkat terang langit mendekati maksimum, tetapi angin berhembus dengan kecepatan yang cukup tinggi.

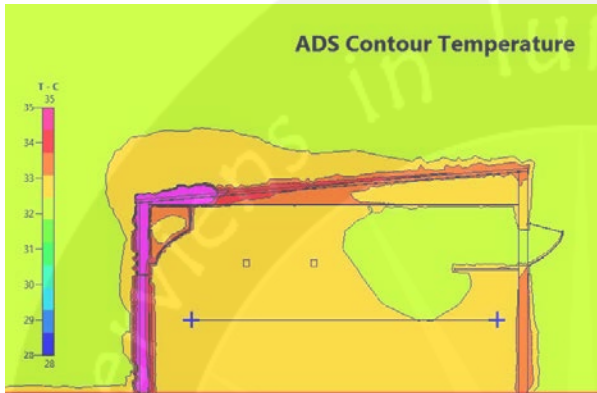
Secara umum, dapat diamati bahwa standart deviasi (SD) kondisi termal pada tapak bangunan uji yang paling kecil terjadi pada 3 Oktober saat instalasi model ASS. Hanya SD kecepatan anginnya saja yang lebih besar dari SD kecepatan angin saat instalasi model UC. SD suhu udara dan kelembaban relatif saat instalasi ADS termasuk relatif kecil, tetapi SD radiasi globalnya paling besar.

IV.2 HASIL SIMULASI CFD-ACE+

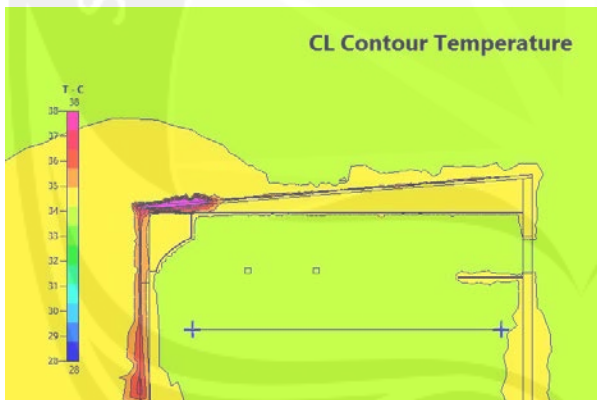
Hasil simulasi kondisi suhu udara di dalam model bangunan uji dengan menggunakan model radiasi tertentu pada program CFD-ACE+ akan dibandingkan dengan suhu udara hasil pengukuran setelah 3 jam yang merupakan durasi terpendek yang dibutuhkan untuk perpindahan panas dari eksterior ke interior melalui dinding pasangan bata ½ batu dan durasi terpanjang yang dibutuhkan untuk perpindahan panas dari eksterior ke interior melalui kaca bening 5 mm. Karena input diambil pada sekitar pkl. 10:30, maka suhu udara di dalam bangunan uji diambil 3 jam setelah terjadi perpindahan panas dari luar ke dalam atau sekitar

pk. 13:30. Sedangkan posisi titik yang diambil sesuai dengan posisi titik pengukuran, yaitu pada jarak horisontal 1,5 m (A), 3,5 m (B) dan 5,5 m (C) dari dinding dengan bukaan dan pada ketinggian 50 cm di atas permukaan lantai.

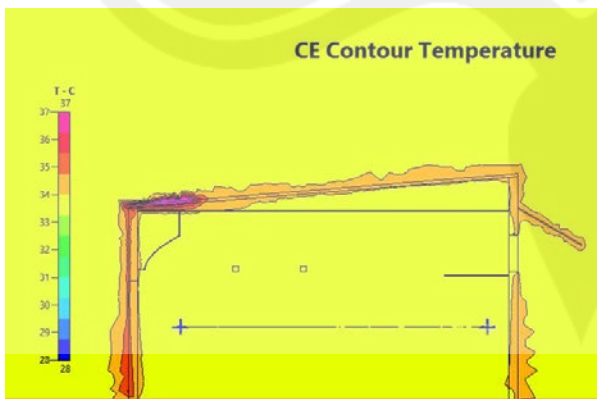
Hasil simulasi CFD-ACE+ dengan model radiasi STS untuk setiap model bukaan dipaparkan bersama dengan pergeseran terhadap hasil pengukuran empirik.



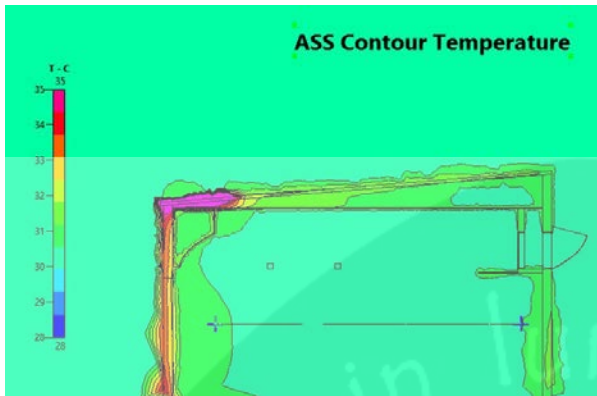
TITIK	simulasi	empirik	pergeseran
A	32,4543	31,637	2,52%
B	32,5929	32,201	1,20%
C	32,5929	31,842	2,30%
Rata-rata			2,01%



TITIK	simulasi	empirik	pergeseran
A	34,1181	31,077	8,91%
B	34,1298	31,791	6,85%
C	34,1298	31,535	7,60%
Rata-rata			7,79%



TITIK	simulasi	empirik	pergeseran
A	33,901	30,369	10,42%
B	33,902	31,001	8,56%
C	33,902	30,748	9,30%
Rata-rata			9,43%



TITIK	simulasi	empirik	pergeseran
A	30,3913	27,776	8,61%
B	30,5767	28,171	7,87%
C	31,3913	28,147	10,34%
Rata-rata			8,94%

Dari besarnya pergeseran antara hasil simulasi dan pengukuran empirik pada keempat model bukaan, pergeseran yang paling kecil terjadi pada model ADS yang diikuti dengan UC (pada gambar CL) dan selanjutnya ASS. Model CE mengalami pergeseran yang paling besar. Kondisi ini tampaknya tidak terkait dengan SD elemen iklim tapak, karena secara umum SD elemen iklim tapak saat instalasi ADS bukan yang paling kecil, bahkan SD radiasi globalnya paling besar.

Tampaknya hal ini berkaitan dengan metode kalkulasi model STS yang merupakan fungsi geometrik yang memperhitungkan radiasi “surface to surface” dengan mengabaikan radiasi yang diserap, dilepas dan disebarkan. Pada model-model bukaan yang tersusun oleh permukaan-permukaan yang cenderung rumit, permukaan-permukaan yang melingkupi akan memantulkan radiasi panas yang bersifat difus. Sementara, karena permukaan-permukaan tersebut diasumsikan tidak menyerap, melepas dan menyebarkan radiasi panas, suhu udara di dalam ruangan merupakan hasil dari pantulan radiasi dari permukaan-permukaan yang cukup rumit dengan kemungkinan frekuensi pemantulan yang lebih tinggi daripada ruang yang dilingkupi oleh permukaan-permukaan sederhana, seperti pada model UC. Kalkulasi kontribusi radiasi difus yang berlebihan tampaknya berlaku untuk model CE dan ASS. Sementara itu, pada kondisi nyata (pengukuran empiris), permukaan-permukaan pelingkup model CE dan ASS akan menyerap, melepas dan menyebarkan radiasi panas sesuai dengan properti termal dan optisnya. Pergeseran hasil simulasi dan pengukuran empiris pada model ASS yang lebih kecil daripada pada model CE disebabkan oleh geometri kolektor parabolik ASS yang menyalurkan radiasi panas secara langsung melewati rongga-rongga kolektor maupun dikarenakan oleh geometri kolektor ke dalam ruang yang melalui bidang kaca

clerestory. Posisi matahari pada akhir September hingga awal Oktober (berada di zenith) pada saat pengukuran menyebabkan model ASS menerima lebih banyak radiasi langsung daripada model CE. Metode kalkulasi pada model STS yang ditentukan oleh radiasi difus menjadikan hasil prediksi kondisi termal model bukaan dengan banyak permukaan pelingkup dan yang didominasi oleh radiasi yang bersifat difus cenderung berlebihan (*overestimate*).

Meskipun model ADS tersusun oleh permukaan-permukaan yang cukup rumit, pergeseran antara hasil simulasi dan pengukuran empiris yang paling kecil disebabkan oleh geometri ADS dengan kaca mengarah ke zenith yang memasukkan radiasi panas langsung yang relatif banyak. Pada ADS radiasi yang masuk ke dalam ruang (melalui bidang kaca) sebagian besar adalah radiasi langsung. Berbeda dengan ASS yang memasukkan sebagian besar radiasi difus melalui bidang kaca dari hasil pemantulan radiasi langsung pada kolektor. Di samping itu, tampaknya radiasi panas langsung yang ditransmisikan oleh bidang kaca lebih dominan di dalam menentukan suhu udara di dalam ruangan daripada radiasi difus, sehingga besarnya efek radiasi difus yang dikalkulasi oleh model STS mendekati besarnya efek radiasi langsung pada kondisi real. Sebagaimana dijelaskan pada paragraf di atas, hal ini juga didukung oleh posisi matahari pada saat pengukuran empiris.

Penting dilakukan untuk studi mendatang adalah komparasi antara hasil simulasi dengan model STS dan pengukuran empiris yang dilakukan pada saat matahari berada di $23,5^{\circ}$ LU maupun dengan menggunakan lokasi di daerah iklim tropis lembab dengan karakteristik radiasi matahari yang berbeda, seperti Singapura yang lebih didominasi oleh radiasi difus.

Pergeseran antara hasil simulasi dan pengukuran empiris yang menarik untuk diamati terletak pada pergeseran paling kecil yang terjadi pada titik tengah (B) pada semua model bukaan. Hal ini dapat dipahami karena posisi titik A dan C banyak ditentukan oleh keberadaan pelingkup yang lebih dekat daripada titik B. Sementara itu, pergeseran terbesar terjadi pada titik A (yang terdekat dengan bukaan) untuk model ADS, UC dan CE. Hanya model ASS yang pergeseran terbesarnya terjadi pada titik C. Argumentasi yang sama yang menunjukkan perkiraan yang berlebihan (*overestimate*) terhadap radiasi difus dari model radiasi STS, sementara pada kondisi nyata radiasi yang dipantulkan secara berulang-ulang juga mengalami penyerapan serta radiasi panas langsung yang relatif sangat kecil terjadi pada model ASS.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

V.1 KESIMPULAN

Berdasarkan komparasi antara hasil pengukuran empiris dan hasil simulasi CFD dapat diamati adanya indikasi hasil penerapan metode STS yang akurat pada model bukaan yang tidak banyak menciptakan pembayangan, pada studi ini yakni model teritisan (CE) dan ASS. Hasil simulasi model bukaan dengan pembayangan yang intensif dengan STS akan menghasilkan prediksi yang berlebihan karena asumsinya didasarkan pada radiasi difus. Meskipun demikian simulasi yang dilakukan hanya satu kali belum cukup mengarah ke suatu kesimpulan yang kuat. Perlu dilakukan beberapa simulasi dengan menggunkan kondisi pelingkup pada tanggal yang berbeda.

V.2 SARAN

- Studi mendatang: komparasi antara hasil simulasi dan pengukuran empiris dilakukan pada tanggal yang lain pada saat matahari berada pada $23,5^{\circ}$ LU. Pada masa ini model CE akan menerima radiasi panas langsung yang lebih banyak, sedangkan model ASS akan menerima radiasi panas langsung yang lebih banyak melalui rongga-rongga kolektor dan mengalami penurunan radiasi panas langsung dari zenith.
- Pengukuran empiris yang dilakukan dengan peralatan yang kontinyus dengan pengukuran radiasi matahari secara detail (dibedakan antara radiasi langsung/normal dan radiasi difus).

VI. DAFTAR PUSTAKA

- Abboushi, B.K., 2013. *The Effect of Adaptive Shading and the Selective Reflector Light Shelves on Office Building Energy Efficiency and Daylight Performance in Hot Arid Regions*. unpublished thesis, the University of Arizona.
- ASHRAE, 2009. *ASHRAE Handbook: Fundamental*. ASHRAE. Atlanta, GA.
- Binarti, F., 2009. Energy-Efficient Window for Classroom in Warm Tropical Area. *11th International IBPSA Conference*, Glasgow, Scotland, UK, July 27-30, 1655-1662.
- Binarti, F., 2016. *Pengembangan Panel Peneduh untuk Daerah Tropis Lembab*. Laporan Penelitian, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Yogyakarta.
- Binarti, F., Satwiko, P., 2015a. *Model dan Rules of Thumb Sistem Pencahayaan Alami Terpadu untuk Menciptakan Interior yang Ramah Lingkungan*. Unpublished: Laporan Penelitian Hibah Bersaing Tahun ke-2. Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Yogyakarta.
- Binarti, F., Satwiko, P., 2015b. Long-term monitoring and simulations of the daylighting and thermal performance of an anidolic daylighting system on a tropical urban house. *Energy Procedia* 78:1787-1792, DOI: 10.1016/j.egypro.2015.11.307.
- Binarti, F., Satwiko, P., 2016. An east-facing anidolic daylighting system on a tropical urban house. *Indoor and Built Env.* vol. 25(4):691-702. Doi: 10.1177/1420326X15574787.
- Chai, J. C., Lee, H. S., and Patankar, S. V., 1994. Finite Volume Method for Radiation Heat Transfer. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer* 8(3):419 – 425.
- Cheng, T.S., Wu, C.-Y., Chen, C.-P., Li, Y.-H., Chao, Y.-C., Yuan, T., Leu, T.S., 2006. Detailed measurement and assessment of laminar hydrogen jet diffusion flames. *Combust. Flame* 146:268–282.
- Desogus, G., Mura, S., Ricci, R., 2011. Comparing Different Approaches to in Situ Measurement of Building Components Thermal Resistance. *Energy and Buildings* 43(10):2613-2620.
- Ejlali, Az., Ejlali, Ar., Hooman, K., Gurgenci, H., 2009. Application of high porosity metal foams as air cooled heat exchangers to high heat load removal system. *Int. Commun. Heat Mass Transfer* 36:674–679.
- ESI Group, 2014. CFD-ACE+ v2014.0: Modules Manual Part I. www.esi-group.com.
- Fronapfel, E.L., Stolz, B.J., 2006. Emissivity Measurements of Common Construction Materials. *InfraMation 2006 Proceedings – ITC 115 A 2006-05-22*. <http://>
- Gomez, M.A., Patino, D., Comesana, R., Porteiro, J., Alvarez Feijoo, M.A., Miguez, J.L., 2013, CFD simulation of a solar radiation absorber. *Heat and Mass Transfer* 57:231-240.

- Hassanzadeh, P., 2007. *An Efficient Computational Method for Thermal Radiation in Participating Media*. Unpublished master thesis, University of Waterloo, Canada.
- Hyde, R. (ed), 2008, *Bioclimatic Housing: Innovative Designs for Warm Climates*. Earthscan, London. ISBN 978-1-84407-284-2.
- Jelle, B.P., 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.
- Judkoff, R., Wortman, D., O'Doherty, B., Burch, J., 2008. A Methodology for Validating Building Energy Analysis Simulations. Technical Report National Renewable Energy Laboratory NREL/TP-550-42059, Colorado.
- Linhart, F., Wittkopf, S.K., Scartezzini, J.L., 2010. Performance of anidolic daylighting systems in tropical climates, parametric studies for identification of main influencing factors. *Solar Energy*; 84:1085–1094.
- Lomas, K.J., Eppel, H., Martin, C.J., Bloomfield, D.P., 1997. Empirical validation of building energy simulation programs. *Energy and Building* 26:253-275.
- Manz, H., Loutzenhiser, P., Frank, T., Strachan, P.A., Bindi, 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.
- Mathew, S., Visavale, G., Mali, V., 2010. CFD Analysis of a Heat Collector Element in a Solar Parabolic Trough Collector. Int. Conf. – November. DOI: 10.13140/2.1.3247.4241.
- Palomo Del Barrio, E, Guyon, G., 2003. Theoretical basis for empirical model validation using parameters space analysis tools. *Energy and Buildings* 35(10): 985-996.
- Praditwattanakit, R., Chaiwiwatworakul, P. and Chirattananon, 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/Download/print/139_Rut%20Praditwattanakit.docx (2013, diakses 7 Agustus 2014).
- Raithby, G. D., 1999. Evaluation of Discretization Errors in Finite-Volume Radiant Heat Transfer Predictions. *Numerical Heat Transfer* 36:241 – 264.
- Rakruengdet, K., Nunak, N., Suesut, T., Sritham, E., 2016. Emissivity Measurements of Reflective Materials using Infrared Thermography, *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2016 v.I, IMECS 2016*, March 16-18, 2016, Hongkong.
- Roulet, C., Gass, J., Marcus, I., 1987. In-Situ U-Value Measurement: Reliable Results in Shorter Time by Dynamic Interpretation of the Measured Data. *ASHRAE Transactions* 108 (1987):1371–1379.
- Scartezzini, J.L., Courret, G., 2002. Anidolic daylighting systems. *Solar Energy* 73:123–135.

- Semlitsch, B., 2010. *Advanced Ray Tracing Techniques for Simulation of Thermal Radiation in Fluids*. unpublished thesis, Technischen Universiteit Wien, Wina.
- Strachan, P., 1993. Model Validation using the PAS SYS Test Cells. *Building and Environment* 28: 153-165.
- Strachan, P., Svehla, K., Heusler, I., Kersken, M. 2016. Whole model empirical validation on a full-scale building. *Building Performance Simulation* 9(4):331–350, <http://dx.doi.org/10.1080/19401493.2015.1064480>.
- Sun, Y., Wu, Y., Wilson, R., Lu, S., 2016. Experimental measurement and numerical simulation of the thermal performance of a double glazing system with an interstitial Venetian blind. *Build and Environment*. 103:111-122.
- Tadeu, A.J.B., Simoes, N., Simoes, I., Pedro, F., Skerget, L., 2014. In-situ thermal resistance evaluation of walls using an iterative dynamic model. *International Journal for Housing Science* 38(1):1-12.



LAMPIRAN

Artikel Jurnal Makara Seri Teknologi