

**LAPORAN PENELITIAN
HIBAH KOMPETENSI TAHUN ANGGARAN 2011**



**SELUBUNG ATAP PINTAR BANGUNAN SEBAGAI SISTEM
PENDINGINAN DAN VENTILASI ALAMI UNTUK KENYAMANAN
TERMAL RUMAH TINGGAL DI DAERAH TROPIS**

Oleh
Dr. Agung Murti Nugroho, ST, MT.

Dibiayai Oleh Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Kementerian Pendidikan Nasional, sesuai dengan Surat Perjanjian Pelaksanaan Penugasan Penelitian Hibah Kompetensi Tahun Anggaran 2011 Nomor : 361/ SP2H/PL/Dit.Litabmas/IV/2011 tanggal 14 April 2011

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
MALANG
2011**

**HALAMAN PENGESAHAN
LAPORAN HASIL PENELITIAN
HIBAH KOMPETENSI BATCH II**

1. Judul Penelitian : Selubung Atap Pintar Bangunan sebagai Sistem Pendinginan dan Ventilasi Alami untuk Kenyamanan Termal Rumah Tinggal di Daerah Tropis

2. Peneliti Utama

- a. Nama lengkap : Agung Murti Nugroho, ST, MT, PhD.
- b. Jenis Kelamin : Laki-Laki
- c. NIP : 1974091 5 200012 1 001
- d. Jabatan Fungsional : Lektor
- e. Jabatan Struktural : Ketua Jurusan
- f. Bidang Keahlian : Sains Bangunan
- g. Program Studi : Jurusan Arsitektur

3. Daftar Anggota Peneliti

NAMA	BIDANG KEAHLIAN	FAKULTAS	PERGURUAN TINGGI
Yuia Nurhayati ST	Teknologi Bangunan	Teknik	Universitas Brawijaya
Cintya P Dewi, ST	Sains Bangunan	Teknik	Universitas Brawijaya
Septi Dwi Cahyani	Sains Bangunan	Teknik	Universitas Brawijaya
Meita TA	Sains Bangunan	Teknik	Universitas Brawijaya
Yeni Pratiwi	Sains Bangunan	Teknik	Universitas Brawijaya

4. Pendanaan dan jangka waktu penelitian

- a. Jangka waktu penelitian yang diusulkan : 3 tahun
- b. Jangka waktu penelitian yang sudah dijalani : 3 tahun
- c. Biaya total yang diusulkan : 292.000.000
- d. Biaya yang disetujui tahun 2018 : 92.000.000

Malang, 30 November 2011

Mengetahui,
Dekan Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

Ketua Peneliti



Prof. Ir. Harnen Sulistio, M.Sc, Ph.D
NIP. 19570527 198403 1 002



Agung Murti Nugroho, ST, MT, Ph.D
NIP. 19740915 200012 1 001

Menyetujui,
LPPM Universitas Brawijaya
Ketua,




Prof. Dr. Ir. Siti Chuzaeami, MS
NIP. 19530514 198002 2 001

RINGKASAN

Strategi penghawaan alami dengan meningkatkan kecepatan angin dan menurunkan suhu udara di dalam ruang adalah prinsip utama untuk mencapai kenyamanan termal di rumah sederhana Indonesia. Di daerah iklim panas dan lembab, strategi penghawaan bukaan satu sisi (single side) mempunyai kelemahan yang mana penghawaan silang tidak dapat dimaksimalkan. Oleh sebab itu penggunaan cerobong surya sebagai strategi pengudaraan apung untuk rumah dengan bukaan hanya satu sisi saja adalah penting untuk dikaji. Kajian ini menilai bentuk cerobong surya sebagai salah satu model atap cerdas untuk meningkatkan kecepatan angin dan menurunkan suhu sebagai penyelesaian kecerdasan dasar dalam iklim panas dan lembab. Kajian ini menggunakan simulasi penghawaan alami pada tipikal ruang tidur rumah sehat sederhana. Simulasi penghawaan alami menggunakan program simulasi CFD yang telah divalidasi dengan membandingkan antara hasil simulasi dengan hasil pengukuran lapangan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model optimum cerobong surya adalah tinggi 3.5m, panjang 3m dan lebar 0,5m memberi hasil yang signifikan dalam meningkatkan kecepatan angin hingga 30% dibandingkan dengan rumah eksisting. Pengaruh ini cukup besar dalam memperbaiki kenyamanan termal di rumah sederhana teres melalui penghawaan alami. Temuan ini menunjukkan bahwa modifikasi atap melalui penambahan cerobong surya dapat meningkatkan kecepatan angin. Kesimpulannya, pengembangan cerobong surya sebagai bentuk atap pintar dalam iklim panas dan lembab perlu mempertimbangkan antara peningkatan kecepatan angin dan penurunan suhu bagi kenyamanan suhu yang optimal.

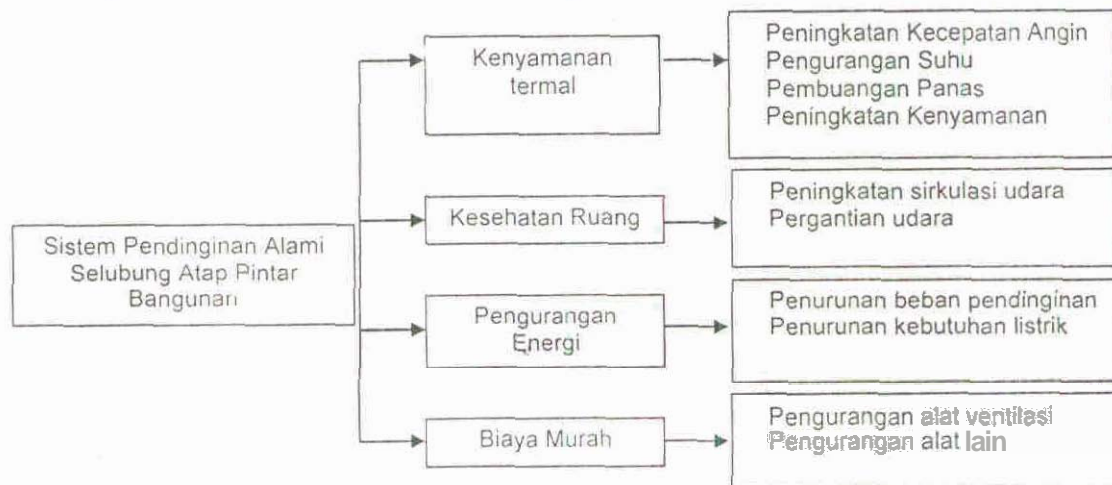
Kata kunci : ventilasi silang, ventilasi apung, atap pintar

SUMMARY

Natural ventilation strategy to improve indoor air velocity and to reduce indoor temperature is the main criterion to achieve thermal comfort in terrace house in Indonesia, in hot and humid climates, one drawback of single sided ventilation is that the wind effect is not well captured which in turn increases the use of mechanical cooling. Therefore, it is important that a study looks into the possibility of using smart roof as stack induced ventilation strategy for single sided ventilation room. This study investigates the optimum solar chimney geometry as smart roof to provide indoor air velocity increment and temperature reduction as design solutions in hot and humid climates. The experiment is carried out using natural ventilation simulation in master bedroom for typical single storey terrace house. The investigation is conducted using a computational fluid dynamic simulation program which has been validated by comparing its result with the field measurement done on site. The results show that the optimum solar chimney geometry model of 3.5m height, 3m length, 1m width gap increases the indoor air velocity to more than 30% on simulated terrace houses compared to the field study model. This effect is significant toward improving the thermal comfort performance in the terrace house through passive natural ventilation. The findings reveal that modification on opening attic, chimney cap and window opening of the optimum solar chimney geometry can improve air velocity within targeted comfort ventilation. In conclusion, solar chimney as smart roof design in hot and humid climates should consider the trade off between air velocity increment and temperature reduction to achieve optimum comfort ventilation.

CAPAIAN INDIKATOR

Luaran kegiatan ini adalah menghasilkan optimasi selubung bangunan atau dapat disebut selubung atap pintar bangunan untuk sistem pendinginan alami rumah tinggal di Indonesia. Bentuk atap pintar selubung bangunan yang dihasilkan akan meningkatkan penurunan suhu ruang dalam menunjang kenyamanan termal bangunan. Beberapa manfaat lain dari atap pintar selubung pintar bangunan dapat dilihat pada gambar 1. Sebagian besar manfaat adalah untuk kenyamanan termal dan hemat energi. Hasil penelitian ini sangat berguna untuk arsitek dalam memilih strategi pendinginan alami dalam mencapai kenyamanan termal dan penghematan energi.



Gambar 1. Keuntungan penggunaan sistem pendinginan alami selubung atap pintar bangunan

Hasil penelitian yang sudah dicapai adalah 1 buah makalah publikasi jurnal internasional dan 1 yang lain dalam proses review, buku ajar berjudul ventilasi alami bangunan di daerah tropis lembab untuk mata kuliah Sains Teknologi Bangunan, pendaftaran Paten HAKI model atap pintar, prototipe atap pintar.

PRAKATA

Laporan ini merupakan hasil penelitian Hibah Kompetensi **Batch II** dengan judul **Selubung Atap Pintar Bangunan** sebagai **Sistem Pendinginan dan Ventilasi Alami** untuk **Kenyamanan Termal Rumah Tinggal di Daerah Tropis**. Kajian tentang **bangunan pintar** masih merupakan hal yang **baru** di Indonesia. Namun demikian dari sisi kebermanfaatannya **sangat** besar di masa depan terutama terkait dengan upaya **hemat energi** dan **keberlanjutan** lingkungan. Definisi **operasional bangunan pintar** pada umumnya **terkait** dengan **otomatisasi elemen** bangunan. Padahal berdasarkan **pemahaman** yang **lebih luas** kecerdasan **bangunan** dapat dibagi dalam tiga tahapan yaitu **tanggap iklim**, **optimalisasi** dan **otomatisasi**. Ketiga hal tersebut telah dihasilkan dalam penelitian ini berupa **atap pintar tanggap iklim**, **atap pintar motorik** dan **atap pintar otomatis**. **Semoga** dengan **memahami tingkatan kecerdasan tersebut** maka **arsitek** dapat menerapkan prinsip **atap pintar** sesuai fungsi dan kondisi lingkungan bangunan.

November 2011

Peneliti

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN	i
RINGKASAN DAN SUMMARY	ii
CAPAIAN INDIKATOR KINERJA	iii
PRAKATA	iv
DAFTAR ISI	v
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR LAMPIRAN	ix
I. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Road Map Penelitian	4
1.3 Posisi Kegiatan	4
1.4 Jadwal Kegiatan	7
II. TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN	
2.1 Tujuan Penelitian	8
2.2 Manfaat Hasil Penelitian	8
2.3 Kebaharuan Penelitian	8
III. TINJAUAN PUSTAKA	
3.1 Pengantar Selubung Atap Pintar	10
3.2 Kenyaman Suhu di Daerah tropis Lembab	21
3.3 Prinsip Desain Bangwnan untuk Pendinginan Alami	30
3.4 Prinsip Dasar Atap Pintar Bangunan	47
3.5 Kajian Simulasi Komputer dalam Arsitektur	55
IV. METODE PENELITIAN	
4.1 Pernilihan Perangkat Lunak Simulasi	69
4.2 Data Iklim	69
4.3 Model dan Kondisi Batas	70
4.4 Validasi	71
V. HASIL DAN PEMBAHASAN	
5.1 Kondisi Kenyamanan Suhu Pada Perumahan Di Malang	73
5.2 Penerapan Cerobong Surya Sebagai Atap Pintar	76
5.3 Keterpaduan Desain Selubung Pintar Bangunan	95
VI. KESIMPULAN DAN SARAN	
6.1 Simpulan	99
6.2 Saran	104
VII. ARTIKEL ILMIAH	105
LAMPIRAN	x

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1: Kedudukan Penelitian yang dilakukan	6
Tabel 1.2: Jadwal Kegiatan Penelitian	7
Tabel 5.1 Perbandingan lebar celah optimal pada cerobong surya antara penelitian ini dengan penelitian sebelumnya	82
Tabel 6.1 Pengaruh geometri cerobong surya pada model rumah deret terhadap kecepatan aliran udara dan suhu, pada orientasi timur, tanggal 21 Maret	101
Tabel 6.2 Ringkasan kinerja optimal pada penerapan cerobong surya di daerah tropis panas lembab	103

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Road map penelitian pengembangan sistem ventilasi selubung pintar bangunan rumah tinggal	4 *
Gambar 3.1: Contoh Batas Suhu udara Netral pada Data Bulanan Iklim	29
Gambar 4.1: Lima langkah metoda dalam kajian	68
Gambar 4.2: Model iklim untuk data tahunan di Malang	70
Gambar 4.3: Posisi titik pengukuran	71
Gambar 4.4: Perbandingan antara suhu dan kecepatan angin	71
Gambar 4.5: Perspektif Tiga Dimensi Model Dasar Rumah	72
Gambar 5.1: Suhu Netral sesuai data Iklim Malang 5 tahun terakhir	73
Gambar 5.2: Pengukuran suhu di dalam ruang	74
Gambar 5.3: Perbandingan Suhu Udara Rerata Luar dan Dalam Ruang	75
Gambar 5.4: Perbandingan hasil simulasi dan pengukuran lapangan	76
Gambar 5.5: Rata-rata kecepatan aliran udara dalam ruang pada pukul 08:00, 12:00 dan 16:00 pada simulasi eksisting dan model modifikasi	76
Gambar 5.6: Rata-rata suhu dalam ruang pada waktu-waktu tertentu.	77
Gambar 5.7: Perbandingan kecepatan aliran udara rata-rata pada model modifikasi dengan dan tanpa cerobong surya	78
Gambar 5.8 Perbandingan rata-rata penurunan suhu dalam ruang antara model rumah deret dengan dan tanpa cerobong surya pada waktu-waktu tertentu	78
Gambar 5.9: Pengaruh kecepatan aliran udara dengan panjang cerobong surya pada model rumah deret	79
Gambar 5.10: Hubungan antara penurunan suhu dengan panjang cerobong surya	79
Gambar 5.11: Pengaruh panjang cerobong surya dan kecepatan aliran udara dalam ruang (a.0.15m; b.1.5m; c. 3.5m)	80
Gambar 5.12: Pengaruh kecepatan aliran udara dan lebar cerobong surya	81
Gambar 5.13: Hubungan antara penurunan suhu dengan lebar cerobong surya	81
Gambar 5.14: Hubungan kecepatan aliran udara dengan lebar cerobong surya pada model rumah deret	82
Gambar 5.15: kecepatan rata-rata aliran udara, pengaruh ukuran celah geometri pada waktu-waktu dan orientasi tertentu	83
Gambar 5.16: rata-rata penurunan suhu, pengaruh ukuran celah geometri pada waktu-waktu dan orientasi tertentu	84
Gambar 5.17: Pola kecepatan aliran udara, pengaruh ukuran celah geometri pada 21 Maret, orientasi selatan	84
Gambar 5.18: Kecepatan rata-rata aliran udara, sebagai fungsi terhadap waktu matahari, pada masing-masing orientasi	86
Gambar 5.19: Penurunan suhu rata-rata, sebagai fungsi terhadap waktu matahari, pada masing-masing orientasi	86
Gambar 5.20 Kecepatan aliran udara, sebagai fungsi terhadap waktu matahari, pada orientasi selatan dan lebar cerobong surya m	87

Gambar 5.21 Rata-rata kecepatan aliran udara, sebagai fungsi terhadap titik tengah matahari (<i>equinox</i>) dan titik balik matahari (<i>solstice</i>), pada masing-masing orientasi dengan lebar cerobong surya 1m	88
Gambar 5.22 Rata-rata penurunan suhu, sebagai fungsi terhadap titik tengah matahari (<i>equinox</i>) dan titik balik matahari (<i>solstice</i>), pada masing-masing orientasi dengan lebar cerobong surya 1m	89
Gambar 5.23 Kontur kecepatan aliran udara, sebagai fungsi terhadap pukul 12:00 dengan orientasi selatan, dan lebar cerobong surya 1m	8.9
Gambar 5.24 Dampak dari ketinggian bukaan ruang bawah atap terhadap kecepatan aliran udara terhadap target kecepatan pada orientasi arah timur dan masing-masing waktu matahari	91
Gambar 5.25 Kontur kecepatan aliran udara,, fungsi bukaan loteng yang terhubung dengan cerobong surya pada 21 Maret, pukul 12:00, lebar celah cerobong 1m dan orientasi arah timur	92
Gambar 5.26 Pengaruh penutup cerobong surya terhadap target kecepatan aliran udara pada orientasi arah timur dan waktu-waktu matahari	93
Gambar 5.27 Kontur kecepatan aliran udara, sebagai pengaruh atas tipe penutup cerobong, pada 21 Maret, pukul 12:00, lebar celah cerobong 1m dan orientasi arah timur	93
Gambar 5.28 Pengaruh ketinggian bukaan jendela terhadap kecepatan aliran udara dalam mencapai target kecepatan, pada orientasi arah timur dan waktu matahari	94
Gambar 5.29 Kontur kecepatan aliran udara, sebagai pengaruh ketinggian bukaan jendela, pada 21 Maret, pukul 12:00, lebar cerobong 1m dan orientasi arah timur	95
Gambar 5.30: Suhu udara dan kecepatan udara kamar tidur utama pada rumah dengan dan tanpa cerobong-surya	96
Gambar 5.31: Pola kecepatan udara dalam potongan vertikal (tengah ruangan) dengan dan tanpa cerobong-surya	97
Gambar 5.32: Dampak modifikasi cerobong surya terhadap kecepatan udara dalam target kecepatan udara absolut	97
Gambar 6.1 Posisi cerobong surya pada model rumah sederhana	102
Gambar 6.2 Modifikasi untuk geometri optimal cerobong surya untuk mencapai kenyamanan ventilasi	104

DAFTAR LAMPIRAN

Gambar L.1: Model Atap Pintar pada Kasus Bangunan

Gambar L.2: Tombol Motorik Model Atap Pintar

Gambar L.3: Motor Power *Window* pada Atap Pintar

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pemanfaatan ventilasi alami pada iklim panas lembab masih dimungkinkan untuk mendapatkan kenyamanan termal. Secara umum manfaat ventilasi menurut Boutet (1987) menyangkut tiga hal utama, yaitu menjamin pergantian udara segar (kualitas udara), membuang panas (kenyamanan termal) serta penghematan energi (penghawaan alami). Ventilasi alami adalah merupakan pilihan utama dalam menunjang kenyamanan termal bangunan (Bansal, 1994). Penghawaan berperan dalam proses pendinginan alami dengan membuang panas dalam bangunan melalui udara yang bergerak. Pada iklim panas dan lembab, desain bangunan seharusnya memaksimalkan penghawaan alami dan meminimalkan panas matahari yang masuk dalam bangunan untuk mengurangi energi pendinginan buatan (Khedari, 1997). Dua tujuan utama ventilasi alami adalah menyediakan udara segar dan menjaga suhu udara yang sesuai. Pergerakan udara yang mengenai tubuh manusia akan memberi sensasi sejuk apabila kecepatan angin lebih dari 0,25 m/detik (Khedari, 2000). Prinsip ventilasi alami adalah menambah kecepatan angin serta membuang panas keluar secara terus menerus sebelum menumpuk dan menaikkan suhu dalam ruangan. Cara yang paling sering dilakukan adalah mengusahakan bukaan di atap seluas-luasnya, seperti jendela, lubang angin dan sebagainya (Satwiko, 2005). Namun cara ini hanya dapat diterapkan untuk rumah dengan halaman luas di sekitarnya. Untuk perumahan di daerah padat bangunan, cara tersebut akan berbenturan dengan *privacy* dan *security*.

Sistem ventilasi selubung atap pintar bangunan adalah konsep ventilasi yang memanfaatkan desain bukaan atap dalam mengoptimalkan efek perbedaan suhu dan tekanan udara. Sistem ventilasi ini termasuk dalam kategori sistem penghawaan alami dan bekerja dengan memanfaatkan energi alam secara langsung, dalam hal ini suhu dan tekanan udara. Di daerah iklim panas lembab seperti di Indonesia untuk mencapai kenyamanan termal di dalam ruang secara pasif cukup sulit dilakukan. Hal ini disebabkan oleh karakter sehari-hari atmosfer yang berada di atas ambang nyaman yang disarankan. Persoalan utama adalah suhu dan kelembaban yang cenderung

tinggi. Menurunkan suhu dan kelembaban udara dalam ruang secara pasif sulit dilakukan tanpa menggunakan mesin pengkondisian udara (air conditioner atau AC). Namun, mesin tersebut boos energi listrik (dapat mencapai 60 % dari total kebutuhan listrik bangunan) dan relatif mahal sehingga tidak terjangkau oleh kebanyakan masyarakat.

Desain bangunan rumah tinggal pada kawasan perkotaan tidak mampu memberi strategi ventilasi alami yang baik. Kecepatan angin dalam fflang sangat dipengaruhi kecepatan angin di luar bangunan pada ketinggian manusia. Berdasarkan data dari Badan Meteorologi dan Geofisika menunjukkan bahwa kecepatan angin rata-rata mencapai 0 m/detik - 1.5m/detik pada ketinggian 10 meter. Kecepatan ini akan berkurang mendekati muka tanah. Kondisi ini kadang tidak cukup untuk memenuhi kebutuhan kecepatan angin dalam ruang dengan ventilasi silang. Sehingga diperlukan keterpaduan dengan strategi ventilasi alami lain yang mampu meningkatkan kecepatan angin dalam ruang. Salah satu jenis ventilasi alami lain adalah ventilasi apung. Salah satu cara untuk menghasilkan ventilasi apung adalah menggunakan tenaga matahari yang lebih dikenal dengan ventilasi tenaga matahari (Nugroho, 2007). Cerobong surya merupakan salah satu tipe ventilasi tenaga matahari (Bansal, 1994). Cerobong surya digunakan untuk menggerakkan aliran udara dalam bangunan dengan meningkatkan selubung ganda dalam cerobong atap melalui pemanfaatan sinar matahari (Alfonso, 2000). Dengan demikian, mengingat selubung bangunan tidak hanya aspek bukaan tetapi meliputi keseluruhan kulit bangunan yang termasuk atap maka keterpaduan sistem atau selubung pintar bangunan sangat potensial untuk dikembangkan. Keterpaduan ini didasarkan potensi masing elemen desain dalam memaksimalkan ventilasi silang maupun ventilasi apung. Keterpaduan strategi ventilasi silang dan apung mengacu pada kinerja terbaik dalam memaksimalkan kecepatan angin dan meminimalkan suhu dalam ruang untuk mencapai kenyamanan termal di Indonesia

Potensi ventilasi selubung atap pintar bangunan secara prinsip sudah lama digali, pada bangunan arsitektur tradisional nusantara banyak yang telah mengeksplorasi selubung atap untuk menjamin kenyamanan termal di dalam

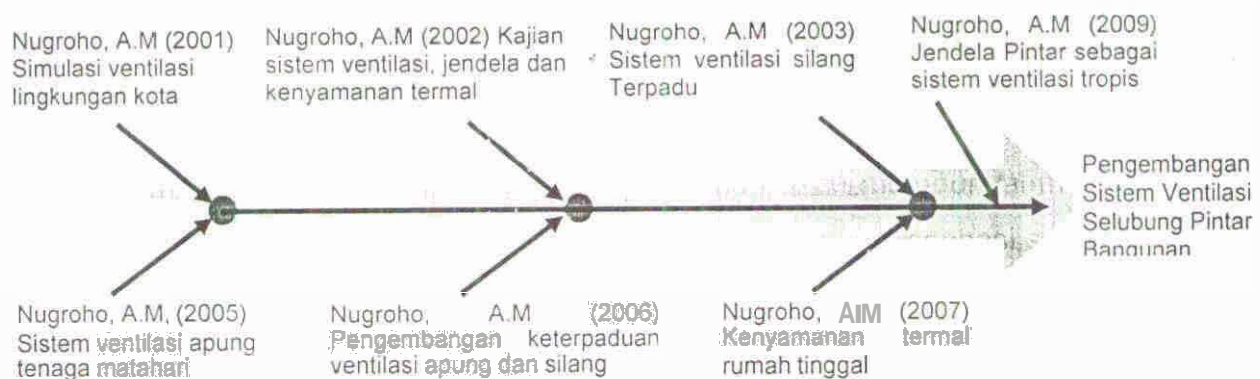
bangunan. Studi yang dilakukan Satwiko terhadap atap bangunan tradisional Jawa, membuktikan bahwa atap rumah tradisional Jawa dapat menjamin berlangsungnya ventilasi dengan baik, walaupun jendela ditutup. Studi dilakukan dengan terowongan angin maya (*virtual wind tunnel*), yang dikonstruksikan dengan program *computational fluids dynamics*, mengungkapkan banyak hal tentang unjuk kerja aerodinamik dan perpindahan panas atap bangunan tradisional Jawa yang mengarah pada kenyamanan termal dalam ruang. Demikian juga hasil penelitian yang dilakukan Nugroho (2010) tentang pengaruh atap bambu pada rumah tradisional Wogo di Flow, Susunan atap ganda bambu di rumah tradisional Wogo mampu memberi kenyamanan termal pengguna baik pada musim hujan maupun kemarau. Pada aplikasi di era modern, permasalahan sistem ventilasi bangunan terutama perumahan terkait erat dengan penghawaan pada lingkup yang lebih luas (*tata lingkungan*). Terdapat kecenderungan akibat keterbatasan lahan dan nilai ekonomis mengakibatkan menurunnya kualitas penghawaan lingkungan. Konfigurasi tata bangunan yang padat tidak memungkinkan pemerataan ventilasi alami pada seluruh rumah yang direncanakan. Tidak meratanya ventilasi alami lingkungan akan berpengaruh besar pada kenyamanan termal di tiap unit rumah yang ada baik berupa suhu dan kelembaban yang semakin meningkat serta tidak adanya pergantian udara untuk kesehatan. Sehingga beberapa permasalahan penelitian yang dapat dirumuskan adalah :

- a. Bagaimana pengaruh konfigurasi selubung bangunan dalam hal ini atap terhadap kecepatan dan pemerataan angin sebagai kinerja utama sistem ventilasi model dasar rumah tinggal di perkotaan
- b. Bagaimana modifikasi konfigurasi selubung atap bangunan yang dapat memaksimalkan kecepatan dan pemerataan angin sesuai kenyamanan ventilasi yang dapat diterapkan pada model dasar rumah tinggal sehat sederhana.
- c. Bagaimana geometri selubung atap pintar bangunan yang didasarkan kemampuan optimalisasi ventilasi silang dan apung dalam memaksimalkan kecepatan angin dan menurunkan suhu sebagai pembentuk kenyamanan termal rumah sehat sederhana di Indonesia.

Dan' diskusi diatas, dapat disimpulkan bahwa sangatlah perlu suatu penelitian untuk mengembangkan sistem ventilasi selubung pintar bangunan didasarkan konfigurasi elemen atap yang mampu menggerakkan udara dalam ruangan dengan kecepatan yang cukup untuk penyejukan fisiologis baik dengan sistem ventilasi silang maupun apung. Hal tersebut sangat mungkin dicapai dengan cara mencari konfigurasi selubung atap bangunan pada model rumah sehat sederhana yang mampu memperbesar efek persebaran dan pemerataan kecepatan aliran udara yang dibutuhkan. Secara keseluruhan sistem ventilasi selubung atap pintar bangunan akan mempunyai manfaat dan keunggulan membantu pencapaian kenyamanan melalui sensasi sejuk dengan pergerakan udara dalam ruang dan hemat energi.

1.2 Road Map Penelitian

Road map penelitian sistem ventilasi selubung pintar bangunan sudah dimulai sejak tahun 2001 seperti terlihat pada bagan berikut:



Gambar 1.1. Road map penelitian pengembangan sistem ventilasi selubung pintar bangunan rumah tinggal

1.3 Posisi Kegiatan

Selama lebih dua dekade ini terdapat peningkatan kesadaran akan efek pemanasan global dan ekologi bangunan terutama dengan penerapan sistem penghawaan alami bangunan. Pada awal tahun 1990 an, ventilasi silang dan apung menjadi kajian utama bagi penelitian penghawaan alami. Barrozi *et al.*

(1992) membuat model cerobong surya didasarkan sistem ventilasi untuk bangunan. Atap bangunan digunakan sebagai cerobong surya untuk menggerakkan aliran udara dan mendinginkan ruang pada bangunan model kecil skala 1:12. Bouchair (1994) menunjukkan bahwa rasio optimum ventilasi atap surya untuk tinggi dan lebar adalah 1:10 untuk memaksimalkan kecepatan angin. Hirunlabh *et al.* (2001) mengkaji kinerja atap matahari untuk penghawaan alami pada bangunan di Thailand. Kajian teoritikal dan eksperimental terhadap penghawaan alami bangunan dilakukan pada empat kombinasi yang berbeda pada tinggi dan lebar. Alfonso (2000) membandingkan kinerja ventilasi selubung atap dan selubung atap pada iklim tropis. Khedari *et al.* (2000) mengkaji kemungkinan penggunaan atap dan atap sebagai penghawaan tenaga matahari. Dia menunjukkan potensi yang signifikan dalam penggunaan dua elemen tersebut dalam penghawaan alami bangunan. Satwiko (2005) menciptakan Sistem Ventilasi Atap Tenaga Matahari untuk rumah sederhana yang terletak di kawasan padat perkotaan. Model hasil penelitiannya dapat menciptakan penghawaan apung dalam area pengguna. Bansal *et al.* (1994) mengembangkan model matematika cerobong surya yang menghasilkan penghawaan alami meskipun dalam kecepatan angin yang masih rendah. Miyazi *et al.* (2005) mengkaji kinerja ventilasi apung yang diterapkan pada atap arah hadap selatan dengan menggunakan simulasi CFD dan model matematika.

Pengusul kegiatan telah melakukan penelitian sebelumnya yang terfokus pada penerapan ventilasi silang dan ventilasi apung pada beberapa contoh bangunan sejak tahun 2001. Penerapan beberapa tipe selubung bangunan mampu meningkatkan kecepatan angin dalam bangunan. Beragam tipe selubung bangunan dan alat penelitian memberi dampak pada peningkatan kinerja penghawaan dalam bangunan. Faktor yang mempengaruhi optimalisasi selubung adalah konfigurasi dan geometri atap. Rencana pengembangan penelitian selanjutnya adalah mencoba mengintegrasikan elemen atap bangunan baik prosentase bukaan, tipe dan material dalam memadukan strategi ventilasi silang alami dan apung alami. Tabel 1 memberi gambaran penelitian yang pernah dilakukan serta penelitian yang akan dilakukan tentang sistem ventilasi atap pintar bangunan. Keseluruhan temuan penelitian terdahulu

tentang sistem ventilasi atap bangunan akan memberi gambaran posisi penelitian yang akan dilakukan.

Tabel 1.1: Kedudukan Penelitian yang dilakukan

Peneliti	Iklim			Aplikasi			Konfigurasi						Kinerja				Alat				
	Panas Lembab	Panas Kering	Sub Tropis	Dinding	Atap	Bukaan	Tinggi	Lebar	Panjang	Liannya	Material	Bukaan	Angin	Lajinya	ACH	Suhu	Subu	Skala Penuh	Skala Kecil	Matematika	Simulasi
Barrozi, 1992	*					*						*	*	*					*		*
Bouchair, 1994			*	*				*				*		*							*
Bansal, 1994	*			*				*			*		*			*				*	
Alfonso, 2000		*			*	*	*	*		*	*			*				*			*
Khedari, 2000	*				*			*	*			*	*		*		*	*			
Hirunlabh, 2001	*			*	*		*	*			*			*					*	*	
KS Ong, 2003	*			*				*			*		*			*			*	*	
Satwiko, 2005	*				*								*								*
Miyazi, 2005			*	*				*						*							*
Nugroho, 2001	*					*				*			*								*
Nugroho, 2002	*					*				*			*								*
Nugroho, 2003	*			*		*				*			*								*
Nugroho, 2005	*				*	*	*	*	*			*				*			*		*
Nugroho, 2006	*					*	*	*	*	*	*	*	*			*		*			*
Nugroho, 2007	*					*	*	*	*	*	*	*	*			*	*	*			*
Nugroho, 2008	*					*	*	*	*	*	*	*	*			*		*			*
Nugroho, 2009	*					*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*			*		*
Kajian yang akan dilakukan	*				*		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*			*		*

BAB 2 TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN

2.1 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian adalah mengembangkan dan menemukan sistem ventilasi selubung atap **pintar** bangunan rumah tinggal yang cocok untuk kondisi iklim **panas** lembab seperti Indonesia dengan **cara**:

- a. Mengidentifikasi pengaruh atap **bangunan** pada model dasar **rumah** tinggal terhadap sistem ventilasi secara **umum**.
- b. Mengeksplorasi bentuk konfigurasi dan **geometri** selubung **bangunan** terutama atap pada rumah sehat sederhana yang dapat memaksimalkan kecepatan **angin** dan kernerataan aliran udara dalam ruang.
- c. Mengeksplorasi perpaduan strategi ventilasi silang dan apung pada elemen atap **bangunan** untuk menunjang kenyamanan **termal** dalam **bangunan**

2.2 Manfaat Hasil Penelitian

Manfaat hasil penelitian ini **akan** diterapkan pada model rumah sehat sederhana dengan upaya meningkatkan kenyamanan **termal** dan **penghematan** energi. Sedangkan teknologi selubung **pintar** pada pengembangan **selanjutnya** dapat diterapkan pada **bangunan** lain yang masih memungkinkan penggunaan penghawaan alami seperti **bangunan pendidikan**. Model selubung **pintar** **bangunan** juga dapat diajukan ke dunia industri **konstruksi** untuk dibuat sebagai **produk** massal seperti atap **pintar** yang mempunyai **nilai** ekonomi yang tinggi pada penerapan **pembangunan** perumahan.

2.3 Kebaruan Penelitian

Kebaruan penelitian ini adalah menghasilkan sistem **ventilasi** selubung atap **pintar** bangunan dengan teknologi sederhana yang dapat dikembangkan bagi masyarakat pada rumah tinggalnya untuk **memperoleh** pergerakan udara di dalam ruang yang nyaman dan sehat (mengganti **udara** secara terus menerus dan **bebas** polusi) secara **mudah** (**biaya** operasional **rendah** dan teknologi penerapan sederhana). Bagi institusi **peneliti**, teknik **simulasi** dengan

memanfaatkan program *computational fluid dynamics* (CFD) adalah sangat mutakhir dan berkat kemajuan kecepatan dan kekuatan komputer dapat dipakai untuk simulasi konfigurasi bangunan dan lingkungan. Dengan menguasai teknologi CFD ini, berarti R dan D memposisikan institusi langsung dibaris depan teknologi simulasi dunia. Teknologi simulasi dengan program CFD saat ini dipakai di bidang yang sangat luas meliputi antara lain bidang kedirgantaraan (desain pesawat terbang), kelautan (desain kapal) automotif (desain mobil), medik, lingkungan hidup (pelacakan polusi dan sebagainya) dan hidrologi karena dianggap mempunyai banyak keunggulan dibanding peralatan laboratorium konvensional. Jika mengingat harga-harga peralatan laboratorium fisik konvensional yang sangat mahal, maka laboratorium maya (*virtual laboratory*) lebih realistis untuk dikembangkan di Indonesia agar segera dapat bersaing dan menyusul ketinggalan penguasaan teknologi oleh negara maju secara lebih murah dan mudah. Kemudahan tersebut, akan membantu pengembangan desain arsitektur di Indonesia. Bagi Institusi peneliti jelaslah ini merupakan peluang penelitian lanjutan (baik komersial maupun akademis) yang tak terhingga luasnya. Desain sistem ventilasi selubung atap pintar bangunan ini nantinya akan terus disempurnakan sesuai dengan hasil evaluasi purna huni. Penelitian lanjutan tersebut akan banyak melibatkan bidang-bidang ilmu lain dan membentuk jaringan ilmiah antar bidang ilmu. Bagi ilmu arsitektur, penelitian ini akan menyemarakkan dan memperkaya ilmu bangunan tropis lembab yang saat ini terkesan tidak berkembang. Selain itu, karena sistem ventilasi selubung pintar bangunan yang dikembangkan juga didekati dengan konsep-konsep arsitektur yang benar (proporsi, estetik) maka sistem tersebut diharapkan dapat menjadi titik tolak perancangan sains arsitektur khususnya sistem ventilasinya. Sistem ventilasi selubung atap pintar bangunan ini dikembangkan bekerja sepenuhnya dari energi alam maka akan ikut menghemat energi serta melestarikan lingkungan hidup

BAB 3

TINJAUAN PUSTAKA

3.1 Pengantar Selubung Pintar Bangunan

Selama beberapa dekade terakhir ini, telah dilakukan berbagai cara untuk meningkatkan aspek fungsional bangunan dalam upaya mengurangi biaya. Dalam konteks ini, perkembangan teknologi baru yang bermunculan dikuasai oleh penggunaan istilah bangunan pintar dan selubung pintar bangunan dengan tingkat keberhasilan yang berbeda-beda. Akibat seringnya penggunaan istilah tersebut dalam dunia arsitektur, muncul berbagai definisi dari konsep selubung pintar bangunan (Wigginton & Harris, 2002). Sebagai contoh, tercatat lebih dari tiga puluh definisi kepintaran dalam konteks bangunan dan selubung bangunan yang secara umum didefinisikan dengan kata adaptif, maju, inovatif, dan interaktif. Berbagai definisi tersebut menimbulkan interpretasi yang berbeda pada pengertian 'pintar' dalam kaitannya dengan selubung bangunan yang seharusnya disesuaikan dengan konteksnya. Dalam kerangka penelitian ini, kepintaran suatu selubung bangunan didefinisikan dengan kemampuannya untuk beradaptasi terhadap lingkungan yang berbeda. Pemahaman tersebut akan lebih mudah dengan mengelompokkan menjadi tiga bagian, yaitu:

a. Tanggap terhadap lingkungan

Perilaku selubung pintar bangunan yang dapat beradaptasi dengan perubahan lingkungannya, merupakan pengertian dasar kepintaran bangunan. Kepintaran dapat dihubungkan dengan performa yang responsif terhadap komponen lingkungan pada selubung bangunan. Desain dan konstruksi dapat menjadi suatu potensi yang besar sebagai pengendali lingkungan ruang dalam baik terhadap aspek cahaya, panas, suara, ventilasi, dan kualitas udara (Wigginton & Harris, 2002:3). Dalam konteks ini, selubung pintar bangunan dapat didefinisikan sebagai perespon dan pengontrol aktif terhadap perubahan yang terjadi antara lingkungan internal dan eksternal. Hal ini dapat dilakukan dengan kemampuan menyediakan kenyamanan yang optimal melalui penyesuaian diri yang dilakukan oleh bangunan itu sendiri

(Wigginton & Harris, 2002:27). Beberapa fakta menunjukkan perilaku yang dimaksud adalah penggunaan teknologi pintar dapat beradaptasi terhadap kebutuhan dan keinginan dari pengguna bangunan. Sehingga bangunan pintar secara umum didefinisikan lebih kepada teknologinya daripada tujuan pengaturannya. Jika penggunaannya dapat dikendalikan oleh teknologi, ini mengarah pada sebuah kondisi dimana teknologi tidak lagi sesuai dengan kebutuhan penggunanya, dan dapat dengan cepat mempengaruhi produktivitas dan biaya. Namun perlu diingat penggunaan teknologi pintar harus didahului dengan konsep desain pintar terlebih dahulu. Dalam proses pencarian konsep pintar yang dapat mengorganisasikan selubung bangunan pada suatu keutuhan yang koheren dalam beradaptasi terhadap lingkungan maka arsitek perlu memahami konsep bio klimatik. Dalam konteks ini, lingkungan binaan seringkali dikomparasikan dengan suatu ekosistem, atau suatu kompleksitas kehidupan organisme, lingkungan fisik, dan seluruh hubungannya dalam setiap unit ruang. Dalam "The Architecture of Intelligence", sebuah buku yang membahas efek dari perkembangan teknologi informasi dalam arsitektur, Kerckhove (2001) menekankan bahwa kulit adalah suatu bagian tubuh yang bergerak, bukan sekedar sesuatu yang dapat dilihat, tetapi merupakan satu dari sistem sensor tubuh yang paling komprehensif. Sehingga apabila dikaitkan antar kulit dengan selubung bangunan maka responsivitas untuk melakukan penyesuaian terhadap lingkungan adalah sebuah karakteristik yang hampir dapat mendeskripsikan suatu perilaku pintar. Namun yang menjadi catatan adalah hal tersebut berkenaan dengan kemampuan selubung bangunan itu sendiri daripada manusia yang menggunakannya.

b. Optimalisasi melalui atap pintar

Definisi kedua yang berhubungan dengan selubung pintar bangunan dan arsitektur secara umum adalah pada keahlian dan rasionalitas orang yang merancang, menggunakan, dan merawatnya. Contoh yang spesifik dari tipe ini diberikan oleh Kroner (1997), yang mengidentifikasi tiga pokok pembahasan mengenai arsitektur pintar, yaitu:

- Desain pintar

Proses desain harus dapat merespon humanitas, kebudayaan, dan persoalan yang kontekstual; menunjukkan perhatian terhadap aspek ekonomi, politik, dan keberlanjutan ekologi dalam skala kecil maupun besar; dan, menghasilkan artefak yang harmonis dengan alam.

- Penggunaan teknologi pintar yang sesuai

Mengintegrasikan teknologi pintar dalam merespon perbedaan kebiasaan penghuni dan kondisi lingkungan yang senantiasa berubah.

- Penggunaan dan perawatan pintar bangunan

Untuk dapat mendesain bangunan pintar harus dipertimbangkan siklus keberlangsungan bangunan dan keberagaman sistem serta komponennya. Meskipun bangunan pintar memiliki suatu kompleksitas, pada dasarnya tetap harus dapat dioperasikan dengan mudah, dapat menghasilkan energi maupun hemat energi, dan mudah dalam perawatannya, pembaharuan, modifikasi, dan pendaurlangannya.

Dalam konteks diatas, selubung pintar bangunan sering dihubungkan dengan tujuan penghematan energi, pemenuhan kebutuhan manusia, serta penggunaan sumber energi yang dapat diperbaharui. Sebagai contoh fasade kaca dapat dideskripsikan sebagai fasade pintar ketika menggunakan konsep alami, sumber energi yang dapat diperbaharui (matahari, tekanan angin, serta energi panas bumi) untuk memenuhi kenyamanan bangunan dalam kebutuhan pemanasan, pendinginan, dan pencahayaan.

c. Otomatisasi melalui teknologi pintar

Selubung bangunan pintar seringkali dihubungkan dengan penggunaan teknologi dan sistem kepintaran buatan. Webster (1998) mendefinisikan kepintaran buatan sebagai:

- kemampuan sebuah mesin untuk dapat meniru perilaku pintar
- suatu cabang dari ilmu komputer yang dapat membuat simulasi perilaku pintar pada komputer

Teknologi yang berdasar pada kepintaran buatan akan menjadi lebih canggih dan dapat digunakan untuk beberapa tujuan, seperti fungsi kontrol otomatis dan fasilitas diagnosis. Secara umum bangunan jarang memiliki staf ahli yang berada di lokasi untuk mengoperasikan secara tepat sistem bangunan untuk mengurangi masalah biaya. Dengan memasang sensor dan kontrol

tambahan pada bangunan serta menghubungkannya dengan mesin penggerak elemen bangunan seperti elemen peneduh, jendela dan atap maka bangunan secara otomatis menyesuaikan terhadap kondisi lingkungannya. Hasil akhirnya adalah bangunan tersebut dapat membuat kehidupan lebih efektif, serta lingkungan kerja yang memiliki lebih sedikit dampak terhadap lingkungan, manusia dan lokasi itu sendiri.

Ketiga karakteristik diatas kemudian dicoba diaplikasikan dalam suatu selubung bangunan. Untuk menemukan karakteristik perilaku pintar, kepintaran manusia pun terus dieksplorasi. Berdasar pada sebuah literatur singkat dari penelitian psikologis terhadap perkembangan kepintaran manusia, bagian selanjutnya akan menjelaskan berbagai karakteristik perilaku pintar, serta mengindikasikan kesamaan dan perbedaan di antaranya. Empat karakteristik yang ditentukan untuk menggambarkan perilaku pintar, dalam kaitannya dengan selubung bangunan, antara lain:

a. Kemampuan untuk membuat pola

Perilaku pintar dapat dijelaskan sebagai suatu bentuk dari interaksi antara subyek dengan lingkungannya. Sebuah subyek tidak dapat merespon secara acak terhadap perubahan lingkungannya, akan tetapi cukup melakukan tindakan sesuai dengan pola yang pasti sehingga alam dan kompleksitasnya &an mengindikasikan kepintaran subyek tersebut (Piaget 1987). Hubungan antara rangsangan dan respon adalah fleksibel dan memiliki keragaman bentuk, tetapi pada waktu yang sama mereka menunjukkan keteraturan. Sebuah subyek tidak akan bereaksi terhadap suatu rangsangan khusus yang ada dalam dirinya sendiri, tetapi rangsangan itulah yang akan menahan subyek. Rangsangan yang berbeda dapat membangkitkan respon yang sama ketika mereka menahan subyek secara teratur. Oleron menghubungkan keteraturan ini dengan penggunaan beberapa model. Sebuah subyek dengan model pemikiran digunakan untuk merasakan obyek dan melakukan tindakan terhadap kondisi lingkungan. Model tersebut dibuat dan diperbaharui secara terus-menerus untuk dapat berinteraksi dengan lingkungan, dan itulah yang dapat menjelaskan hubungan antara rangsangan dan respon secara teratur.

b. Kemampuan untuk mengatasi permasalahan

Penentuan batas yang jelas antara aktivitas pintar dan proses fisiknya merupakan salah satu cara untuk melihat kemampuan mengatasi masalah. Pola rangsangan serta respon yang fleksibel dan beragam ditandai dengan aktivitas pintarnya serta karakteristik proses fisiknya. Hal itu dapat terjadi sesuai dengan kualifikasi tipe perilaku pintarnya antara lain adaptasi sensori-motor dasarnya dan pemahaman kebutuhan penggunanya.

c. Kemampuan untuk beradaptasi dengan lingkungan

Adaptasi dalam konteks ini perlu untuk diinterpretasikan sebagai suatu keseimbangan antara aksi dan reaksi dari organisme pada lingkungan (Piaget 1967:7). Defini yang lebih jelas adalah:

- penyesuaian organ perasa terhadap kualitas atau intensitas dari rangsangan
- modifikasi dari suatu organisme atau bagian yang membuatnya lebih sesuai untuk beradaan di dalam kondisi suatu lingkungan"

d. Kemampuan untuk berpersepsi, beralasan, dan bertindak

Kepintaran juga dapat diinterpretasikan sebagai interaksi yang terstruktur terhadap lingkungan melalui proses fisik yang berkelanjutan. Menurut Piaget (1967) persepsi pembelajaran sensori-motor merupakan sebuah perilaku pandangan maupun penilaian yang seluruhnya sejalan maupun tidak terhadap hubungan yang terstruktur antara lingkungan dan organismenya. Dalam interaksi dengan lingkungan maka subyek memandang rangsangan pada lingkungan tersebut dan mengeneralisasikan suatu respon yang sesuai berdasarkan model mental pada lingkungan tersebut serta mengeksekusi respon tersebut. Secara bersamaan model mental subyek tersebut diperbaharui dalam interaksinya dengan lingkungannya. Perilaku ini memungkinkan subyek untuk beradaptasi terhadap intensitas dan kualitas dari simulasi yang dilakukan lingkungan, untuk menyelesaikan permasalahan dan beradaptasi dengan situasi baru pada lingkungannya. Penyelesaian masalah dapat dilakukan dengan suatu pemahaman ketika suatu masalah tiba-tiba terstruktur pada suatu bentuk yang benar. Hal tersebut mungkin juga dapat terjadi dengan cara penstrukturan yang berkelanjutan dan menyusun kembali sampai pola yang benar ditemukan, dengan kata lain sebuah proses dari pembelajaran atau pencarian Hayes-Roth (1995) mendeskripsikan sistem

pintar yang secara berkesinambungan dan simultan menunjukkan tiga fungsi yaitu:

- Persepsi dari kondisi dinamis pada lingkungan
- Alasan untuk menginterpretasikan persepsi, menyelesaikan permasalahan, menarik kesimpulan, dan menentukan tindakan
- Tindakan untuk mempengaruhi kondisi pada lingkungan

Dalam perbandingannya dengan istilah sejenis seperti pintar, cerdas, siaga, dan sigap, istilah kepintaran merupakan penekanan dari keberhasilan dalam menguasai berbagai situasi baru dan menyelesaikan permasalahan. Kepintaran dideskripsikan sebagai kemampuan untuk belajar atau memahami, atau melakukan penyesuaian dengan sesuatu yang baru, atau mencoba berbagai situasi serta kemampuan untuk menggunakan dan memanipulasi lingkungan.

3.1.1 Definisi Perilaku Pintar Atap Bangunan

Atap pintar bangunan mengadaptasikan dirinya terhadap lingkungan dengan memberikan persepsi, alasan, dan tindakan. Tingkat adaptasi atap bangunan adalah kemampuan dalam menghadapi situasi baru serta mengatasi permasalahan yang mungkin terjadi pada waktu berinteraksi dengan lingkungannya. Definisi ini tidak secara otomatis menghubungkan sebuah atap pintar bangunan dengan pencapaian tujuan tertentu, tetapi lebih menggambarkan keahlian dan perilaku yang diharapkan dari selubung pintar bangunan dalam rangka mencapai tujuan tersebut. Terdapat tiga tujuan utama yang cukup relevan yang berhubungan dengan interaksi atap pintar dengan lingkungan, yaitu:

a. Kemampuan untuk menghadapi variasi

Adaptasi idealnya memungkinkan atap pintar bangunan untuk dapat menghadapi situasi baru pada lingkungannya. Lingkungan tersebut dapat terdiri dari tiga elemen, yakni:

- elemen dengan kondisi iklim dan tapaknya
- elemen ruang dalam yang terkandung dalam kerangka selubung bangunan
- elemen yang terdiri dari pengguna bangunan, kebutuhan, dan perilakunya

Atap pintar bangunan dituntut untuk dapat menyediakan respon baik pada variasi kondisi umum maupun pada kondisi khusus sesuai prioritas dan kinerjanya. Sehingga selubung pintar bangunan perlu didesain secara fleksibilitas yang dapat mengimplementasikan berbagai macam strategi serta dapat menyesuaikan susunan fisiknya. Dalam mendesain atap bangunan, bagaimanapun juga tidaklah mungkin dapat mengantisipasi setiap situasi yang mungkin terjadi, membuat catatan yang lengkap dari setiap permintaan, serta menentukan morfologi atap bangunan yang sesuai. Untuk dapat merespon situasi dalam jangka panjang, maka atap pintar bangunan idealnya dapat mengatur dan menyusun strateginya sendiri untuk dapat beradaptasi.

b. Kemampuan untuk menghadapi permasalahan utama

Sebuah atap pintar bangunan idealnya dapat mengantisipasi kebutuhan pengguna termasuk di dalamnya berbagai pertimbangan, serta kriteria kinerja dalam proses pencarian solusi yang optimal. Pengaturan prioritas yang kompleks dan kebutuhan kriteria kinerja pada selubung pintar bangunan dilakukan agar menjadi fleksibel dalam strategi dan morfologinya. Rancangan yang fleksibel akan menyediakan selubung bangunan yang mampu melakukan tugas tertentu dan meningkatkan peluangnya dalam menemukan solusi yang paling baik untuk mengatasi permasalahan tersebut. Urutan persepsi, alasan, dan tindakan merupakan proses selubung bangunan dalam mengadaptasi berbagai strategi atas tuntutan situasi.

c. Kemampuan untuk menghadapi perilaku penghuni

Idealnya, sebuah atap pintar bangunan mampu untuk beradaptasi terhadap kebutuhan, keinginan, dan perilaku penghuni. Disini terdapat perbedaan yang signifikan dalam kebutuhan dan keinginan di antara individu penghuni, yang mungkin sangat berbeda dari kebutuhan rata-rata dalam peraturan standar bangunan (IEA 2000). Hal tersebut dapat dilihat dengan adanya perbedaan dalam posisi ruang kerja dan aktivitas yang dilakukan, keinginan individu, dan cara berpakaian, serta tingkat metabolismenya (Selkowitz 1999). Sebagai tambahan, perasaan penghuni untuk mengendalikan lingkungannya adalah hal yang terpenting. Kemampuan penghuni untuk melakukan tindakan yang adaptif akan mempengaruhi kenyamanan dan

kepuasan (Baker & Steemers 2000). Kesiediaan penghuni bangunan untuk beradaptasi dengan lingkungan kerjanya, ternyata adalah untuk memperluas zona kenyamanan mereka (Garg 2001). Penghuni yang tidak merasa puas, dapat mengontrol kembali strateginya secara aktif. Menurut Burger (1989:246) hal yang penting adalah para penghuni mampu merasakan perubahan yang signifikan. Dalam konteks ini, Averill (1973) membagi tiga tipe kontrol sebagai berikut:

- Kontrol untuk membuat keputusan, berhubungan dengan keberadaan pilihan dalam lingkungan fisik. Pemberian kesempatan bagi penghuni bangunan untuk membuat penilaian, seperti keberadaan alat pengukur suhu dan tirai pelindung untuk meningkatkan kenyamanan dan kepuasan penghuni (Baker & Steemers 2000; Garg 2001).
- Kontrol kognitif, berhubungan dengan persepsi penghuni terhadap kontrol itu sendiri. Ini memunculkan hipotesa bahwa seorang penghuni bangunan dapat merasa mengendalikan kontrol dengan mendapatkan kondisi yang ia inginkan, tanpa mempunyai kesempatan untuk memilih kondisi tersebut. Bagaimanapun hasil tersebut menunjukkan bahwa jika terdapat pilihan maka akan meningkatkan persepsi penghuninya terhadap kontrol.
- Kontrol perilaku, menitikberatkan pada kondisi dimana penghuni bangunan perlu untuk membuat penilaian dari diri mereka sendiri dalam mengantisipasi suatu hal yang tidak diinginkan, seperti menghindari silau cahaya dan panas yang berlebihan. Untuk mengatasi kesulitan dalam memenuhi kebutuhan penghuni dengan kontrol yang otomatis dan menyeluruh. Willey (1997) mengajukan sebuah kejelasan antara situasi dan kontrol. Penghuni bangunan dapat menentukan keinginan mereka terhadap kondisi lingkungannya (situasi), tetapi tidak mampu memutuskan bagaimana kondisi tersebut dapat dicapai (kontrol).

3.1.2 Karakter Fungsi Atap pintar Bangunan

Terdapat tiga karakteristik fungsi yang dapat diadaptasi atap pintar bangunan dalam lingkungan yang dinamis dan interaktif, yakni:

a. Persepsi

Sebuah atap pintar bangunan idealnya dapat menerima informasi dengan memperhatikan kondisi pada lingkungan dan mampu melakukan interaksi dengan lingkungannya, yakni:

- Lingkungan twang luar yaitu kondisi iklim dan tapak
- Lingkungan ruang dalam yaitu karakter permukaan, perabot, dan peralatan, iklim ruang dalam, alat pendeteksi kebakaran dan sistem keamanan
- Penghuni bangunan yaitu keberadaan mereka, perilaku dan keinginan, serta efek dari aktivitas yang mereka lakukan, seperti porspirasi dan penggunaan peralatan
- Performa selubung yaitu perilaku dari peralatan, kerusakan material dan komponen, serta kebutuhan perawatannya

Hal ini dapat dicapai dengan menjelaskan persepsi sensor, atau transformasi data dari sensor terhadap representasi yang penuh arti dan manfaat bagi dunia. Persepsi sensor menerima data masukan dari sensor yang diukur oleh ruang luar, sama seperti ruang internal pada sistem itu sendiri (Albus 1999:4).

Banyak sumber yang dikombinasikan untuk menghasilkan informasi yang lebih akurat dan terpercaya di tengah ketidaklengkapan data. Bagaimanapun juga hal ini dapat meningkatkan kompleksitas sistem yang merubah data tersebut menjadi informasi (de Silva 1995). Tidaklah mungkin bagi sebuah atap pintar bangunan untuk merasakan dan memproses setiap detail dari lingkungan dalam morfologi dan komputasi sumber yang terbatas. Sejumlah data yang diperoleh dapat dipertimbangkan baik-baik untuk akurasi dan relevansinya dengan memperhatikan kriteria performa atap dan obyektivitas, serta waktu yang dibutuhkan atap untuk melakukan proses dan reaksi terhadap informasi tersebut.

b. Alasan

Terdapat berbagai alasan sebuah atap bangunan mampu mengoptimalkan reaksinya terhadap lingkungan, antara lain:

- Memproses informasi dari berbagai sumber menjadi sebuah solusi yang optimal

- Mengantisipasi berbagai kondisi lingkungan
- Memahami keinginan penghuni
- Mengantisipasi hasil dari tindakan selubung

Tanpa keahlian khusus tersebut, proses adaptasi terhadap lingkungan biasanya terjadi dengan tindakan spontan, atau sebuah respon sederhana yang mengikuti rangsangan secara langsung dan tidak dapat dihindarkan (Beukers & van hinte 1998:45).

Suatu atap pintar bangunan bertujuan untuk mengkombinasikan beberapa keunggulan dari kepintaran buatan melalui sebuah alat pemroses informasi yang kuat dengan karakteristik kepintaran manusia yang baik, de Silva (1995) antara lain:

- Fleksibilitas
- Adaptivitas terhadap situasi baru
- Efisiensi dalam mengumpulkan informasi, dengan mengesampingkan detail-detail yang tidak relevan

Singkatnya, informasi yang dikumpulkan dapat tidak lengkap dan akurat, serta dapat menjadi terlalu umum, kualitatif, dan tidak jelas karena manusia dapat memasukkan alasan, menduga, dan menyimpulkan informasi dan pengetahuan baru. Mereka dapat mengambil keputusan yang baik, dan juga dapat memberikan penjelasan yang logis terhadap keputusan tersebut. Mereka dapat belajar, merasakan, dan mengembangkan keahlian mereka dari pengalaman (de Silva 1995:2).

c. Tindakan

Morfologi atap bangunan benar-benar membatasi potensi adaptivitasnya terhadap lingkungan. Ketika terjadi elaborasi respon dalam reaksi terhadap kondisi lingkungan, sebuah atap pintar bangunan perlu untuk mengambil nilai dari alam dan memperluas karakteristik komponennya yang adaptif berikut ini:

- Karakteristik material
- Karakteristik formal
- Karakteristik komposisional

Hal yang terpenting bukanlah tipe adaptasi oleh dinding, melainkan pada waktu dan luasannya. Waktu yang tersedia untuk melakukan sebuah respon bergantung pada jenis kejadian yang memunculkan respon.

3.1.3 Morfologi Atap pintar Bangunan

Morfologi atap dalam konteks ini berarti seperangkat komponen yang menyebabkan perilaku adaptif sesuai fungsinya serta sudah terorganisir baik hubungan maupun interaksinya dalam selubung bangunan. Banyak jenis material dan komponen yang adaptif dapat digunakan dalam sebuah selubung pintar bangunan. Material dan komponen tersebut dapat diaplikasikan secara spesifik, atau lebih mampu memenuhi berbagai fungsi secara bersamaan. Tiga karakter khusus akan dibahas lebih lanjut antara lain:

a. Modulasi

Atap bangunan dapat tersusun atas pasangan modul yang bebas, dimana komponen individu dengan mudah diganti dan ditambah. Atap tersusun secara menyeluruh dan terpadu, dimana setiap komponennya adalah sangat penting baik dalam desain maupun cara kerja. Pada prakteknya, atap dikomposisikan dengan campuran dua hal tersebut.

b. Hirarki

Untuk menjelaskan hubungan antar modul-modul yang beragam sehingga menjadi satu kesatuan fungsi yang baik maka komponen, tugas dan tujuan perlu diorganisir ke dalam tingkatan hirarki. Level yang lebih tinggi biasanya memiliki lingkup yang luas namun kurang detail, meskipun level yang lebih rendah menaungi lingkup yang lebih sempit, namun akan lebih fokus dan lebih detail. Menurut Hagrais et al. (2003), sebuah pendekatan hirarki mengurangi kompleksitas peraturan kontrol dan mengurangi kebutuhan informasi untuk memproses informasi.

c. Konektivitas

Untuk mengkoordinasi dan menyesuaikan waktu proses berpersepsi, beralasan, dan bertindak maka komunikasi antara sistem komponen yang beragam merupakan hal yang sangat penting. Dalam konteks ini konektivitas dapat didefinisikan sebagai kemampuan untuk berhubungan atau berkomunikasi dengan komputer atau sistem komputer lainnya. Hal ini

ditunjukkan oleh sifat topologi dari jaringan yang menghubungkan sensor-sensor kepada pusat pengolah data (Brignell & Wite 1999:251). Konektivitas antara komponen-komponen pada atap pintar bangunan dapat terjadi baik melalui teknologi maupun infrastruktur komunikasi dimana informasi dan sumber data melaluinya. Untuk dapat berkomunikasi antara satu dengan yang lain, komponen-komponen atap harus menunjukkan kesesuaian dan kecocokan yang tepat dalam mengendalikan beragam mesin yang perlu dihubungkan.

3.1.4 Konsep Arsitektural Atap pintar Bangunan

Atap pintar bangunan dapat didefinisikan dengan kriteria dasar dalam cakupan yang luas seperti material dan komponen di dalamnya. Dalam lingkup penelitian ini, hal tersebut dipilih untuk memfokuskan pada karakteristik perilaku selubung terutama bagaimana elemen atap agar dapat beradaptasi terhadap berbagai macam situasi lingkungan. Penelitian ini mengeksplorasi aspek fungsional dan desain yang sesuai dari atap pintar bangunan, serta untuk menganalisis alternatif penggunaan material, bentuk dan komposisi atap bangunan untuk pendinginan alami. Setelah dilakukan pengembangan definisi operasional untuk sebuah atap pintar bangunan, fungsi atap diharapkan dapat menunjukkan peningkatan kualitas pendinginan alami pada ruang. Dalam lingkup pembahasan ini, penitikberatan terutama diarahkan untuk tujuan kebutuhan pengguna akan pendinginan alami.

3.2 Kenyamanan Suhu di Daerah Tropis Lembab

Bradshaw (2006) mengatakan suhu merupakan ukuran terhadap derajat intensitas panas. Perbedaan suhu antara dua titik memberikan potensi yang memungkinkan adanya perpindahan panas dari titik yang lebih hangat ke titik yang lebih dingin. Berdasar Tick and Samah, 2004, (dalam Nugroho, 2007), di daerah katulistiwa, rentang suhu tahunan sangat kecil dan berkisar antara 2°C to 3°C. Sedangkan suhu harian memiliki rentang yang lebih besar yaitu 5°C to 8°C di daerah pantai dan 8°C to 12°C daerah daratan /pulau. Kelembaban udara menurut Bradshaw (2006) merupakan jumlah uap air pada suatu ruang

tertentu, sedangkan kelembaban absolut merupakan kerapatan uap air pada tiap satu volumenya. Kelembaban yang tinggi dapat memperlambat penguapan melalui keringat dan pernafasan. Semakin kering dan panas udara, maka semakin cepat tingkat aliran pelepasan panas dari kulit ke udara. Kelembaban relatif/ *relative humidity (RH)* merupakan perbandingan antara kandungan uap air pada suatu saat dengan kandungan uap air pada titik jenuh dalam suhu saat itu (Satwiko,2004). Menurut Satwiko (2004) batas nyaman untuk kelembaban adalah $40\% < RH < 60\%$. Berbeda dengan suhu, untuk kelembaban mencapai maksimal di pagi hari dan minimum di siang hari, (Nugroho,2007). Menurut Tick dan Samah (2004) perbedaan suhu tahunan adalah kecil dan sebagian besar berkisar antara 2°C ke 3°C . Meskipun demikian cakupan suhu udara harian mempunyai kisaran yang bermacam-macam mulai dari 5°C ke 8°C pada kawasan pantai dan 8°C ke 12°C pada area dekat pulau.

Penelitian Samirah (1999) menemukan suhu udara tahunan yang hampir konstan yaitu berkisar antara 26°C dan 27°C . Rata-Rata suhu udara siang hari maksimum adalah antara 29°C sampai 32°C , sedangkan rata-rata suhu udara minimum adalah antara 22°C sampai 24°C pada malam hari pada kawasan pantai. Suhu maksimum rata-rata sepanjang hari adalah antara 31°C dan 34°C , dan pada malam hari rata-rata suhu minimum bervariasi antara 22°C dan 27°C . Secara umum, suhu udara yang paling rendah terjadi pada bulan angin monsun musim dingin, Desember ke Januari, dan suhu udara paling tinggi pada bulan yang secara relatif kering, terutama pada bulan Mei sampai Juni.

Menurut Abdul Majid (1996) rata-rata kelembaban relatif (RH) pada rumah tinggal adalah pada sekitar 80%. Nilai-nilai yang actual/nyata bagaimanapun berkisar antara 55% sampai hampir 99%. Tick and Samah (2004) berpendapat bahwa rata-rata kelembaban relatif bulanan terbentang dari 70% sampai 90% dan kelembaban relatif rendah yang secara normal bersamaan dengan musim kemarau, sementara kelembaban relative yang tinggi bersamaan atau berhubungan dengan musim penghujan. Di dalam siklus harian, kelembaban relatif berkebalikan dengan suhu udara, yaitu kelembaban maksimum terjadi pada pagi hari dan kelembaban minimum terjadi pada sore hari. Sementara untuk suhu udara, cakupan kelembaban relatif harian adalah

lebih besar dari cakupannya. Untuk itulah, pergerakan udara dari angin kencang, dan angin local dari laut dan daratan yang berhembus sepoi-sepoi, itu adalah satu-satunya cara untuk memberikan kenyamanan dari kondisi iklim yang tidak nyaman. Wilayah Indonesia yang berada pada daerah tropis lembab memiliki karakteristik, antara lain (Satwiko, 2004):.

- Memiliki suhu udara yang relatif tinggi, dan perbedaan suhu antara siang dan malam yang relatif kecil
- Angin umumnya berhembus kuat pada siang hari, sedangkan pada pagi dan malam hari relatif rendah
- Memiliki kelembaban udara yang relatif tinggi (berkisar antara 60-95%)
- Radiasi matahari relatif tinggi ($>900\text{W/m}^2$)

Dengan adanya tingkat kelembaban dan suhu udara yang cukup tinggi akibat radiasi matahari, maka pada bangunan sebaiknya memiliki cukup bukaan untuk menjamin adanya sirkulasi udara. Pada ruang-ruang yang memiliki bukaan ataupun yang berada di sekitar bangunan hendaknya memiliki peneduh. Hal ini dapat digunakan untuk menghindari pemanasan bangunan akibat radiasi langsung dari sinar matahari. Panas tertinggi tercapai sekitar dua jam dari tengah hari (Lipsmeier, 1980), hal ini disebabkan radiasi matahari bergabung langsung dengan suhu udara yang sudah tinggi, sehingga fasad daerah barat bangunan akan memiliki penambahan panas yang cukup besar. Dengan adanya radiasi matahari yang cukup besar, maka pemilihan material untuk bahan bangunan perlu mempertimbangkan faktor-faktor penyerapan dan pemantulan untuk membantu mengurangi radiasi matahari yang dapat memanaskan bangunan. Iklim adalah kondisi fisik lingkungan yang tergantung dari karakteristik lokasi geografisnya. Iklim pada suatu daerah terdiri dari keadaan cuaca yang meliputi unsur suhu udara, kelembaban, angin, radiasi matahari dan hujan. Cuaca adalah keadaan suatu waktu tertentu dari lingkungan atmosferik pada suatu lokasi tertentu. Rumusan integrasi kondisi cuaca dalam kesatuan waktu merupakan iklim. Iklim dapat dibedakan menjadi dua yaitu iklim makro dan mikro. Iklim makro adalah keseluruhan kejadian meteorologis yang dipengaruhi kondisi topografi bumi dan perubahan di muka bumi. Iklim mikro adalah iklim dalam ruang terbatas, misalnya bangunan, jalan, dan ruang. Iklim tropis pada daerah katulistiwa dapat dibedakan menjadi dua

daerah iklim utama yang masing-masing dapat dibedakan juga menjadi dua daerah iklim sekunder dan dua daerah iklim tambahan. Iklim tropis utama ini dapat dibedakan menjadi dua yaitu iklim tropis kering dan iklim tropis lembab. Iklim tropis kering ditandai dengan kelembaban absolut atau tekanan uap dibawah 25 mb dan suhu udara yang tinggi pada bulan-bulan musim panas hingga lebih dari 50° C dan radiasi matahari yang tinggi. Pada musim dingin suhu udara dapat mencapai 0° C dengan hujan yang sangat sedikit yang kadang-kadang dapat terjadi hujan lebat yang turun secara tiba-tiba. Perbedaan suhu udara mencapai 20° C terutama pada musim dingin. Daerah tropis kering ini terletak di 15° LU - 30° LU serta 15° LS - 30° LS. Iklim tropis utama tropis lembab terletak di 0° - 15° LU serta 0° - 30° LS. Iklim ini ditandai dengan kelembaban udara yang relatif tinggi, sekitar 90%, dengan curah hujan yang tinggi pula. Suhu udara rata-rata 23° C per tahun, yang dapat meningkat sampai dengan 38° C pada musim panas. Perbedaan antar musim relatif kecil di mana perbedaan ditandai dengan periode sedikit hujan dan periode banyak hujan, sehingga fluktuasi suhu udara harian dan tahunan lebih kecil dibandingkan dengan iklim tropis kering. Daerah iklim tropis lembab mempunyai dua daerah iklim sekunder, yaitu: daerah hutan hujan tropis dan daerah musim savana lembab.

Indonesia terletak di 5° 39 LU dan 10° 22 LS serta 95° 10 BB dan 141°20 BT yang mempunyai iklim tropis panas lembab. Iklim tropis panas lembab ini berada di daerah katulistiwa dan meluas sampai kira-kira 15° LU dan 15° LS. Menurut Evans Martin (Felixta, 1990) daerah dengan karakteristik tropis panas lembab mempunyai ciri-ciri suhu udara udara 20° C- 30° C, kelembaban udara yang cukup tinggi > 60 % dan antara 90% - 100% pada keadaan maksimum, curah hujan yang tinggi rata-rata di atas 1000 mm/th dan kondisi langit yang rata-rata berawan sekitar 5 % Dengan melihat kondisi dan letak geografis Indonesia maka kondisi kenyamanan termal dalam bangunan menjadi permasalahan utama dan lebih disebabkan kondisi kelembaban dan suhu udara yang sangat tinggi.

3.2.1 Kenyamanan Suhu pada Bangunan

Nilai kenyamanan suhu pada ruang dalam sejauh ini dipelajari dengan pertimbangan nilai performa ruang luar (de Dear RJ, 2002). Asumsi tentang standar kenyamanan ruang dalam adalah berhubungan dengan ruang luarnya. Model kenyamanan ruang dalam seperti Predicted Mean Vote (PMV) digunakan untuk menyamakan kondisi termal berdasar pada enam variabel kenyamanan termal, yang memiliki parameter keseimbangan panas, dan hasil dalam skala -3 sampai +3 (dimana -3 adalah dingin, 0 adalah netral, dan +3 adalah panas). Indeks PMV sebagian telah divaliditas dalam konteks ruang dalam yang bermacam-macam (McIntyre DA., 1980; de Dear RJ, 1985) dan nilai PMV antara ± 1 sangat bergantung terhadap "termally acceptable" (Fanger, 1970), ASHARE, 2001). Menurut Fanger (1970), generalisasi pada unit skala PMV kira-kira sesuai untuk perubahan pada suhu udara $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\Delta\text{PMV} / \Delta t = 1/31$ di bawah nilai range tengah insulasi pada pakaian dan tingkat metabolisme. Spagnolo (2003) menyatakan bahwa kisaran selisih sekitar $\pm 1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ dari suhu udara netral masih memenuhi batasan kenyamanan termal. Skala PMV dikembangkan untuk mendeskripsikan ketidaknyamanan termal maka direlevansikan terhadap kondisi-kondisi yang sangat berbeda dari kondisi netral, seperti beragamnya kondisi iklim di luar bangunan. Peralatan psychometric sebagai elemen utama dalam peneliffian kenyamanan termal (termasuk model-model seperti PMV) mempunyai kinerja jauh di bawah iklim lingkungan luar bangunan serta menyisakan lebih banyak yang belum teruji. Fakta bahwa iklim mikro luar bangunan umumnya mendorong manusia untuk memperkirakan kondisi iklim ruang luar ke dalam cakupan yang lebih lebar dari kondisi iklim ruang dalam. Secara konseptual, kita dapat menganggap lingkungan termal manusia sebagai sebuah zona konsentris dengan pilihan-pilihan termal pada pusatnya, yang dapat diurutkan dari kondisi termal yang dapat diterima, kondisi yang tidak nyaman, kondisi yang cukup menekan, kondisi yang sangat menekan, dan yang terakhir, lingkungan termal yang berbahaya.

3.2.2 Suhu Netral

Menurut bukti yang telah dikemukakan Nicol (2004), kenyamanan suhu bergantung pada suhu udara ruang luarnya. Humphreys dan Nicol (2000) telah menunjukkan bahwa hubungan antara suhu udara nyaman atau T_c dan suhu udara ruang luar atau T_o adalah sangat stabil. Penetapan batas kondisi suhu udara nyaman adalah suatu permasalahan tersendiri. Berikut ini beberapa pengertian tentang kenyamanan suhu.

a. Suhu Nyaman

Suhu udara nyaman di dalam ruang telah dideskripsikan oleh International Standards (ISO) 7730 (ISO 7730, 1994), dan ASHRAE 55-1992 yang tidak memperhitungkan variasi iklim dan perilaku adaptif manusia. Analisis pada penelitian di lapangan mengenai kenyamanan termal menunjukkan bahwa suhu udara nyaman dalam ruang bergantung pada suhu udara rata-rata ruang luar (Humphreys, 1978; Auliciem, 1981; Nicol, 1994; de Dear, 1993, 1998; Brager, 1998). Ini berarti bahwa kita bisa menghubungkan antara suhu udara kenyamanan ruang dalam dengan iklim, lokasi, dan musim. Humphreys (1978) menemukan bahwa suhu udara kenyamanan dapat diperoleh dari nilai tengah suhu udara ruang luar dengan E (1)

$$T_c = 0,534 T_o + 11,9 \quad (1)$$

Auliciems memperbaiki persamaan Humphreys dengan menghapus beberapa elemen penelitian tersebut di atas dan menambah lebih banyak informasi dari penelitian lain (Auliciems, 1981, 1983). Perbaikan ini menambah data menjadi 53 penelitian di lapangan dalam zona iklim yang beragam, mewakili banyak negara dan lebih banyak jenis iklim. Setelah mengkombinasikan data untuk bangunan dengan ventilasi alami dan bangunan dengan pengkondisian udara, hasil analisis mengarah pada sebuah persamaan yang menggunakan suhu udara luar (T_o) dan suhu udara dalam (T_i), yang menghasilkan persamaan (2):

$$T_c = 0,48 T_i + 0,74 T_o + 9,22 \quad (2)$$

Auliciems juga mengajukan sebuah rekomendasi untuk semua bangunan yang menyelubungi fasadnya dengan ventilasi alami serta bangunan dengan pengkondisian udara (Auliciems, 1986). Hubungan tersebut ditunjukkan oleh persamaan (3):

$$T_c = 0,3 T_o + 17,6 \quad (3)$$

Nicol melakukan beberapa penelitian dalam kondisi iklim yang berbeda. Pada penelitian yang pertama di Pakistan (Nicol, 1996), ia membuat sebuah hubungan antara suhu udara nyaman dan suhu udara luar yang ditunjukkan oleh persamaan (4):

$$T_c = 0,38 T_o + 17,0 \quad (4)$$

Pada penelitian yang kedua di Pakistan (Nicol, 1996), Nicol menemukan sebuah regresi kedua yang ditunjukkan oleh persamaan (5):

$$T_c = 0,36 T_o + 18,5 \quad (5)$$

Hubungan tersebut menunjukkan dengan jelas bahwa suhu udara nyaman berhubungan dengan suhu udara luar dan dengan iklim tentunya. Perbedaan antara hubungan-hubungan tersebut menunjukkan bahwa tidak ada suhu udara nyaman yang universal. Setiap komunitas harus mempunyai persepsi sendiri-sendiri terhadap kenyamanan termal sesuai dengan iklim, kebiasaan lokal, dan jenis bangunannya.

b. Suhu Udara Netral

Cara lain yang menarik untuk menguji sensasi termal adalah melalui penggunaan suhu udara netral, yaitu kondisi termal dimana manusia tidak merasa panas maupun dingin, tetapi netral (Nikolopoulou, 2005). Pernyataan ini diungkapkan pertama kali oleh Humphreys (1975), saat ia menunjukkan bahwa variasi dari suhu udara netral terkait dengan variasi dari suhu udara rata-rata (Humphreys, 1975). Nicol dan Humphreys (1973) menunjukkan hasil dari penelitian di lapangan yang dilakukan di UK, India, Irak, dan Singapura. Hasilnya memperlihatkan bahwa kenyamanan rata-rata dapat sedikit berubah menurut suhu udara rata-rata yang dirasakan. Catatan bahwa suhu udara yang baik adalah di atas 30°C sangatlah tidak nyaman dalam beberapa kasus. Penelitian Humphreys (1975) yang selanjutnya menunjukkan bahwa suhu udara yang dirasa nyaman oleh manusia adalah sangat berhubungan dengan suhu udara rata-rata yang dirasakannya. Dengan kata lain manusia menemukan cara untuk membuat diri mereka merasa nyaman pada kondisi-kondisi yang sudah biasa mereka alami. Penelitian terbaru yang dilakukan oleh Humphreys dan Nicol (2000) dengan menggunakan data yang dikumpulkan oleh de Dear dan Brager (1998)

menunjukkan bahwa pengambilan data yang berbeda-beda dalam menghitung suhu udara nyaman, sangatlah sesuai dengan penemuan yang terbaru ini. Hubungan tersebut memungkinkan bangunan untuk dapat memprediksi suhu udara yang akan menciptakan kenyamanan dengan menghitung suhu udara luar rata-rata setiap bulannya, yang diberikan oleh badan meteorologi. Hasil untuk Islamabad, Pakistan, mengindikasikan bahwa suhu udara nyaman ketika dibandingkan dengan suhu udara luar menunjukkan perbedaan suhu udara yang harus dicapai bangunan dalam upaya menghasilkan ruang dalam yang nyaman. Dalam kasus ini bangunan harus lebih tinggi suhunya dibanding suhu udara rata-rata ruang luarnya pada musim dingin dan pada kondisi yang agak dingin pada saat musim panas, namun sebagian diantaranya dapat dicapai melalui cara pasif (khususnya pada saat musim dingin). Suatu zona nyaman pada suhu udara dapat diterima dengan selisih 2-3 °C di atas atau di bawah suhu udara maksimal.

c. Zona Suhu Netral di Indonesia

Metode analisis dalam mengevaluasi zona kenyamanan telah ditinjau oleh beberapa penulis (Rajeh, 1988; Abdul Malek dan Young, 1993; Zain Ahmed, Sayigh, dan Othman, 1997; Abdul Rahman dan Kannan, 1997, Hamdan, 2007), dengan menggunakan suhu udara netral. Ini adalah suhu udara dimana respondennya pada beragam jenis penelitian tidak merasakan panas atau dingin, yang dapat dikayakan "netral" atau "nyaman". Ini adalah nilai tengah dari zona nyaman, sebagai suatu nilai rata-rata untuk banyak subyek eksperimen. Terdapat empat faktor yang dapat dikombinasi secara bersamaan untuk menghasilkan suhu udara netral yang beragam bagi individu: lingkungan termal, tingkat aktivitas, insulasi termal dari cara berpakaian dan keadaan psikologis dari individu. Range suhu udara netral dewasanya berkisar antara 17 °C hingga 30 °C. Range suhu udara netral yang telah diobservasi tersebut adalah efektif sebesar 13 derajat. Namun perlu disimpulkan bahwa penyesuaian diri juga memiliki dampak terhadap suhu udara yang dibutuhkan untuk netralitas termal. Szokolay merekomendasikan penggunaan dari Annual Mean Suhu udarae (AMT) atau suhu udara rata-rata tiap bulan untuk digunakan pada persamaan

Auliciems pada data di Kuala Lumpur (Rajeh, 1988). Suhu udara kenyamanan atau suhu udara netral dapat diprediksi dari persamaan linier untuk bangunan-bangunan dengan ventilasi alami seperti yang disebutkan oleh Hamdan (2007):

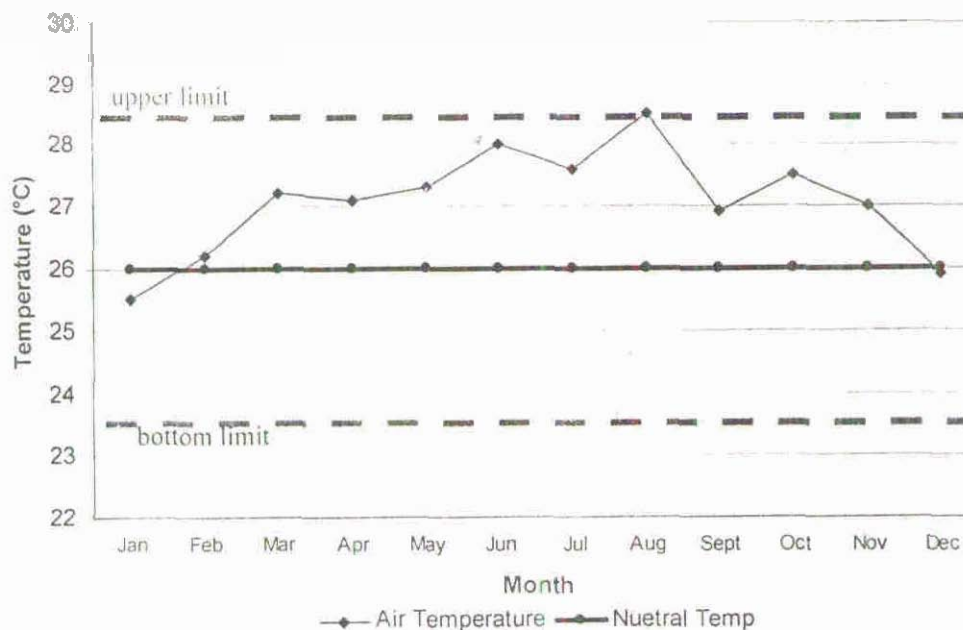
$$T_n = 17,6 + 0,31 \times T_{amt}$$

Dimana : T_n = range suhu udara netral dengan ± 2 °K

T_{amt} = Annual Mean Suhu udara of the month

(suhu udara rata-rata tiap bulan)

Komparasi zona kenyamanan dengan menggunakan persamaan di atas dan suhu udara rata-rata tiap bulan, dilakukan dengan menggunakan data iklim Indonesia. Ini akan memberikan sebuah gambaran umum mengenai range zona kenyamanan di Indonesia. Menurut Szokolay (1997), dengan range zona kenyamanan sebesar 5°C, suhu udara kenyamanan termal dapat berkisar sebesar 2,5°C di atas dan di bawah suhu udara netral.



Gambar 3.1: Contoh Batas Suhu udara Netral pada Data Bulanan Iklim

Pola iklim harian pada iklim tropis membutuhkan strategi desain bangunan untuk mencapai kenyamanan termal. Suhu udara ruang luar dengan data bulanan telah digambarkan pada Gambar 2.1. Menurut Gambar 2.1, suhu udara ruang luar meningkat hingga 28,5 °C pada bulan Agustus. Suhu udara terendah sebesar 25,5 °C pada bulan Januari dan suhu udara rata-rata

sebesar 27 °C. Menurut formula kenyamanan Szokolay, suhu udara netral perlu dipertahankan pada 26 °C. Nilai tunggal dihasilkan dari studi komparasi ini dengan pemeriksaan studi sebelumnya. Dengan lebar range zona kenyamanan sebesar 5°C (Szokolay, 1997), suhu udara kenyamanan termal dapat berkisar sebesar 2,5°C di atas dan di bawah suhu udara netral. Dengan menggunakan suhu udara netral sebesar 26 °C sebagai suatu contohnya, batas tertinggi zona kenyamanan dapat mencapai 28,5 °C. Suhu udara netral ini adalah untuk kondisi-kondisi tanpa adanya pergerakan udara.

3.3 Prinsip Desain Bangunan untuk Pendinginan Alami di Daerah Tropis Lembab

Menurut Gut et al. (1993), faktor-faktor utama iklim yang mempengaruhi kenyamanan manusia serta berkaitan dengan bangunan antara lain:

- Suhu udara udara, yang mempengaruhi perbedaan antara siang dan malam, serta antara musim panas dan musim dingin;
- Kelembaban dan curah hujan;
- Penyerapan dan pemantulan radiasi, pengaruh kondisi langit, pergerakan udara dan angin.

Menurut Gut et al. (1993), hal utama yang perlu dipertimbangkan dalam mendesain sebuah bangunan tropis yang tanggap iklim antara lain:

- Meminimalisir perolehan panas selama siang hari dan mengoptimalkan pelepasan panas di malam hari pada musim panas, dan sebaliknya pada musim dingin;
- Meminimalisir panas dalam ruang saat musim panas;
- Memilih tapak yang sesuai dengan kriteria iklim mikro;
- Mengoptimalkan struktur bangunan (terutama dalam penyimpanan dan perlambatan waktu perambatan panas);
- Pengendalian radiasi matahari;
- Pengaturan sirkulasi udara.

Beberapa desain bangunan untuk kondisi iklim hangat mengupayakan untuk mengeluarkan sebagian dari besarnya energi panas yang ditimbulkan suhu udara lingkungan dan intensitas radiasi matahari. Interaksi bangunan terhadap

radiasi matahari merupakan sumber panas terbesar pada ruang dalam bangunan. Cara alami yang dapat dilakukan untuk mendinginkan bangunan, adalah dengan meminimalisir radiasi matahari, menentukan orientasi bangunan yang tepat, menyediakan jarak yang memadai terhadap bangunan sekitar, serta menggunakan elemen peneduh untuk mengendalikan masuknya radiasi matahari ke dalam bangunan dengan lebih efektif. Bila suhu udara lingkungan lebih tinggi daripada suhu udara di dalam ruang, maka panas akan masuk ke dalam bangunan dengan berkonveksi melalui lubang ventilasi, hal ini perlu dikurangi hingga mampu mencapai nilai minimum. Prinsip-prinsip desain bangunan tropis yang memungkinkan perlu dimasukkan ke dalam desain bangunan. Prinsip-prinsip bangunan tropis yang didiskusikan disini terdiri dari elemen-elemen seperti atap, dinding, bukaan, dan lansekap.

3.3.1 Prinsip Desain Elemen Atap

Saat ini desain bangunan dituntut untuk dapat menciptakan penahan termal yang tinggi. Sehingga dilakukan upaya untuk mengkondisikan suhu udara dan kelembaban rata-rata ruang dalam bangunan agar tetap stabil dan tidak dipengaruhi oleh perubahan-perubahan yang terjadi pada kondisi di luar bangunan. Pengendalian kondisi ruang dalam bangunan secara pasif dapat dilakukan dengan pengaturan suhu udara di luar bangunan melalui desain atap bangunannya. Material-material bangunan seperti beton, batu bata dan material batuan solid lainnya dinilai memiliki massa termal yang tinggi. Selain itu, material-material yang memiliki massa termal tersebut dinilai sangat efektif dalam mentransfer panas dengan cepat, dan kebanyakan digunakan sebagai media penyerapan panas radiasi matahari. Material ringan seperti kayu, baja, dan beragam material atap bangunan, memiliki kemampuan untuk menyerap panas dengan cepat serta mendinginkannya kembali dengan cepat. Konstruksi atap komposit dapat menjadi sebuah solusi yang ideal, sesuai dengan kondisi iklim lokalnya. Dari suatu tinjauan literatur ditemukan bahwa terdapat empat faktor dalam mendesain atap tropis. Empat faktor tersebut antara lain adalah pembayangan matahari oleh dinding, pemantulan sinar matahari, material termal, dan insulasi termal.

a. Pembayangan Sinar Matahari pada Dinding

Pengaruh dari perlindungan sinar matahari pada atap adalah lebih kecil dari perlindungan sinar matahari pada jendela. Sehingga jika suatu proyek menghabiskan biaya yang besar, pilihan sumber utama untuk dihemat adalah pada perlindungan dinding. Garde (2004) menekankan bahwa suatu kelebihan panas di atas 2°C telah diobservasi pada ruang-ruang dengan atap beton ekspos berwarna diangan bangunan tanpa atap ekspos terhadap radiasi matahari. Perlakuan penting yang dapat dilakukan terhadap kasus tersebut adalah dengan mengekspos sebagian besar atap pada orientasi timur dan barat yang mendapat sinar matahari lebih banyak, dan lebih sedikit pada permukaan utara dan selatan. Untuk kasus permukaan lainnya dapat diperbolehkan, atau untuk memenuhi kebutuhan-kebutuhan tertentu (Garde 2004).

b. Pemantulan Sinar Matahari pada Atap

Penggunaan permukaan yang memiliki daya pantul untuk menghindari panas matahari serta penggunaan insulasi yang dapat memantulkan cahaya merupakan hal yang paling efektif dalam mengembangkan kinerja loteng. Menurut Rosangela (2002), penggunaan suatu permukaan berwarna putih untuk memantulkan cahaya diindikasikan sebagai performa yang paling baik, serta mampu meminimalisir kebutuhan insulasi. Kemudian, berbagai jenis atap memiliki performa yang hampir serupa ketika permukaan berwarna putih dicoba untuk digunakan. Untuk perlindungan rumah dengan permukaan berwarna gelap terhadap pantulan sinar matahari, direkomendasikan untuk menggunakan insulasi sebesar 6 cm – 10 cm. Sedangkan pada atap dengan warna-warna medium, tidak digunakan insulasi untuk perlindungan matahari.

c. Material Termal pada Atap

Variasi pada ketebalan atap menyebabkan suatu perbedaan dalam kinerja kenyamanan bangunan. Mallick (1996) mengindikasikan bahwa ruangan dengan atap yang lebih tebal cenderung lebih nyaman. Perbandingan suhu udara pada rumah-rumah dengan ketebalan atap berkisar antara 125 mm – 500 mm menunjukkan bahwa ruang-ruang dengan atap yang lebih tebal cenderung lebih nyaman, terutama ketika musim panas dan kering antara bulan Maret dan Juni di Bangladesh. Rumah-rumah yang memiliki atap tebal

dan lantai yang lebih rendah dapat menjadi lebih nyaman sepanjang tahunnya tidak seperti rumah dengan lantai yang tinggi (Fuad H. Mallick, 1996). Transmisi termal pada material tertentu bergantung pada peralatan termal (dalam hal ini: konduktivitas termal) dan ketebalan material. Tingkat konduktivitas termal yang lebih rendah akan menyebabkan transmisi termal yang rendah pula. Sama halnya dengan material insulasi yang lebih tebal akan menyebabkan transmisi termal yang rendah (Mahlia, 2007). Dari pengetahuan tradisional, material-material bermassa ringan seperti kayu cagak digunakan untuk daerah beriklim panas-lembab ketika suhu udara dalam ruangan menurun drastis di malam hari, yaitu ketika tekanan angin menurun. Bangunan-bangunan bermassa tinggi melakukan proses pendinginan secara lebih lambat selama malam hari, yang menyebabkan ketidaknyamanan di waktu tidur. Selama kurun waktu 24 jam bangunan-bangunan bermassa tinggi dapat menyebabkan waktu-waktu yang tidak nyaman meningkat, dan hanya pada waktu siang hari bangunan-bangunan tersebut memiliki jauh lebih banyak keuntungan. Kesimpulannya, jika terdapat ventilasi tambahan di malam hari pada bangunan-bangunan bermassa tinggi, maka akan dapat lebih nyaman dibandingkan dengan bangunan-bangunan bermassa rendah (Rosangela, 2002).

d. Insulasi Termal pada Atap

Perletakkan bukaan pada selubung bangunan merupakan suatu parameter yang sangat berkaitan dengan ketebalan dan jenis material bangunan yang digunakan serta kemampuannya untuk menghambat perpindahan panas ke dalam struktur bangunan pada waktu tertentu. Parameter penting lain dalam menentukan performa termal bangunan, adalah kebutuhan energi untuk menciptakan kenyamanan termal pada ruang yang dihuni. Hasilnya mengindikasikan bahwa material insulasi untuk meningkatkan suhu udara memiliki konduktivitas termal yang lebih tinggi, dan beban pendinginan yang lebih tinggi pada selubung bangunan dengan tingkat yang berbeda-beda, tergantung jenis material insulasinya. Mahlia (2007), menganjurkan *fiberglass-urethane* sebagai material insulasi yang paling ekonomis di antara material insulasi lainnya. Bila ditinjau dari konduktivitas termalnya, perlite memiliki konduktivitas yang paling tinggi di antara material lainnya.

Konduktivitas termal yang lebih tinggi dari suatu material insulasi menunjukkan daya tahan termal yang lebih rendah; untuk itu, penggunaan insulasi dengan ukuran yang paling tebal dibutuhkan untuk mendapatkan insulasi termal yang optimal. Ketebalan material insulasi merupakan sebuah aspek yang penting dalam desain bangunan karena material insulasi yang tebal akan mengurangi luas ruang dalam bangunan secara signifikan. Insulasi termal merupakan kontributor utama serta langkah pertama yang praktis dan logis, mengacu pada pencapaian efisiensi energi terutama dalam hal beban yang diterima selubung bangunan, yang mendominasi bangunan-bangunan pada lokasi tapak dengan kondisi iklim pantai yang kering. Kinerja termal selubung bangunan ditentukan penggunaan material bangunannya yang dikarakteristikan dengan kemampuannya dalam menyerap dan memancarkan panas matahari serta ultraviolet pada komponen yang sesuai termasuk insulasinya. Penempatan material insulasi ke dalam komponen bangunan dapat menimbulkan dampak terhadap kinerja bangunan. Kinerja yang paling baik dapat dicapai dengan menempatkan material insulasi di dekat pusat masuknya aliran panas. Tetapi pada umumnya, digunakan insulasi di dalam atau di antara rongga atap (Al-Homoud, 2005).

Atap bangunan dipengaruhi dari tiga mekanisme perpindahan panas; konduksi, konveksi, dan radiasi. Perolehan radiasi matahari pada atap permukaan luar bangunan akan diubah menjadi panas ke dalam bangunan oleh penyerapan dan perpindahan panas secara konduksi. Pada waktu yang bersamaan, perpindahan panas terjadi dari udara di luar bangunan ke permukaan atap luar dan permukaan atap dalam ke udara di dalam bangunan. Hal tersebut menyebabkan terjadinya perolehan panas dari luar atap bangunan yang sangat besar secara konduksi melalui atap bangunan, serta kebocoran udara ketika area dalam bangunan memiliki suhu udara yang lebih rendah. Dalam upaya mengurangi aliran panas dari luar ke dalam bangunan, biasanya digunakan material insulasi. Material tersebut memiliki konduktivitas termal yang sangat rendah. Dalam hal ini, material insulasi yang sesuai dengan ketebalan optimalnya dibutuhkan untuk mendapatkan sistem pendinginan yang lebih hemat. Ketebalan insulasi akan meningkatkan biaya investasi,

namun akan mengurangi biaya penggunaan energi, hingga pada titik optimum ketebalan material tersebut akan memberikan kontribusi yang sangat besar dalam penghematan biaya secara keseluruhan.

3.3.2 Definisi Arsitektural Atap

Selubung bangunan/atap itu meliputi segala sesuatu yang memisahkan bagian dalam bangunan dari lingkungan luar. Sambungan dari semua elemen nonstruktural untuk struktur bangunan juga disertakan. Akhirnya, diakui bahwa atap eksterior memainkan peran utama dalam menentukan kualitas estetika eksterior bangunan, dalam bentuk warna, tekstur dan asosiasi budaya. Panduan ini menunjukkan bahwa desain atap tersebut sangat kompleks dan banyak faktor yang harus dievaluasi dan diseimbangkan untuk menjamin tingkat kenyamanan termal, akustik dan visual yang diinginkan bersama-sama dengan keselamatan, aksesibilitas dan keunggulan estetika. Seperti dapat dilihat dari daftar fungsi bangunan rincian selubung bangunan/atap di bagian Fungsi dan Kinerja, selubung bangunan/atap berperan dalam hampir setiap fungsi bangunan, baik secara langsung atau tidak langsung dalam hubungannya dengan sistem bangunan lainnya.

Atap adalah suatu struktur padat yang kadang-kadang didefinisikan sebagai pelindungi suatu daerah. Umumnya, atap bangunan direncanakan dan *suprastruktur* yang mendukung, memisahkan ruang dalam bangunan menjadi suatu ruangan, atau menggambarkan suatu ruang dalam udara terbuka. Ada tiga jenis utama atap struktur: atap bangunan, atap batas luar, dan atap penahan.

Atap bangunan memiliki satu tujuan utama: untuk mendukung atap dan langit-langit. Atap memiliki tiga atau lebih komponen yang terpisah. Dalam konstruksi, atap bangunan biasanya akan memiliki elemen struktur (misalnya 2 x 4 *studs* di atap rumah), *insulation* dan *finish elements*, atau permukaan (seperti drywall atau panel). Selain itu, tembok rumah juga terdapat berbagai jenis pemasangan kabel listrik atau pipa. outlet listrik biasanya dipasang di dinding.

Bangunan atap sering menjadi karya seni eksternal dan internal, seperti ketika menampilkan karya mosaik atau ketika *mural* yang dilukis oleh mereka,

atau sebagai fokus desain ketika mereka menunjukkan tekstur atau setelah selesai dicat untuk efeknya. Dalam arsitektur dan teknik sipil, istilah tirai atap mengacu pada fasad bangunan yang tidak didukung beban tetapi berfungsi sebagai hiasan, finishing, depan, wajah, atau pelestarian sejarah. Atap biasanya dibangun oleh pembangun dan orang-orang yang pembangun pensiun. digunakan untuk atap kamar terpisah. Atap juga digunakan untuk membuat penghalang antara tempat-tempat atau benda.

3.3.3 Perkembangan Atap

Atap bangunan pertama yang melindungi manusia dari alam adalah sebuah gua yang memberikan tingkat privasi dan keamanan. Atap paling awal struktur bangunan berbentuk kubah yang dikombinasikan atap dan atap. Bentuk atap dominan berkembang, tergantung pada iklim dan bahan yang tersedia: bingkai kayu dan atap pasangan bata. Awal tempat penampungan di daerah beriklim hangat Afrika dan Asia digunakan kayu atau bambu bingkai atau tenunan tekstil. Di daerah lain yang memiliki iklim lebih berat bahan yang digunakan juga yang lebih berat seperti batu, batu dan tanah yang terbakar oleh matahari digunakan untuk menyediakan tempat penampungan yang lebih permanen dan perlindungan dari panas dan dingin. Untuk daerah pedesaan di negara-negara maju yang lebih kecil masih membangun bentuk-bentuk tempat berlindung. Di negara maju kita masih menggunakan selubung bangunan/atap dari bingkai kayu, meskipun keduanya telah berevolusi menjadi berbagai macam bahan-beberapa bahan alami dan buatan manusia. Atap berkembang secara independen sebagai elemen tahan air dengan bahan material mereka sendiri. Jadi, akhirnya atap, dinding dan lantai menjadi elemen yang berbeda dari selubung bangunan/atap dengan perubahan yang sangat sedikit di konsep, penggunaan dan bahkan materi. Sebuah hunian mungkin pada abad pertengahan memiliki atap ilalang dan lantai dari batu atau kotoran yang mengeras. Hunian tersebut masih dapat ditemukan sekarang di banyak daerah, di Amerika Serikat dan dunia.

Untuk mengambil salah satu unsur dari selubung bangunan/atap persyaratan dasar kinerja yang tetap sama dari abad pertengahan sampai

sekarang: perlindungan interior dari unsur-unsur luar (alam) dan keamanan bagi penghuninya. Namun, harapan kami telah jauh meningkat, baik dalam hal kinerja mutlak dan kemampuan untuk mengendalikan dampak air dari luar, sinar matahari dan suhu di luar lingkungan interior bangunan. Tergantung pada struktur masyarakat dan ekonomi, kebutuhan seperti tingkat kelanggengan sistem eksterior, skala dan perhiasan dan keinginan kita untuk memiliki berbagai pilihan selubung bangunan/atap eksterior juga dapat berbeda-beda.

Muncul industri-industri baru yang akan mengembangkan bahan isolasi dan fireproofing, kelembaban udara dan interior maupun eksterior. Baru-baru ini atap eksterior telah menjadi subjek utama dari bangunan studi ilmu pengetahuan, terutama karena peranan utamanya dalam membirikan panas, menghilangkan panas dan penetrasi kelembaban. Akibatnya, atap modern seal ini terdiri dari serangkaian kinerja "lapisan". Sebuah penampang atap eksterior khas berlapis hari ini menggambarkan kompleksitas bahwa pendekatan ini mengarah ke dalam praktek

3.3.4 Atap Ventilasi

Atap ventilasi adalah suatu struktur kosong yang membatasi dan kadang melindungi suatu area. Umumnya, atap ventilasi membatasi suatu bangunan dan menyokong struktur lainnya, membatasi ruang dalam bangunan menjadi ruangan-ruangan, atau melindungi atau membatasi suatu ruang di alam terbuka. Tiga jenis utama atap ventilasi adalah atap bangunan, atap pembatas (*boundary*), serta atap penahan (*retaining*). Atap bangunan memiliki dua fungsi utama, yaitu menyokong atap dan langit-langit, membagi ruangan, serta melindungi terhadap intrusi dan cuaca. Atap pembatas mencakup atap privasi, atap penanda batas, serta atap kota. Atap jenis id kadang sulit dibedakan dengan pagar. Atap penahan berfungsi sebagai penghadang gerakan tanah, batuan, atau air dan dapat berupa bagian eksternal ataupun internal suatu bangunan. Atap bangunan dipengaruhi tida mekanisme penghantaran panas: konduksi, konveksi, dan radiasi. Radiasi sinar matahari yang menerpa permukaan atap luar akan terkonversi menjadi panas lewat absorpsi atap dan kemudian masuk ke dalam bangunan lewat konduksi. Pada saat yang sama,

transmisi **termal** berupa konveksi berlangsung **dari** udara luar ke **permukaan** atap luar serta permukaan atap dalam ke udara dalam bangunan. Hal ini mengakibatkan **panas** yang masuk ke **bangunan didominasi** lewat sistem konduksi. Untuk menurunkan aliran **panas** dari luar ke **dalam** bangunan, material insulasi umumnya digunakan. Material ini memiliki konduktivitas **termal** yang **sangat rendah**. Dalam **permasalahan** ini, material insulasi yang cocok dengan ketebalan yang sesuai diperlukan **untuk mendapatkan sistem pendinginan yang ekonomis**. **Semakin tebal** insulasi, **semakin mahal** juga investasi yang diperlukan, akan tetapi **perencanaan energi** atau operasional **bangunan** akan lebih murah. Hal ini perlu dipertimbangkan sehingga antara **ketebalan** dan **perencanaan operasional** menjadi optimal dan **mencapai** tingkat penghormatan tertinggi.

3.35 Metode Pendinginan Atap

Pendinginan pasif pada **bangunan** memiliki **penekanan tersendiri**, termasuk pada **fitur-fitur pelengkap**nya. Hal ini termasuk mengurangi penerimaan **panas** yang tidak diinginkan dengan **kontrol sinar matahari**, shading, warna cerah, **dan sebagainya**. Pendinginan dapat diwujudkan lewat ventilasi malam hari, *night sky cooling*, atau evaporasi. **Beberapa** prinsip atau **peraturan** di bawah ini dapat diaplikasikan untuk semua sistem pendinginan pasif. **Enam** Peraturan Pendinginan Pasif yang Murah

- **Orientasi** bangunan dimana kebanyakan bukaan diletakkan pada utara dan selatan, sisanya pada timur dan barat
- Penggunaan kontrol sinar matahari serta **shading pada bukaan (teritisan, awning, lansekap atau taman, tirai, dan sebagainya**
- Penggunaan warna cerah pada atap
- Penggunaan jendela, ventilasi, serta **kipas jika dibutuhkan**
- **Massa termal water wall** untuk penyimpanan pendinginan malam hari dan penggunaan siang hari
- Pertimbangan **terhadap perencanaan**, serta **integrasi** desain untuk mendapatkan perencanaan semurah mungkin

- Penggunaan lansekap seefektif mungkin

Pada kebanyakan area, bangunan dengan ventilasi atap orientasi bukaan adalah ke arah selatan, massa termal akan memenuhi hampir semua pendinginan yang diperlukan.

3.3.5.1 Metode Pendinginan alami

Teknik pendinginan pasif dapat digunakan untuk mereduksi, atau dalam beberapa kasus mengeliminasi, kebutuhan pengkondisian udara mekanik pada area dimana pendinginan menjadi masalah utama. Pembiayaan dan efisiensi energi dipertimbangkan secara pribadi oleh pemilik maupun pembangun. Terdapat tiga sumber utama dari panas, yakni sinar matahari langsung pada bangunan dan melewati jendela maupun *skylights*; transfer panas dan infiltrasi pada temperatur eksterior menyangkut material dan elemen struktur, serta panas dalam bangunan yang diproduksi oleh alat-alat dan penghuni itu sendiri. Dari ketiganya, sumber pertama merupakan problem terbesar di negara-negara asia tenggara, tetapi sekaligus menjadi yang paling mudah dikontrol. Tabel di bawah ini menunjukkan penerimaan panas rata-rata dari setiap sumber pada rumah keluarga kecil tipikal dengan suhu rata-rata 75°F pada bulan Juli. Rumah tersebut dibangun berdasarkan kode energi lokal dengan orientasi timur-barat. Dua pertiga dari total *glazing* menghadap ke selatan. Sisa kaca terletak pada atap barat dan timur tanpa naungan atau teritisan. Rumah ini mengalami kelebihan panas antara 250-450 ribu BTU setiap hari di bulan Juli. Lebih buruk lagi, rumah ini memerlukan sekitar 4-8 ton pengkondisian udara untuk menangani penerimaan panas dan menjaga ruangan tetap nyaman di sore hari.

3.3.5.2 Kontrol Penerimaan Panas

Pada umumnya, teknik dan prinsip pemanasan sinar matahari pasif dapat diadaptasikan untuk pendinginan alami. Insulasi yang mencegah kehilangan panas pada musim dingin juga akan mengurangi penerimaan panas pada musim panas. *Movable insulating shutters* untuk malam musim dingin yang mengandung panas dapat digunakan juga untuk mengurangi penerimaan panas pada siang hari di musim panas. Dalam rumah, *thermal mass* seperti

atap dan lantai batu, berfungsi sebagai spons panas, menyerap panas dan untuk pendinginan optimum, lingkungan di sekitar bangunan harus didesain dapat meminimalisir sinar matahari untuk menyerpa permukaan bangunan, serta mencegah adanya radiasi dan refleksi panas pada area tersebut. Perbedaan temperatur yang ideal adalah 110 derajat+ untuk eksterior dan 78 derajat untuk interior, memungkinkan tubuh manusia untuk beraktivitas dengan nyaman, serta merupakan cara yang paling nyaman terkait dengan manusia yang melewati transisi antara perbedaan suhu di luar dan di dalam. Perbedaan ini, antara temperatur permukaan interior dan eksterior, *exacerbate* jumlah dan kecepatan aliran panas lewat material. *Glazing* sebaiknya diminimalisir pada atap dan atap timur serta barat dimana panas matahari paling intensif.

Sinar matahari langsung yang intensif dari arah timur sama dengan sinar matahari barat. Alasan kenapa kita merasakannya berbeda adalah terkait dengan adanya dampak termal dari bumi yang meradiasi kembali panas yang didupatkannya di siang hari. Matahari siang lebih tinggi di langit dan memiliki dampak negatif pada *skylights* dan jendela atap serta meningkatkan penerimaan panas. pada iklim yang panas, *skylight* maupun jendela atap sebaiknya tidak digunakan kecuali telah terinsulasi atap mendapat pembayangan. Kaca vertikal yang menghadap selatan (jendela, *clerestory*, dan sebagainya) dengan teritisan atau naungan, menunjukkan permasalahan yang lebih sedikit tetapi tetap mendapat pengaruh dari temperatur udara luar. Teritisan horisontal atau awning di atas jendela selatan merupakan solusi yang efektif dan tidak mahal. Apabila teritisan atau naungan tersebut menjorok sepanjang setengah dari tinggi jendela, maka teritisan tersebut akan membayangi jendela sepenuhnya. Terali dengan tumbuh-tumbuhan rambat juga dapat digunakan. Strategi bagus lainnya adalah penggunaan tanaman yang gugur pada musim tertentu (*deciduous tree*) yang membayangi permukaan bagian selatan serta atap. Keseluruhan metode pembayangan tersebut bekerja sebaik *Trombe walls*, *water walls*, rumah kaca, serta strategi pengumpul panas pasif atap selatan lainnya.

Peringatan atau kelonggaran untuk atap serta atap timur dan barat memerlukan pendekatan yang berbeda. Karena posisi matahari saat terbit dan tenggelam adalah di bawah horizon, maka teritisan tidak efektif untuk mitigasi

sinar matahari. Vegetasi mungkin merupakan cara yang paling efektif dalam menjaga intensitas sinar matahari pagi dan sore yang menerpa atap serta jendela timur dan barat, tetapi cara ini tetap memerlukan perhatian khusus untuk mencegah blokade angin di malam hari yang merupakan salah satu strategi pendinginan lainnya. Jika vegetasi tidak dapat diterapkan, kombinasi dari pewarnaan dan kaca reflektif serta screen peneduh di eksterior bangunan merupakan strategi yang efektif. Sebagai tambahan, cat berwarna terang dan material atap serta atap efektif dalam merefleksikan sebagian besar sinar matahari.

3.3.5.3 Model Pendinginan Konvektif

Metode pengontrolan penerimaan panas yang dibahas di atas dibuat untuk menjaga temperatur ruang tetap nyaman dalam bangunan. Pada negara-negara di tenggara, pendinginan adalah sistem yang paling penting. Langkah selanjutnya pada pendinginan alami adalah metode pendinginan konvektif – menggunakan angin yang ada dan alami serta metode konveksi *gravity-induced* untuk memungkinkan adanya pertukaran udara pada waktu yang tepat. Metode konvektif yang paling tua menyepakati bahwa udara malam hari yang dingin dapat mendorong udara panas. Saat angin dominan, ventilasi tinggi atau jendela yang terbuka pada area yang jauh dari sumber angin akan melepaskan udara panas dekat langit-langit untuk keluar dari bangunan. Udara malam yang dingin kemudian akan masuk ke dalam bangunan dari ventilasi yang terbuka dan menggantikan udara panas. Untuk mendapatkan nilai pendinginan paling baik, bukaan *leeward* sebaiknya adalah 50%-100% lebih banyak dibandingkan di sisi *winward*.

Jika pada tapak atau area hanya terdapat angin sepoi-sepoi, konvensi alami tetap dapat digunakan untuk pertukaran udara dan pendinginan dalam ruang selama terdapat perbedaan suhu yang signifikan antara interior dan eksterior. Karena udara panas naik, ventilasi di posisi tinggi memungkinkan udara panas untuk keluar bangunan ketika udara dingin masuk lewat ventilasi rendah dan menggantikannya. Udara yang paling dingin pada sebuah rumah umumnya adalah sisi utara, khususnya jika area ini terkena pembayangan dari pohon maupun semak serta memiliki *water feature*. Masuknya udara dingin

lewat ventilasi rendah paling baik adalah pada sisi utara. Semakin besar perbedaan suhu pada ventilasi bawah dan atas, aliran konveksi alami semakin cepat dan semakin banyak mitigasi panas yang terjadi.

Ada dua cara dasar untuk mempertinggi nilai pendinginan konvektif, yakni 1) meningkatkan volume udara yang keluar per menit atau 2) memasukkan udara dingin ke dalam. Jika Delta T adalah perbedaan temperatur antara udara dalam ruang dan udara luar yang akan masuk, nilai pendinginan keseluruhan dalam BTU per jam dapat dicari dengan persamaan sederhana:

$$\text{Nilai Pendinginan} = 1,08 \times V \times DT$$

Dimana V adalah volume udara yang keluar dalam ft³/menit. Tabel 15 menunjukkan nilai pendinginan pada perbedaan temperature dan nilai aliran udara terpilih. Sebagai contoh, kecepatan aliran udara adalah 1-2 kaki/detik. Lewat sebuah ventilasi berukuran 10 m² akan tercipta nilai aliran udara antara 500-1000 ft³/menit. Jika udara yang masuk lebih dingin 10° dibandingkan udara dalam ruang, maka nilai pendinginan keseluruhan akan menjadi 5-10 ribu BTU/jam.

Secara langsung, meningkatkan area ventilasi akan juga meningkatkan nilai aliran udara dengan konveksi alami. Ventilasi turbin pada puncak atap adalah salah satu cara mempertinggi aliran udara dan meningkatkan nilai pendinginan. Bahkan angin sepoi-sepoi yang lemah lembut akan mengalir ke atas menuju puncak atap dan menciptakan pengisapan ke atas yang kemudian mengeluarkan udara panas. pendekatan yang lebih baik adalah dengan menggunakan radiasi sinar matahari untuk menginduksi aliran yang lebih cepat. Salah satu pendekatan yang mungkin ditunjukkan pada Gambar 26, yakni menggunakan atap Trombe yang diventilasikan ke luar. Cahaya matahari yang menerpa atap beton akan memanaskan udara pada ruang antara kaca dan atap hingga temperatur di atas 150°F. Udara yang sangat panas ini kemudian naik dengan cepat dan keluar, memungkinkan udara dingin untuk masuk ke dalam rumah lewat ventilai bawah di atap utara. Sebagai tambahan, "solar chimneys" atau penghawaan apung yang dikonstruksikan khusus, terdiri atas pemanas udara pasif dengan *seasonal dampers* yang dapat diinkorporasikan dimana udara yang dipanaskan oleh sinar matahari dapat keluar dari dalam bangunan. Seringkali kecepatan udara yang terjadi adalah 1-2 ft/detik.

Strategi pendinginan konvektif lainnya adalah membuat udara luar berpindah lewat tabung yang dibenam dalam tanah dan kemudian masuk ke dalam rumah. Tabung tersebut terbuat dari material yang memudahkan terjadinya transfer termal dan dibenam di kedalaman beberapa kaki untuk menghindari temperatur permukaan yang lebih hangat di siang hari. Udara luar yang panas masuk ke dalam tabung, akan melepaskan panas ke tanah atau bumi yang dingin, dan kemudian udara yang menjadi dingin masuk ke dalam rumah (Gambar 26). Titik jenuh termal di sekelilingnya harus dicapai, misalnya dengan lansekap permukaan dan penyiraman, yang dengan demikian menghilangkan penerimaan energi termal dari tabung/transfer bumi. Walaupun kondensasi adalah problem yang jarang muncul pada iklim kering, tetapi tabung semacam ini sebaiknya memiliki sedikit kemiringan dan memiliki drainase yang cukup memadai untuk memutuskan bahwa air tidak akan memblokir aliran udara. Tempat masuknya udara ke dalam bangunan harus ditempatkan jauh dari lalu-lalang aktivitas manusia. Ketika dibangun dan diukur dengan tepat, tabung bawah tanah dapat menyuplai udara dingin selama waktu terpanas di siang hari.

3.3.5.4 Metode Pendinginan Radiatif

Sistem kolam atap disebutkan di awal sebagai sistem yang sangat efektif terkait dengan strategi pendinginan. Pada lingkaran pendinginan, panel insulasi tertutup di siang hari untuk menolak sinar matahari panas yang tidak diinginkan. Kolam dingin bertindak sebagai sponge termal, menyerap panas ruang untuk berkonduksi lewat langit-langit interior. Pada malam hari, panel digulung, menunjukkan kolam ke langit malam dan udara malam yang dingin serta angin sepoi-sepoi. Kolam kehilangan panas akibat radiasi ke langit malam serta akibat konvensi alami ke udara. Sistem kolam atap khususnya efektif pada area dengan kelembaban rendah serta malam hari yang cerah. Kondisi ini ada pada sebagian besar negara-negara selatan, dimana pendinginan adalah yang utama. Jika kondisi ini kurang ideal, penambahan pengurangan panas dengan evaporasi dapat diintegrasikan.

Untuk hasil pendinginan terbaik, kedalaman kolam dapat dibuat antara 6-12 inchi, tergantung lokasi dan kondisi lokal, serta sebisa mungkin memenuhi atap.

Rumah berukuran rata-rata di tenggara, dengan kontrol penerimaan panas yang baik, dapat menerima dengan mudah 200.000 hingga 400.000 BTU pada siang hari di bulan Juli yang panas. Kolam dengan kedalaman 6 inchi yang memenuhi hampir keseluruhan atap, akan meningkatkan temperatur hingga 4-8°F dari penerimaan panas, dan pada malam hari, nilai pendinginan adalah 25-30 BTU/jam/ft' (Gambar 27), dimana kelebihan panas ini akan dilepaskan ke luar pada siang hari.

Konsiderasi kecil pada sistem atap dan kolam, harus memiliki jalur yang tidak terhalang ke puncak. Pohon, dinding, dan bangunan lain yang berdekatan dapat berdampak pada nilai pendinginan dengan mereduksi radiasi ke langit malam. Pohon dan atap juga menyerap panas matahari pada siang hari dan meradiasikan energi ini ke kolam pada malam hari. Awan yang memenuhi langit juga dapat berpengaruh pada performa pendinginan pada sistem kolam atap. Untuk alasan ini, kolam atap akan kurang efektif di area coastal dimana sering berawan dan berkabut pada sore hari. Untungnya, area coastal semacam ini tidak memerlukan banyak pendinginan.

3.3.5.5 Metode Pendinginan Evaporatif

Ketika air berevaporasi, ia menyerap sejumlah besar panas dari lingkungannya (hampir 1000 BTU per pound air berevaporasi). Contoh yang paling familiar dari efek pendinginan adalah perspirasi evaporasi pada kulit manusia. Metode evaporatif dapat digunakan untuk menaikkan nilai pendinginan pada sistem pendinginan konvektif. Salah satu cara adalah dengan membawa udara luar ke dalam rumah lewat filter kelembaban. Pendingin evaporatif familiar, pendahuluan ke arah pengondisian udara, adalah sistem mekanikal yang menggunakan prinsip-prinsip dengan motor untuk memaksa pergerakan dan distribusi udara. Strategi pendinginan pasif dengan tabung bumi (*earth tubes*) serta tower pendingin menggunakan prinsip yang sama tetapi menggunakan sistem alami untuk kontrol dan distribusi air. Jika pipa masukan bawah tanah menggunakan material berpori, dan di atasnya dingin serta terairi dengan baik, evaporasi akan terjadi pada permukaan dalam pipa.

Menara pendingin memanfaatkan *cooling pad* basah serta gaya gravitasi. Udara yang berat dan dingin "jatuh" akibat gaya gravitasi ke dalam bangunan dan daya geraknya memenuhi area aktivitas. Aksi dari menara pendingin ini, sebagaimana pada tabung pendingin, dapat meningkat dan memperpanjang distribusi dengan penempatan *thermal chimney "drivers"* yang dapat mendorong udara dingin melewati bangunan dengan peningkatan kelembaban serta kuantitas udara. Di kasus lain, udara dingin saat ini memiliki kelembaban relatif lebih tinggi, tetapi hal ini umumnya bukan sebuah permasalahan berat dan bahkan menjadi keuntungan untuk iklim yang keras. Pada beberapa area, ada waktu-waktu tertentu dimana kelembaban menjadi tinggi. Ketika panas terus bermitigasi dengan teknik pendinginan pasif, panas yang terpendam yang ada pada udara lembab menjadi lebih sulit untuk menghilang, dan mengakibatkan pendinginan evaporatif menjadi kurang efektif. Integrasi sistem penghilangan lembab dengan mudah memperbaiki kondisi problematik ini. Strategi pendinginan evaporatif cocok pada area di tenggara dimana kebutuhan akan pendinginan sangat tinggi. Pada beberapa iklim dimana temperatur udara malam hari seringkali di atas 90°F, semprotan dapat digunakan untuk memaksimalkan pendinginan alami, pada atap standar dan sistem pendinginan atap seperti strategi kolam atap.

Sebuah kolam terbuka yang terletak di atas ruang aktivitas di sisi utara rumah terbayangi dari sinar matahari tetapi terekspos ke langit utara di siang dan malam hari. Evaporasi dari permukaan kolam, dibantu dengan radiasi dan konveksi alami, menjaga air dalam kolam 30°F di bawah temperatur udara luas, tanpa penggunaan panel insulasi yang *moveable*. Konveksi alami membawa air dingin ke dalam rumah dan memungkinkan panas masuk ke kolam sebagaimana ditunjukkan di gambar.

Dengan semua metode pendinginan evaporatif, maksimalisasi aliran udara melewati air yang terekspos menjadi penting. Udara segar harus tersedia secara kontinyu untuk menggantikan udara lembab di dekat air. Jika tidak, udara akan dengan mudah menjadi jenuh dengan titik-titik air, sehingga evaporasi dan nilai pendinginan akan turun drastis. Bibir, tepi, dan struktur lainnya atau bangunan yang dapat memblokir atau membelokkan angin dari

permukaan air harus dihindari. Terkadang, kipas kecil yang mengganggu udara di alas kolam dapat membantu nilai evaporasi dengan baik,

Bahkan dengan sistem pendinginan evaporatif aktif langsung, ketentuan massa termal interior yang dikombinasikan dengan pendinginan evaporatif langsung adalah kombinasi yang berjalan efektif. Selama siang hari, strukturnya dapat memanfaatkan *clooth* yang tersimpan pada atap dan lantai, dan memelihara level kenyamanan yang tinggi selama mereduksi daya yang diperlukan pada sistem pendinginan evaporatif langsung. Pada banyak area di tenggara yang panas, kelembaban tinggi memiliki periode yang tinggi yang mengakibatkan pendinginan evaporatif mekanis menjadi tidak memuaskan bahkan ketika teknik optimalisasi digunakan. Solusi untuk ini adalah dengan sistem pendinginan evaporatif *two-stage*, yang menunjukkan keunggulannya sebagai alternatif efektif untuk pendinginan evaporatif langsung atau *refrigerated air-conditioning*. Walaupun bukan merupakan sistem pasif, pendinginan evaporatif *two-stage* adalah elemen penting untuk dipertimbangkan sebagai bagian dari strategi pendinginan pasif. Pendinginan dapat diselesaikan dengan *pre-cooling ambient air* tanpa perlu dilembapkan sebelum pendinginan selanjutnya dengan evaporasi. Udara dingin yang masuk ke struktur kemudian menghangat, terlebih pada area dengan penerimaan panas tinggi seperti jendela atau langit-langit. Sistem *pre-cooling* mungkin dapat diselesaikan dengan mengombinasikan menara pendingin unit pengubah panas, atau dengan mendinginkan *rock bed*. Stage kedua, pendinginan evaporatif, dapat dipenuhi dengan peralatan pendinginan evaporatif komersial standar, atau dengan elemen pendinginan pasif seperti *earth tubes* atau menara pendingin. Pendinginan mekanikal *rock bed* telah digunakan secara ekstensif di Australia dengan tingkat efektivitas tinggi.

Sistem evaporasi dua stage juga dapat dikombinasikan dengan sistem pemanasan sinar matahari hybrid dengan menggunakan sumber penyimpanan yang sama. Sistem pengerjaan telah dikembangkan dan didemonstrasikan. Sistem tipe ini cocok untuk konstruksi baru karena persyaratan untuk *rock bed* paling efektif adalah ditanam dalam struktur.

Sistem tipikal terdiri dari dua pendingin evaporatif serta *rock bed* besar yang ditunjukkan pada gambar 31. Pada malam hari, salah satu pendingin evaporatif

mendinginkan *rock bed* sementara pendingin lainnya mendinginkan rumah menggunakan pendingin evaporatif *one-stage*. Selama siang hari, udara panas di luar didinginkan oleh *rock bed* yang sudah dingin pada malam hari sebelum masuk ke pendingin evaporatif rumah utama. Karena tidak ada kelembaban yang masuk ke *rock bed*, maka tidak ada pula kelembaban yang masuk ke dalam rumah. Fitur yang menarik dari sistem ini adalah kombinasi sistem pemanasan dan pendinginan.

Penyembuhan dan pembaharuan pilihan pendinginan pasif adalah metode lain untuk memproduksi kenyamanan yang lebih baik dengan pendinginan evaporatif. Teknik ini digunakan untuk mendinginkan udara secara relatif dari struktur untuk meningkatkan performa peralatan pendinginan pasif. Pendinginan evaporatif air mereduksi temperatur udara pada penukar panas tanpa adanya humidifikasi yang masuk ke struktur. Udara yang kering dan dingin menghangatkan beberapa derajat ketika melewati struktur dan keluar lewat peralatan pendinginan evaporatif atau struktur pendinginan. Karena udara yang keluar dingin dan kering, temperatur *bulb* yang basah menjadi lebih rendah dan air yang diproduksi, peralatan pendinginan evaporatif dapat berkombinasi menjadi unit tunggal.

Karena volume udara yang besar berpindah pada sistem evaporatif efektif, pipa yang digunakan haruslah besar dan berukuran sesuai. Secara tipikal, pendingin evaporatif setidaknya tiga kali area *cross section* atas pipa pendingin. Pipa sebaiknya dibuat berjarak sependek mungkin dan memiliki belokan sesedikit mungkin. Pendinginan evaporatif merupakan alternatif yang efektif untuk pengondisian udara mulai dari negara bergurun hingga tenggara. Pemilihan teknik pendinginan evaporatif yang sesuai harus dilakukan dengan analisa kondisi iklim secermat mungkin. Sistem pendinginan sebaiknya terintegrasi ke dalam bangunan sehingga efektif dan ekonomis.

3.4 Prinsip Dasar Atap pintar Bangunan

Penggunaan material, bentuk, fleksibilitas dan hubungannya pada selubung mempengaruhi kemampuan atap pintar bangunan untuk beradaptasi pada lingkungannya yang sesuai dengan kebutuhan pengguna. Dengan sumber yang terbatas, atap bangunan pintar harus mencari jalan untuk

membuat kinerja yang lebih efisien dan efektif. Pendekatan yang sama digunakan untuk tafa setiap aplikasi, pada atap bangunan pintar, bekerja dengan proses *perception*, *reasoning*, dan *action*, baik sebagai elemen multifungsi maupun sistem multi-layer, dimana semua elemen didesain untuk kerjasama yang dekat satu sama lain (Gambar 2.2). Proses ini diorganisir sebagai sistem konvensional, dimana *perception*, *reasoning*, dan *action* ditampilkan berurutan dan dalam material atau komponen yang berbeda. Kemudian diorganisir sebagai sistem yang terintegrasi/ multifungsi, dengan proses *perception*, *reasoning*, dan *action* terintegrasi dalam satu material atau komponen, atau sebagai sistem multi-layer dimana seluruh elemen didesain untuk kerjasama yang dekat satu sama lain.

3.4.1 Kecerdasan Dasar dalam Desain

Material yang digunakan, bentuk, dan komposisi komponen selubung menentukan seberapa besar selubung bangunan pintar dapat bereaksi terhadap perubahan lingkungannya. Setelah menguraikan strategi pendekatan yang tepat sebagai respon terhadap perubahan lingkungan, selubung bangunan pintar membutuhkan komponen untuk mewujudkan respon tersebut ke dunia nyata. Komponen-komponen tersebut dikelompokkan dalam tiga kelompok utama, menurut caranya membuat selubung bangunan dapat beradaptasi dengan lingkungan:

a. Material

Terdapat banyak sekali material *phase-change* yang dapat digunakan sebagai selubung bangunan; sebagai contohnya adalah *switchable glazing*, yang dapat merubah piranti optiknya menurut parameter lingkungan tertentu seperti kecerahan lingkungan, radiasi matahari, suhu udara udara dalam ruang, dan muatan listrik. Beberapa respon material *phase-change*, menurut definisi selubung bangunan pintar dalam bab 2, dianggap sebagai tindakan refleksi semata, “a simple response which follows on directly and inevitably from the stimulus” [Beukers & van Hinte 1998:45], dimana baik selubung maupun penghuni tidak memiliki kesempatan untuk mengendalikan. Oleh

karena itu, tipe *switchable glazing* seperti *photochromic* dan *thermotropic glazing*, sebagaimana material lebih statis lainnya seperti panel prisma dan laser-cut, tidak dibahas pada bagian ini. Walaupun material di atas mungkin berkontribusi pada kualitas pencahayaan alami yang baik dalam ruang, material tersebut tidak memberikan kesempatan pada selubung dan pengguna untuk mengadaptasikan dirinya pada perubahan lingkungan. Tipe *switchable glazing* yang dibahas pada bagian ini adalah (*photo*)*electrochromic* dan *gasochromic glazing*, yang mampu menganeka ragamkan respon menurut aplikasi muatan listrik atau gas, yang dapat diaplikasikan setiap saat jika diinginkan, dan dapat bertahan dalam jangka waktu yang lama. Dua aplikasi fisik yang akan dibicarakan dapat diklasifikasikan sebagai pencahayaan alami siang hari artifisial, yaitu panel kaca pada atap atau langit-langit, yang bagian belakangnya disinari dengan sumber pencahayaan buatan, yang menstimulasi pencahayaan alami siang hari dan variasinya dalam intensitas, arah, dan warna.

b. Bentuk

Aplikasi fisik dapat pula mempengaruhi kualitas pencahayaan dalam ruangan melalui adaptasi bentuk fisiknya. Tipe adaptasi ini meliputi elemen *louvers*, *shutters* dan *blinds*, yang dirotasikan dan/atau direlokasi pada selubung bangunan, pada sumbu horizontal atau vertikal elemen (Gambar 5-38). Kemudahan adaptasi ini menyebabkannya seringkali memainkan peranan penting pada ekspresi visual selubung bangunan terhadap dunia luar. Elemen ini dapat terdiri dari berbagai material dan warna, juga meliputi tipe dan derajat fleksibilitas yang berbeda.

c. Komposisi

Komposisi elemen pada selubung juga dapat digunakan untuk meningkatkan adaptasi selubung. Integrasi kisi untuk penghawaan dan pencahayaan alami di dalam selubung bangunan memberikan tipe fleksibilitas baru oleh adanya pemasukan dan distribusi pencahayaan alami siang hari ke ruang dalam serta penyesuaian strategi penghawaan alami. Sebelumnya [1966], Hopkinson *et al.* membahas pengembangan P.S.A.L.I. (Permanent Supplementary Artificial Lighting in Interiors), dimana, pada satu sisi, pengoperasian sistem pencahayaan buatan dikendalikan menurut ketersediaan

cahaya, dan pada sisi lain, jendela didesain untuk berfungsi optimum melalui kerja sama dengan lokasi dan output sistem pencahayaan buatan.

3.4.2 Kecerdasan Meaengah dalam Proses Reasoning

Bagian ini membahas aplikasi fisik yang dapat diimplementasikan ke dalam selubung bangunan pintar untuk memfasilitasi proses *reasoning* meliputi:

- memproses informasi dari berbagai sumber menjadi solusi optimal
- mengantisipasi kondisi lingkungan
- mempelajari preferensi penghuni
- mengantisipasi hasil *action* selubung

Kemampuan reasoning yang dideskripsikan di atas butuh didukung oleh tipe teknologi motorik diinspirasi oleh proses kecerdasan manusia. Hal ini dapat membantu selubung bangunan pintar untuk mendapatkan waktu adaptasi dan operasi yang dibutuhkan dalam interaksinya dengan lingkungan. Selubung bangunan pintar idealnya mampu mendapatkan informasi mengenai kebutuhan, preferensi, dan perilaku penghuni bangunan. Terdapat tiga tantangan komunikasi antara sistem dan pengguna, sebagaimana komunikasi pada umumnya, diidentifikasi oleh Shannon & Weaver [1963:4] dalam teori matematika untuk komunikasi:

- **Level teknis.** Pada akurasi dan kecepatan berapa simbol komunikasi dapat ditransmisikan.
- **Level semantik.** Berkait dengan seberapa jauh pesan yang disampaikan masuk akal seperti seberapa tepat simbol dapat menyampaikan arti pesan.
- **Level keefektifan.** Berkait dengan seberapa jauh pesan dapat mempengaruhi perilaku penerima seperti cara yang diinginkan.

3.4.3 Kecerdasan Lanjut dalam Artifisial Sensorik

Material dan komponen diaplikasikan pada selubung bangunan pintar untuk membantu mengumpulkan informasi dan umpan balik berkaitan dengan:

- Kondisi lingkungan dalam dan luar ruangan
- Kebutuhan, preferensi, dan perilaku penghuni bangunan
- Hasil (hasil utama dan efek samping) dari tindakan selubung

Elemen yang diawasi adalah kondisi lingkungan, dengan variasinya dalam waktu dan ruang, serta kebutuhan dan preferensi penghuni. Yang penting untuk diperhatikan tidak hanya tipe variabel, tetapi juga lokasi dilaksanakannya pengawasan, dan frekuensi yang terjadi: terus-menerus, periodik, atau jarang, saat kebutuhan perubahan terdeteksi. Terdapat dua area utama aplikasi:

a. Sensor kondisi lingkungan

Aplikasi fisik yang memberikan informasi pada selubung bangunan pintar, tidak perlu terkoneksi secara fisik dengan permukaan selubung. Persepsi tentang kondisi lingkungan dapat terjadi di lingkungan ruang dalam, pada permukaan selubung, atau pada lingkungan luar ruangan. Pada bagian ini, akan dibahas tiga tipe aplikasi sensor yaitu:

- Photosensor

Secara umum, photosensor dapat dideskripsikan sebagai komponen yang mencatat radiasi tampak; terdiri dari *silicon photodiode* dan *diffuser* yang mengintegrasikan luminans permukaan dalam sudut bukaan *light-sensitive cell* [Ehrlich *et al.* 2002]. Photosensors dapat digunakan untuk memonitor berkas cahaya dan pencahayaan baur pada bidang kerja, melintasi ruang, dan pada permukaan selubung. Pada konteks ini, photosensor digunakan bekerja sama dengan kontrol pencahayaan alami siang hari dan pencahayaan buatan yang terhubung, dimana pencahayaan buatan dikecilkan menurut pencahayaan alami siang hari yang tersedia untuk pencahayaan umum dan setempat. Pengukuran pencahayaan photosensor dapat digunakan lebih lanjut untuk mengindikasikan resiko kesilauan, misalnya dengan menggunakan rasio pencahayaan antara celah pencahayaan alami siang hari dengan permukaan di sekeliling permukaan bidang kerja. Penilaian resiko kesilauan oleh photosensor akan membutuhkan sejumlah sensor untuk diletakkan pada posisi tertentu dalam bidang pandang penghuni. Keberhasilan tipe komponen ini dalam memonitor level iluminasi bergantung pada beberapa faktor, antara lain sensitivitas spektrum dan spasial dari photosensor, lokasi dan sudut bukaannya, dan kondisi langit selama kalibrasi photosensor terjadi

- **Sensor okupansi**

Informasi mengenai okupansi meliputi beberapa parameter. Tipe data pertama yaitu terkait dengan kehadiran/ absennya penghuni, tetapi parameter seperti jumlah penghuni dalam ruangan, posisi dan tingkat aktivitasnya juga dapat dideteksi. Dua tipe utama komponen dibahas pada bagian ini: sensor gerakan dan sensor inframerah. Kelompok komponen ketiga yang digunakan untuk deteksi okupansi meliputi aplikasi seperti kartu akses, pengawasan pintu masuk, pintu keluar, dan identitas masing-masing penghuni, serta penggunaan peralatan dan jaringan komputer.

- **Sensor gerakan**

Sensor gerakan digunakan untuk mencatat kehadiran/ absennya penghuni, untuk menentukan keseimbangan yang tepat antara kenyamanan penghuni dan strategi penggunaan energi. Tipe sensor ini akan mengasumsikan ketidakhadiran penghuni dengan adanya periode ketiadaan aktivitas, dan membuang strategi kenyamanan walaupun penghuni masih ada. Untuk menghindarinya, waktu jeda tertentu perlu diperhitungkan; waktu jeda ini, harus diseimbangkan untuk melawan kehilangan simpanan energi. Satu cara untuk mengatasi dilema ini, adalah penggunaan sensor gerakan yang bisa mengadaptasikan waktu jedanya pada setiap individu penghuni. Leephakpreeda [2005], misalnya, menjelaskan pengembangan sensor okupansi adaptif yang mempelajari rutinitas penghuni dan menyesuaikan waktu jedanya menurut rutinitas tersebut. Untuk tujuan ini, perilaku penghuni dimonitor selama beberapa hari, yang memberikan kesempatan pada sistem untuk mempelajari tingkat aktivitas penghuni; informasi ini kemudian digunakan untuk menentukan dan meng-update waktu jeda yang sesuai. Garg & Bansal [2000] juga membahas pengembangan sensor okupansi yang mampu mempelajari pola penghuni dan mengubah waktu responsnya menurut beberapa faktor seperti tipe pekerjaan yang dilakukan penghuni, tingkat aktivitas, dan waktu harian atau tahunan.

b. *Soft computing technologies* (otomatisasi)

Teknologi tersebut dapat digunakan baik sebagai sistem yang berdiri sendiri maupun, dikarenakan sifatnya yang saling melengkapi, digabungkan dengan yang lain menjadi *sistem hybrid* yang mengurangi kelemahan masing-masing dalam sistem dan meningkatkan kekuatannya. Sistem hybrid ini terdiri dari modul-modul yang dapat dengan bebas digabungkan, dimana setiap elemen yang ada dilengkapi dengan teknologi yang paling sesuai. Teknik *soft computing* yang dijelaskan di atas sering dikombinasikan satu sama lain untuk mengeksplorasi secara penuh kemampuan masing-masing sambil mengurangi kelemahannya. Dalam paragraf berikut, akan dijelaskan bagaimana performa satu teknik tertentu dapat ditingkatkan melalui penggabungannya dengan yang lain.

3.4.4. Ringkasan Atap pintar Bangunan

Semua atap bangunan memiliki fungsi sebagai filler lingkungan. Dalam pembahasan penelitian ini, perilaku pintar pada sebuah atap bangunan didefinisikan sebagai kemampuan untuk beradaptasi terhadap lingkungan yang terdiri atas iklim lokal dan tapak, fungsional bangunan, dan individu penghuni bangunan. Adaptasi ini terjadi melalui proses berpersepsi, beralasan, dan bertindak, dan memungkinkan selubung untuk mengatasi situasi-situasi baru serta mengatasi permasalahan yang dapat terjadi dalam proses interaksinya dengan lingkungan. Untuk itu, kinerja atap sebagai suatu filter lingkungan akan berkembang dengan kemampuannya untuk memilih respon yang paling sesuai pada setiap situasi, untuk menyusun strategi jangka panjang, dalam mengantisipasi perkembangan kondisi lingkungan, serta mengevaluasi performanya dan kemampuannya sendiri sebagai pembelajaran. Karakteristik ini bertujuan untuk membuat kinerja atap lebih sesuai dalam suatu lingkungan khusus, untuk meningkatkan fungsinya, serta untuk membiasakan tiap pengguna dalam mengoperasikannya. Beberapa aplikasi fisik atap pintar bangunan adalah :

a. Kemampuan diri

Kepintaran buatan merupakan integrasi komponen-komponen untuk dapat berpersepsi dan bertindak, sebuah tren yang berkembang sebagai peningkatan kapasitas pengolahan informasi yang menyediakan lebih

beragam solusi dengan waktu untuk merespon yang lebih singkat. Sebagai tambahan, sepertinya hal tersebut akan menjadi tren yang mengarah pada desentralisasi sistem kontrol dalam bangunan, menyediakan kontrol yang ditempatkan pada selubung bangunan dibandingkan pada pusat bangunan. Apabila dikombinasikan dengan sistem sel surya maka pemilihan penempatan kontrol mengarah kepada sebuah derajat peningkatan kemampuan diri selubung bangunan.

b. Keragaman dalam desain

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya,, tidaklah mungkin untuk mengurangi kepintaran selubung bangunan dari sistem pengolahan informasinya. Desain komponen dan komposisi selubung bekerja sama dengan selubung adalah sangat penting. Beberapa contoh menunjukkan banyak cara untuk memperhatikan fungsi pendinginan alami yang spesifik, yang dapat dikategorikan secara kasar ke dalam suatu batasan kelompok-kelompok seperti jalousi (venetian blinds), kisi-kisi (eksternal louvers), dan kaca hidup (switchable glazing). Untuk setiap kelompok tersebut, bagaimanapun juga, aplikasi lain sebagai desain karakteristik dan bentuk material komponen, di sekitar lokasi selubung bangunan, untuk sebuah tingkat variabel yang telah diatur pada tapak dan iklim lokal. Sistem pengolahan informasi perlu diatur kesesuaiannya, tidak hanya pada penggunaan komponen utama, namun juga pada geometri dan fungsional lingkungan ruang dalam.

c. Desain mengacu pada pengguna

Topik ini sebagian telah dibahas sebelumnya, dengan memperhatikan sistem hubungan pengguna dan cara dalam berkomunikasi antara atap dengan penghuni yang telah diorganisir. Sebagai tambahan, keterbatasan pengguna dapat memberikan sebuah tingkat pengendalian yang fleksibel sesuai dengan harapan penghuni. Hal ini juga memberi kemungkinan untuk mengatur situasi dan kondisi baik secara umum maupun detail sesuai dengan batasan-batasannya. Komunikasi antara atap dengan penghuni, bagaimanapun juga harus diperluas terhadap desain dan cara kerja komponen selubung dan visualisasinya, agar penghuni benar-benar memahami mengapa atap merespon pada perilaku yang ia lakukan.

d. Desain yang terintegrasi

Apakah arsitek memutuskan terlebih dahulu ekspresi visual atap untuk insinyur, kemudian baru mendesain cara kerja dan otomasisinya? Atau apakah sebuah atap pintar bangunan terdiri dari komponen-komponen yang didesain untuk diintegrasikan dan mampu bekerja sama? Beberapa contoh yang telah ada merupakan jawaban dari sebuah kerja sama antara tim desain bangunan dan manufaktur sistem bangunan. Mereka mendesain untuk digunakan dalam kerja sama (dalam solusi yang berlapis-lapis) atau dalam integrasi (dalam komponen multifungsi) dengan komponen-komponen selubung lainnya untuk menyediakan kenyamanan bangunan dengan mempertimbangkan iklim spesifik, tapak, dan bangunan yang ada.

3.5 Kajian Simulasi Komputer dalam Arsitektur

Pemahaman secara menyeluruh terhadap simulasi dalam arsitektur didasarkan pada pengertian dan wawasan tentang teknik kajian termal dan pencahayaan. Untuk memahami metode yang digunakan diperlukan wawasan sains bangunan yang dirasa masih sedikit. Sejak dimulainya pendekatan matematika kemudian model eksperimen fisik dan pada perkembangan terakhir adalah teknologi komputer yang semakin maju dengan mengkombinasikan ilmu matematika dalam gambar nyata. Sehingga terdapat tiga metode yang dapat digunakan untuk belajar simulasi dalam arsitektur, yaitu matematika, komputer dan eksperimen fisik.

a. Matematika

Merupakan metode tertua yang dikembangkan dalam kajian aliran udara. Dipelopori oleh Newton pada tahun 1500-an. Terdapat 5 komponen penting yang dapat dipakai arsitek untuk mengetahui tingkatan bukaan bangunan. Pemasukan angin dalam ruang dipengaruhi oleh kecepatan angin, sudut datang, variasi intensitas dan pola serta gangguan lokal (Boutet, 1987). Banyaknya jumlah angin yang masuk dalam masukan bukaan didasarkan pada rumus berikut ini :

$$Q = C_f C_v A V$$

Di mana : Q = aliran angin dalam m³/ detik

A = luas area bukaan pemasukan angin m²

V = kecepatan angin
Cv = efektifitas bukaan
Cf = faktor konversi 88.0

Kondisi yang terjadi apabila bukaan outlet lebih besar dibanding dengan inlet mengakibatkan aliran udara yang terjadi lebih besar. Pada kondisi bukaan inlet lebih besar daripada outlet mengakibatkan aliran yang terjadi semakin kecil.

Bouyancy/ aliran angin dalam ruang juga dapat terjadi karena perbedaan suhu dalam ruang. Kekuatan *bouyancy* ini tergantung dari perbedaan suhu yang terjadi. Untuk mengetahui besarnya aliran angin akibat adanya *bouyancy* melalui rumus

$$Q = C_f A (h(T_1 - T_0))^{1/2}$$

Di mana : Q = aliran angin dalam m³/detik

A = luas area bukaan inlet angin m²

h = setengah dari perbedaan tinggi inlet dan outlet

T₁ = suhu pada ketinggian h₁

T₀ = suhu pada ketinggian h₀

C_f = faktor konversi 3.13

Secara umum adanya efek *bouyancy* mengakibatkan pergerakan yang lebih besar dibanding aliran udara yang hanya disebabkan tekanan udara saja.

b. Ekperimen Fisik

Metode eksperimen fisik di bidang penghawaan biasanya menggunakan model terowongan angin mulai digunakan sejak tahun 1950-an oleh Texas Engineering Experiment Station. Perkembangan lebih lanjut, model ini diterapkan di beberapa bidang yang berkaitan dengan aliran udara. Analisis aliran udara pada bidang arsitektur, terutama setelah semakin berkembangnya sistem pengkondisian udara dalam bangunan. Secara sederhana prinsip terowongan angin adalah menghasilkan aliran udara yang terkontrol untuk kajian pola aliran udara terhadap model. Akurasi analisis terowongan angin sangat tergantung pada kalibrasi model, di mana semakin besar skala model maka akurasinya semakin tinggi tetapi dibutuhkan

peralatan *wind tunnel* yang semakin besar. Untuk memudahkan melihat pola aliran udara biasanya digunakan zat berwarna. Observasi visual dilakukan dengan pemotretan gambar pola aliran udara pada kondisi tertentu sehingga memudahkan dalam analisis hasil.

c. Komputer

Perkembangan teknologi komputer memungkinkan penggabungan antar beberapa disiplin ilmu sebagai alat penggambaran visual. Dalam pengamatan aliran udara dan panas dikenal perkembangan perangkat lunak baru yaitu CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Kemampuan, keakuratan dan nilai CFD semakin berkembang selama beberapa tahun terakhir yang mengakibatkan semakin meningkatnya kemampuan dan biaya komputer yang semakin murah baik dalam metodologi permodelan maupun perhitungannya. Beberapa aspek umum CFD dan aliran udara dalam bangunan dibahas dengan beberapa contoh kinerja aplikasi aliran udara bangunan. Hal ini menunjukkan bahwa CFD cukup mampu untuk memprediksikan aliran udara yang kompleks dan permasalahan transfer panas dalam bangunan terutama dalam pendekatan teknik. CFD merupakan hasil integrasi beberapa bidang keilmuan antara lain : teknik, mekanika fluida, matematik, ilmu komputer, komputer grafis, dan komputer geometri (Symons, 1996).

d. Komparasi metode dan pemilihan metode

Terdapat tiga kriteria pembandingan dalam pemilihan metode kajian aliran udara yang meliputi: keakuratan, nilai ekonomi, fleksibilitas, besaran, dan kepekaan terhadap gangguan. Keakuratan didasarkan pada perhitungan matematika yang kompleks, tetapi dari sisi fleksibilitas akan membutuhkan waktu lama untuk menghitung variasi aliran udara yang ingin dicari. Sedangkan dari sisi ekonomi mungkin tidak begitu membutuhkan dana yang besar serta besaran peralatan juga kecil. Sedangkan untuk *wind tunnel* dari sisi keakuratan lebih didasarkan pada hasil yang bisa dilihat secara langsung tetapi untuk pemodelan skala 1:1 membutuhkan besaran *wind tunnel* yang memadai. Sehingga dengan skala model yang semakin kecil akan menurunkan tingkat keakuratan apabila diterapkan dalam kondisi nyata. Aspek kepekaan terhadap gangguan masih terlalu besar. Untuk nilai

ekonomi dibutuhkan dana yang besar untuk membangun terowongan angin. Dari sisi fleksibilitas, *wind tunnel* unggul dari perubahan model secara cepat sehingga di dapatkan hasil yang relatif cepat. Tetapi dari segi fleksibilitas alat *wind tunnel* sendiri akan sulit untuk dipindah-pindahkan karena membutuhkan ruang yang relatif besar.

Penggunaan komputer merupakan alternatif terbaik dalam studi model ini. Terjadinya pergeseran bentuk laboratorium fisika bangunan, dari yang mengandalkan alat manual kepada peralatan dan perhitungan komputer. Perhitungan komputer selain mengakomodasi ilmu matematika juga merangkum ilmu yang lain yang lebih spesifik sesuai dengan penelitian yang dilakukan, misalnya untuk penelitian aliran udara digunakan perangkat lunak yang berbasis pada ilmu fisika fluida. Tampilan grafis dan kemampuan pemodelan yang semakin maju memungkinkan tampilan nyata objek (*virtual reality*) yang diamati. Tingkat keakuratan model sebanding dengan model nyata, dengan skala yang lebih besar dan tidak tergantung pada kemampuan peralatan *wind tunnel* (peralatan *wind tunnel* dapat disimulasikan pada komputer) Fleksibilitas perubah model juga dimungkinkan dengan variasi lebih banyak dengan biaya yang relatif lebih murah.

3.5.1 Prinsip Dasar Simulasi

- Tinjauan dari metode yang telah dijabarkan sebelumnya menginformasikan bahwa penyederhanaan desain dan penghitungan tidak dapat diandalkan dan tidak mewakili kompleksitas yang sesungguhnya. Sementara metodologi dalam eksperimen lapangan membutuhkan prosedur yang kompleks dan komprehensif, keterbatasan alat yang dapat digunakan, keterbatasan biaya dan waktu. Maka dari itu, simulasi komputer adalah metode alternatif pada studi ini.

Selama lebih dari 50 tahun terakhir, ratusan program energi telah dikembangkan, ditingkatkan, dan diaplikasikan pada energi bangunan. Pendekatan perangkat desain baru memungkinkan seluruh model disimulasikan dalam kondisi virtual. Perangkat simulasi komputer yang dikembangkan oleh ilmuwan dan peneliti menawarkan hasil yang akurat dan model-model pada simulasi telah dapat mewakili kompleksitas seperti realita

sesungguhnya. Bagaimanapun simulasi komputer ini membutuhkan masa pembelajaran yang panjang, untuk mempelajari bagaimana cara menggunakan perangkat tersebut, mempersiapkan input, menjalankan program, dan menginterpretasikan hasil simulasi yang dibutuhkan untuk penelitian.

Saat ini teknologi dan informasi memungkinkan para ilmuwan dan peneliti membawa perangkat simulasi komputer untuk mengimplementasikan desain dan konstruksi bangunan yang sebenarnya. Hasil penelitian dari Garde F. et al (2001) mendemonstrasikan metode dari metodologi tersebut. Pertama, mengidentifikasi spesifikasi yang dibutuhkan untuk bahan pertimbangan dalam desain bangunan dan melengkapi simulasi untuk masing-masing spesifikasi. Kemudian, mengimplementasikan solusi pada proyek yang sesungguhnya dan akhirnya memperoleh validasi eksperimen.

Sonia (2005) menjelaskan bahwa program simulasi yang paling mudah digunakan adalah yang dikembangkan oleh peneliti secara orisinal untuk mendapatkan perangkat analisa yang cukup teruji. Hal tersebut tentunya membutuhkan detail informasi yang mendalam mengenai bangunan beserta konteksnya. Input perangkat ini berupa data teknik mekanik dari hasil akhir proses desain dan dengan output berupa data numerik dan teks, sehingga arsitek akan kesulitan untuk menggabungkan hasil analisa selama proses mendesain. Perancang bangunan membutuhkan perangkat analisa energi yang praktis untuk digunakan dan memproduksi hasil yang mudah untuk dipahami. Gratia E (2004) yakin bahwa perangkat penghubung pengguna untuk arsitek harus mudah digunakan dan menggunakan bahasa visual yang dimengerti arsitek terutama ilustrasi.

Survey komparatif dari 20 program unggulan simulasi energi bangunan telah dikembangkan oleh Crawley, et al, (2005) dan menjadi referensi dari banyak peneliti. Terdapatnya analisa komparatif menyediakan informasi dengan segera bagi para peneliti untuk mendapatkan gambaran secara cepat dan penilaian secara tepat berdasarkan informasi yang disediakan oleh pengembang program dalam kategori yang bermacam-macam seperti fitur permodelan general, selubung bangunan dan pencahayaan, data iklim yang sesuai, validasi dan hubungan dengan program lainnya.

Dari survey komparatif, program simulasi lanjutan mengisi kriteria yang dibutuhkan dari penelitian ini: ECOTECH, Energy Plus, e-QUEST, IES <Virtual Environment> (IES <VE>). ECOTECH adalah program simulasi ideal untuk studi ini yang dapat memenuhi seluruh kebutuhan eksperimen dan dapat diintegrasikan pada proses desain bangunan secara mudah. Perangkat simulasi komputer ini sesuai untuk model bangunan yang kompleks dan bernilai besar. Meskipun metodologi dalam eksperimen lapangan ini membutuhkan prosedur yang kompleks dan komprehensif namun mengalami keterbatasan dalam pengadaan peralatan, dana, dan waktu, maka simulasi komputer adalah sebuah metode alternatif yang dapat digunakan dalam pembelajaran ini.

Selama 50 tahun terakhir ini, ratusan literatur mengenai program energi telah dikembangkan, meningkat dan diaplikasikan dalam komunitas energi bangunan. Peralatan baru untuk mendesain memungkinkan semua model dapat disimulasikan melalui media virtual. Perangkat simulasi komputer dikembangkan oleh para ilmuwan dan peneliti yang memberikan hasil akurat serta dengan model simulasi yang cukup representative dalam kompleksitas dunia nyata (Sonia, 2005). Bagaimanapun mereka membutuhkan pelatihan yang intensif untuk mempelajari bagaimana cara menggunakan, mempersiapkan input, mengoperasikan, dan menginterpretasikan hasilnya sesuai dengan kebutuhan penelitian. Teknologi dan informasi saat ini memungkinkan para ilmuwan dan peneliti untuk menggunakan perangkat simulasi komputer dalam mengimplementasikan desain bangunan dan konstruksinya secara aktual (Kristensen, 2003; Garde F. et al, 2001; Shaviv E., 2000). Penelitian Garde F. et al. (2001) mendemonstrasikan metode-metode di atas. Pertama, dilakukan pengidentifikasi kebutuhan spesifik untuk disesuaikan dengan desain bangunan dan disimulasikan setiap spesifikasinya. Kemudian, dilakukan implementasi solusi pada proyek yang sesungguhnya, dan akhirnya eksperimen tersebut dapat divalidasi.

3.5.2 Penggunaan Simulasi Komputer di Arsitektur

Bagian ini adalah membahas penggunaan simulasi komputer sebagai pengembangan, evaluasi dan prediksi desain terutama yang terkait dengan penerapan strategi ventilasi alami di daerah tropis. Pada penggunaan simulasi

komputer hal yang penting adalah pemilihan perangkat lunak, pemasukan data iklim yang sesuai kondisi lokasi, pemodelan dan kondisi batas serta validasi hasil.

Pada bagian pertama akan dibahas kegunaan simulasi computer sebagai alat pengembangan sistem pendinginan pasif terutama ventilasi alami. Terdapat dua contoh utama yang akan dibahas yaitu: pertama, pengembangan sistem ventilasi silang dan kedua, pengembangan sistem ventilasi apung. Tujuan utama pengembangan sistem ventilasi silang ini adalah menghasilkan desain jendela yang optimal dalam menciptakan ventilasi silang pada beberapa dimensi, posisi dan ketinggian ruang (Nugroho, 2002). Beberapa hasil pengembangan sistem ventilasi silang adalah semakin besar ruang maka kecepatan angin di tengah ruang semakin kecil dengan efek turbulensi semakin besar. Sedangkan pengaruh posisi ruang, semakin tinggi posisi ruang maka semakin besar kecepatan angin dan turbulensi yang terjadi. Desain bukaan jendela juga mempunyai pengaruh yang cukup besar antara lain semakin besar bukaan maka akan meningkatkan kecepatan angin dalam ruang. Semakin rendah posisi bukaan akan menurunkan arah angin dalam ruang. Ketinggian maksimal bukaan dengan besaran tinggi 1m adalah 0.5m. Pada bukaan dengan besaran tinggi 0.25m dan 0.5m maka posisi maksimal adalah 0.75m. Penelitian kedua ini bertujuan untuk mengembangkan sistem ventilasi apung terutama pada bangunan yang hanya mempunyai satu sisi atap untuk bukaan jendela. Sehingga ventilasi alami yang digunakan menggunakan ventilasi apung tenaga matahari atau lebih dikenal sebagai cerobong surya. Cerobong surya yang dikembangkan didasarkan pada penelitian yang dilakukan oleh Nugroho (2006) dengan ukuran lebar, tinggi dan panjang 3m x 3.5m x 1m dan dipasang pada atap bangunan satu lantai. Ketika cerobong surya dipasang suhu, rerat adalah lebih rendah 0.5°C dibanding tanpa cerobong surya. Sedangkan kecepatan angin yang dihasilkan dengan pemasangan cerobong surya mencapai 0.6m/detik. Kecepatan angin tertinggi dan terendah terjadi pada pukul 09.00 dan 19.00.

Pada bagian kedua dibahas simulasi computer sebagai alat evaluasi sistem ventilasi yang dirancang dengan mempertimbangkan desain tanggap iklim. Kasus pertama adalah desain sekolah dasar yang menerapkan prinsip

jendela yang sesuai untuk iklim tropis lembab. Sedangkan pada 'kasus kedua adalah desain bangunan Perpustakaan yang juga telah mempertimbangkan aspek ventilasi jendela tanggap iklim. Pada kasus pertama akan dijelaskan tentang evaluasi sistem ventilasi alami pada tipikal sekolah dasar dan dirancang dengan banyak bukaan jendela untuk ventilasi alami. Desain bangunan juga mempunyai banyak koridor luar dan atap yang lebar untuk mencegah sinar matahari langsung dan hujan. Model bangunan terdiri atas 3 sampai 4 lantai dengan ruang kelas yang tipikal mengikuti modul Mokuba. Modul Mokuba berdimensi panjang, lebar dan tinggi 9m x 7.5m x 3m (Nugroho, 2005). Luas bukaan sesuai peraturan bangunan setempat yaitu lebih dari 10% dari luas lantai. Kondisi iklim setempat didapat dari pengukuran lapangan dengan menggunakan alat ukur Dantec's *Multichanel Flow Analyser System*. Kecepatan angin dalam ruang berkisar antara 0.4m/detik sampai 1.1m/detik, kisaran suhu adalah 26°C sampai 32.2°C dan kisaran kelembaban adalah 65%-80% untuk durasi waktu 09.00-18.00. Pada kasus kedua mengevaluasi ventilasi alami pada bangunan perpustakaan yang dianggap berhasil oleh penggunaannya dalam memenuhi kenyamanan termal fungsi perpustakaan. Sebagian besar pengguna menyatakan kenyamanan bangunan disebabkan oleh ventilasi alami 53%, pencahayaan 20% dan tata ruang 27%. Model bangunan berbentuk kubus dengan desain bukaan jendela menangkap angin pada sisi-sisinya. Pada bagian tengah bangunan terdapat atrium. Hasil simulasi menunjukkan keberhasilan tercapainya kenyamanan termal dalam bangunan disebabkan tipe bukaan jendela yang ada mampu menangkap angin baik secara vertikal maupun horisontal. Keberadaan atrium juga berperan dalam memberi pemerataan kecepatan angin dalam bangunan. Faktor utama lain adalah penciptaan iklim mikro bangunan dengan banyaknya vegetasi di sekitar bangunan yang turut berperan mendinginkan suhu udara sebelum masuk dalam bangunan

Pada bagian akhir akan disampaikan simulasi komputer sebagai alat prediksi kinerja desain. Terdapat sebuah contoh kasus untuk memperjelas hal tersebut yaitu kinerja ventilasi pada desain bangunan PSIK Fakultas Kedokteran yang didasarkan pada prinsip jendela tanggap iklim. Desain bangunan terdiri atas 3 lantai dengan bangunan disekitarnya umumnya dua

lantai. Secara umum bangunan ini dirancang dengan sistem ventilasi campuran dengan cara pembagian ruang yang menggunakan ventilasi alami dan buatan. Hasil simulasi menunjukkan pemerataan kecepatan angin yang sesuai dengan kebutuhan termal pada ruang dengan ventilasi alami.

Secara ringkas penggunaan simulasi computer di bidang arsitektur memberikan informasi hubungan yang menyeluruh antara desain tanggap iklim dengan alat penelitian dan perancangan menggunakan simulasi komputer. Simulasi komputer sebagai alat untuk pengembangan, evaluasi dan memprediksi desain utamanya desain tanggap iklim memerlukan beberapa tahapan dan kebutuhan data. Tahapan awal adalah memahami tujuan yang ingin dicapai apakah kajian bersifat mengembangkan atau menguji teori. Tahapan selanjutnya berhubungan dengan kebutuhan data apakah bersifat umum atau spesifik sesuai kondisi nyata bangunan. Apabila bersifat umum maka data iklim dapat digunakan tetapi jika bersifat spesifik maka diperlukan pengukuran lapangan. Tahapan berikut adalah pemodelan yang didasarkan pada tahapan sebelumnya. Beberapa bagian pemodelan memerlukan penyederhanaan serta pada bagian lain perlu detail. Sebagai contoh misalnya ingin melihat pengaruh tipe jendela terhadap kinerja ventilasi alami maka pada bagian jendela memerlukan pemodelan yang detail. Tahapan akhir adalah validasi yang berguna untuk melihat seberapa akurat hasil simulasi jika dibandingkan dengan kondisi nyata di lapangan.

253 Pemilihan Perangkat Lunak Simulasi Komputer

Sonia (2005) mengidentifikasi bahwa kebutuhan simulasi bangunan atau penggunaan peralatan, dapat diintegrasikan ke dalam proses mendesain bangunan. Tujuan dari pembelajaran ini adalah untuk memahami lingkungan ruang dalam pada daerah beriklim tropis dalam meminimalisir suhu udara ruang dalam. Program komputer yang dipilih harus dapat menganalisis performa termal dan mensimulasikan beberapa kemungkinan strategi desain tropis. Untuk itu, program simulasi komputer tersebut harus memenuhi kriteria berikut ini:

- a. Menyediakan data kondisi iklim dan cuaca yang dibutuhkan untuk lokasi spesifik yang diangkat pada penelitian.

- b. Menyediakan data input cuaca yang detail, yaitu data iklim tiap jam (radiasi matahari, suhu udara, kelembapan, angin).
- c. Menyediakan bentuk model yang dapat diedit, seperti terdapat pilihan untuk membuat beragam bentuk bangunan dan modifikasi lebih lanjut ke dalam bentuk bangunan.
- d. Menyediakan analisis termal yang dapat didistribusikan ke dalam komputasi pada waktu-waktu yang dibutuhkan.

2.5.4 Tinjauan Perangkat Lunak Simulasi Termal

Sonia (2005) menjelaskan bahwa kebanyakan program simulasi yang ada dan telah dikembangkan oleh para peneliti adalah untuk mendapatkan peralatan analisis yang sangat canggih. Itu membutuhkan sejumlah detail informasi yang signifikan yang muncul pada saat akhir proses desain dan hasilnya sangat numerikal dan tekstual. Hal tersebut mempersulit para arsitek dalam memasukkan hasil analisis selama proses mendesain. Para desainer bangunan membutuhkan peralatan analisis energi yang dapat digunakan dengan cepat dan menyajikan hasil yang mudah untuk dimengerti. Gratia E. (2004) berpendapat bahwa peralatan pengguna untuk para arsitek harus mudah dioperasikan serta menggunakan bahasa gambar yang biasa digunakan para arsitek dalam proses ilustrasinya.

Survey komparasi melalui program simulasi energi 20 bangunan besar oleh Crawley, et al. (2005) menjadi referensi banyak peneliti. Keberadaan analisis komparasi tersebut menyediakan informasi yang cukup bagi para peneliti untuk mendapat perkiraan yang cepat dan tepat berdasar pada informasi yang disediakan oleh para pengembang program dalam berbagai kategori seperti bentuk-bentuk model umum, selubung dan pencahayaan alami bangunan, ketersediaan data iklim, validitas dan hubungan terhadap program-program lainnya. Dari survey komparasi tersebut, program simulasi berikut ini yang memenuhi kriteria pada penelitian, yakni: ECOTECH, Energy Plus, e-Quest, IES <Virtua Environment> (IES <VE>), dan TRNSYS. ECOTECH merupakan program simulasi yang paling ideal untuk penelitian ini, yang dapat memenuhi seluruh kebutuhan eksperimen dan dapat dengan mudah diintegrasikan ke dalam proses desain bangunan.

Sonia (2005) menyadari kebutuhan pada simulasi bangunan atau perangkat komputer yang dapat diintegrasikan dengan proses perancangan bangunan. Kompleksitas dari perangkat simulasi yang diciptakan oleh ilmuwan dan yang lebih banyak berorientasi teknik kadang menjadi kendala bagi arsitek yang lebih berorientasi visual dalam penggunaannya. Program simulasi komputer yang terpilih harus menyediakan perangkat desain yang mudah digunakan. Sonia (2005) menjelaskan faktor-faktor berikut ini untuk diintegrasikan pada program:

- a. Menyediakan perangkat tampilan bangunan yang membantu proses desain.
- b. Menyediakan fasilitas yang mendukung program AutoCad sehingga informasi bangunan dapat diterapkan pada gambar.
- c. Menyediakan perangkat pembuatan tampilan grafis dan numerik.
- d. Menyediakan perangkat informasi desain bangunan yang membutuhkan proses pembelajaran yang cepat dan mudah untuk digunakan.
- e. Menyediakan pilihan untuk menciptakan database komponen bangunan.
- f. Memungkinkan para peneliti untuk meluaskan studi mereka untuk melebarkan perspektif dan cakupan.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memahami lingkungan dalam bangunan pada iklim tropis dalam meminimalisir suhu udara ruang dalam bangunan. Program komputer yang digunakan harus dapat menganalisa kondisi termal dan men-simulasikan semua kemungkinan dari strategi desain tropis. Oleh karena itu, program simulasi komputer harus memenuhi kriteria sebagai berikut:

- a. Menyediakan data kondisi iklim dan cuaca yang dibutuhkan untuk spesifikasi lokasi penelitian.
- b. Menyediakan detail data input cuaca untuk data iklim per jam (radiasi matahari, suhu, kelembaban, angin).
- c. Menyediakan alat permodelan yang dapat dirubah, sebagai contoh pilihan-pilihan dalam menciptakan bermacam-macam bentuk bangunan secara umum dan modifikasi lebih jauh pada bentuk bangunan.
- d. Menyediakan analisa termal yang memungkinkan distribusi dari perhitungan komputer pada langkah waktu yang dibutuhkan.

Pada umumnya, untuk taksiran dan analisa simulasi, prinsip penelitian ini menerapkan: analisa kualitatif, analisa kuantitatif, komparasi terhadap penelitian sebelumnya, komparasi dengan kondisi dan statistik dunia nyata (Satwiko, 1998). Pertama, analisa kualitatif untuk masalah sekunder dilakukan. Hal ini termasuk isu-isu yang harus diperhitungkan, tetapi bukan bahan pertimbangan utama. Beberapa penelitian dipenuhi dengan filosofi dan tidak mudah dihubungkan pada skenario sains bangunan. Untuk menentukan relevansi dari pemikiran filosofi ke sains bangunan, analisa kualitatif logis diturut sertakan. Hal ini biasanya mendahului analisa kuantitatif.

Kedua, analisa kuantitatif untuk masalah sederhana telah terkonduksi. Orang-orang meminta kondisi udara dalam yang berbeda untuk menjaga kenyamanan, tergantung pada aktivitas mereka. Pada banyak kasus, rekreasi dan tingkah laku telah ditentukan berdasarkan kultur dan budaya. Hubungan yang semacam ini didiskusikan secara kuantitatif dan dikoreksi menggunakan program kenyamanan termal ASHRAE.

Ketiga, perbandingan dengan studi sebelumnya merupakan sumber dari laporan penelitian untuk masalah numerik yang kompleks. Simulasi termal termasuk matematika yang kompleks. Sejak penelitian ini fokus pada aplikasi dari kode Simulasi Komputer banyak isu muncul secara numerik dan mengarah pada keakuratan dan validitas laporan penelitian sebelumnya. Keempat, perbandingan dengan kondisi lingkungan yang sebenarnya dilakukan. Lebih baik daripada pengaturan sederhana simulasi komputer untuk meniru kondisi asli. Kesalahan dapat disebabkan oleh bervariasi masalah mulai dari data input yang salah hingga konfigurasi program komputer yang tidak layak. Terakhir, analisa statistik digunakan khusus untuk menginterpretasikan data cuaca. Untuk menyesuaikan program, hasil eksperimen menggunakan program simulasi komputer diperbandingkan dengan eksperimen pengukuran lapangan. Keyakinan dari hasil yang telah ditentukan, dan data input yang ditambahkan untuk memproduksi hasil yang merefleksikan situasi yang sebenarnya.

BAB 4

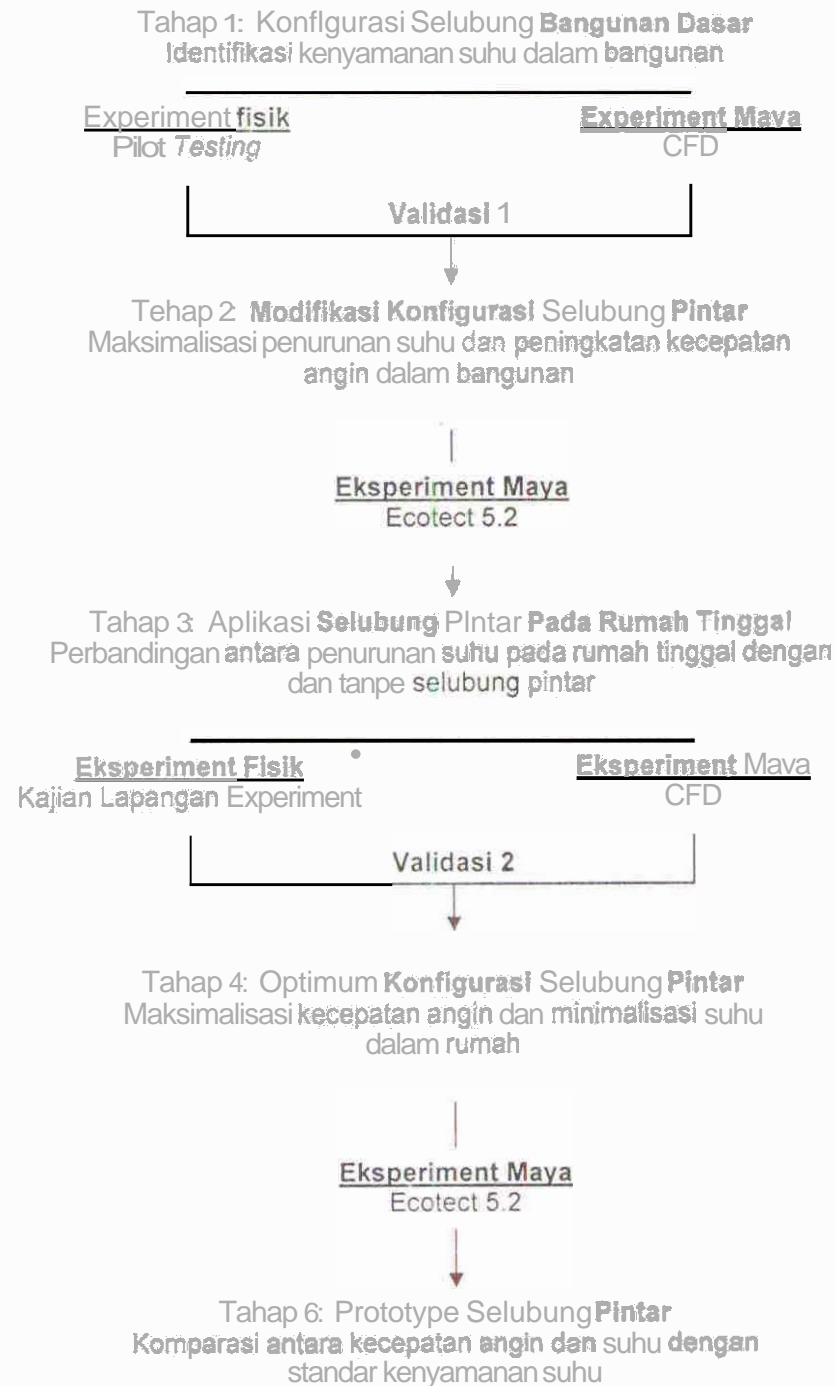
METODE PENELITIAN

Bahan penelitian sebagai fokus dan **variabel** utama dalam penelitian ini adalah **ventilasi** sebagai upaya pendinginan alami dan selubung bangunan. Sistem ventilasi yang diteliti memiliki keterkaitan dengan **elemen** atap **pintar** bangunan. Perilaku aliran udara menjadi **penting** dalam menunjang pendinginan alami terutama kenyamanan **suhu**, yaitu untuk membuang **panas** dan kelembaban yang tinggi. Perilaku aliran udara dalam ruang **sangat** terkait keterpaduan atau kepintaran kinerja dinding. Obyek **bangunan** adalah **tipikal** rumah sehat sederhana sesuai Keputusan Menteri Permukiman dan Prasarana Wilayah Nomor: 403/KPTS/M/2002 tentang **Pedoman** Teknis Pembangunan Rumah Sederhana Sehat yang di masa depan merupakan prosentase terbesar tipe perumahan rakyat. Pada penelitian ini mengambil **kasus** di perumahan Joyo Asri sebagai salah satu **sampel** perumahan besar di Malang yang mempunyai tipikal rumah sehat sederhana.

Cara penelitian merupakan urutan langkah penelitian yang meliputi pengaruh konfigurasi selubung bangunan **berdasarkan tinjauan pustaka**, **modifikasi konfigurasi** dan geometri atap **pintar**, **aplikasi** pada model dasar rumah, **optimasi** atap **pintar**, dan **perumusan** atap **pintar**. Pengaruh konfigurasi atap pada rumah eksisting terhadap kecepatan dan kernerataan **angin** dalam ruang **dikaji** melalui pengukuran lapangan dan **simulasi** komputer. Modifikasi konfigurasi **atap bangunan dilakukan** untuk **memaksimalkan** kecepatan dan **kemerataan** angin. Aplikasi terhadap hasil modifikasi **terbaik** pada model dasar rumah tinggal dilakukan untuk melihat **kinerja** ventilasi baru yang dinilai melalui pengukuran dan simulasi. Langkah ini **juga** dilakukan untuk **memperoleh** validasi simulasi komputer yang kedua. **Optimalisasi** selubung **pintar dilakukan** dengan melihat **efektifitas ventilasi silang** dan apung terhadap peningkatan kecepatan **angin** dan penurunan suhu.

Lima langkah metode tersebut diatas dilakukan untuk tiap **elemen** sesuai tahapan waktu penelitian. Tahun pertama dilakukan penelitian tentang selubung **pintar** bukaan **jendela**, tahun kedua dilakukan penelitian selubung

pintar atap dan tahun ketiga dilakukan penelitian selubung pintar atap. Langkah penelitian dapat ditunjukkan dalam gambar 4.1.



Gambar 4.1: Lima langkah metoda dalam kajian sistem ventilasi selubung pintar bangunan pada setiap elemen bukaan jendela (tahun 1), dinding (tahun 2) dan atap (tahun 3)

Penelitian dilaksanakan secara eksperimen lapangan dan simulasi komputer dalam tiga tahun yang melibatkan mahasiswa S2 dan S1. Penelitian ini menggunakan simulasi komputasi termal untuk mengkaji pendinginan alami rumah tinggal yang dianggap tipikal. Perangkat lunak yang digunakan adalah Ecotect 5.2 yang telah divalidasi dengan membandingkan hasil simulasi dengan hasil pengukuran lapangan. Pemodelan awal adalah sama dengan kondisi eksisting baik material, ketebalan maupun bentuk demikian juga pengisian data iklim. Bagian berikut akan menjelaskan tentang metode penggunaan simulasi komputer yang terdiri atas tahapan pemilihan perangkat lunak, kebutuhan data, pemodelan dan kondisi batas serta validasi.

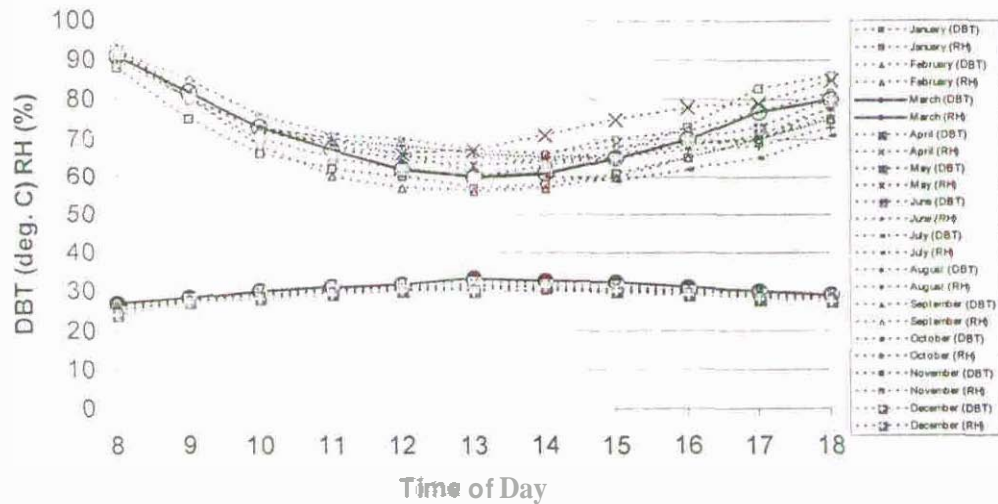
4.1 Pemilihan Perangkat Lunak Simulasi

Pada tahap pemilihan perangkat lunak atau *software*, beberapa pertimbangan yang dilakukan adalah faktor kemampuan program, kemudahan penggunaan dan biaya. Kemampuan *software* dapat dilihat pada tipe dan metode perhitungan yang dapat dilakukan. Tipe perhitungan misalnya mempunyai pilihan meliputi *steady state* atau *transient*. Kemudahan penggunaan dapat dilihat pada kemampuan pemodelan yang cepat serta mempunyai fasilitas mengambil model dari software lain. Sedangkan harga biasanya menyesuaikan dengan kemampuan, kemudahan *software* dan jangka waktu lisensinya. Penelitian ini menggunakan *software Ecotect* yang mempunyai kemampuan dan akurasi tinggi dengan kemudahan pemodelan serta harga terjangkau.

4.2 Data Iklim

Data iklim pada lokasi tertentu umumnya didapatkan dari stasiun cuaca yang kemudian dengan perhitungan power law di konversi sesuai rona lingkungannya (area terbuka, pedesaan, perkotaan). Hal ini dilakukan oleh beberapa peneliti seperti Majid (1996) dan Nugroho (2007) untuk melihat profil angin. Data tentang radiasi matahari, suhu, kelembaban juga harus menyertainya yang berguna tidak saja untuk akurasi simulasi tetapi juga untuk menentukan zona kenyamanan termal pada lokasi tertentu. Ketersediaan data

iklim pada waktu lama seperti 20 tahun akan lebih baik untuk memberi gambaran kecenderungan kondisi iklim seperti pada contoh berikut:



Gambar 42. Model iklim untuk data tahunan di Malang

4.3 Model dan Kondisi Batas

Pada pemodelan salah satu faktor yang harus diperhatikan adalah penyederhanaan bentuk. Penyederhanaan ini tergantung pada elemen apa yang akan diamati sehingga menghasilkan akurasi yang tinggi dengan waktu yang singkat. Penempatan model disesuaikan dengan kondisi nyata dengan titik amatan seperti pada pengukuran lapangan. Simulasi CFD umumnya menggunakan sistem grid untuk menciptakan kondisi batas. Kondisi batas merupakan elemen model yang dapat diberi data baik data iklim maupun material. Pemasukan data iklim pada kondisi batas sesuai dengan waktu pengukuran sehingga nantinya dapat dilakukan validasi.

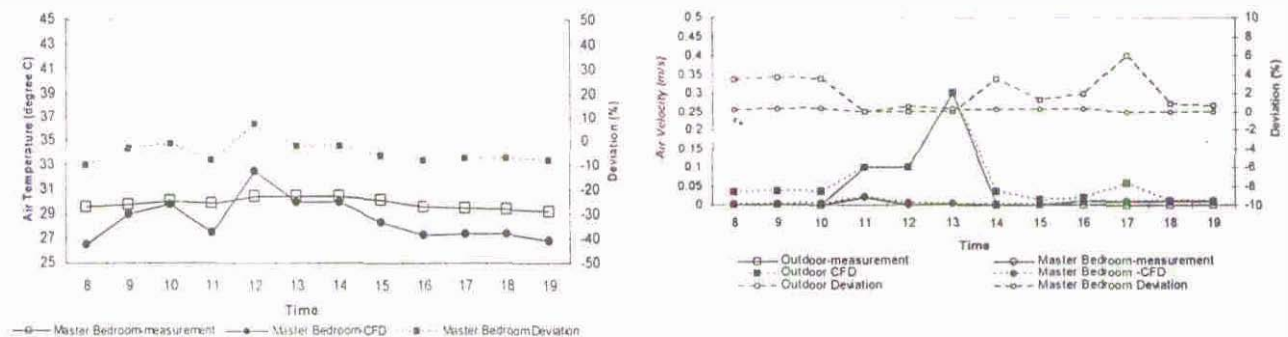
4.4 Validasi

Validasi digunakan untuk menunjukkan seberapa akurat hasil simulasi computer dengan cara membandingkannya dengan hasil pengukuran lapangan. Validasi simulasi computer untuk pendinginan alami umumnya berupa validasi suhu udara. Untuk menghasilkan validasi yang akurat maka titik pengukuran di lapangan dan titik pengamatan di simulasi haruslah same. Gambar 3.4 menunjukkan contoh titik pengukuran lapangan.



Gambar 4.3: Posisi titik pengukuran *global weather* (Δ), *compact data logger* (\times) and *thermal data logger* (\square)

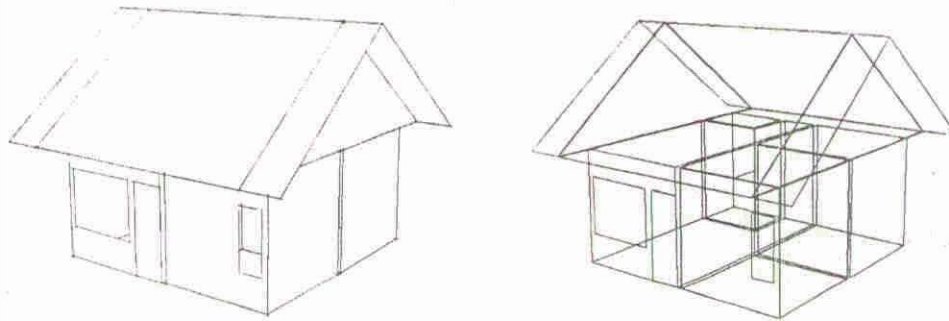
Pada pengukuran di luar bangunan batas toleransi perbedaan adalah 20 persen sedangkan pada pengukuran di dalam bangunan adalah 10 persen. (Nugroho, 2007). Gambar 3.5 menunjukkan contoh hasil yang akurat pada pengukuran dalam ruang.



Gambar 4.4: Perbandingan antara suhu dan kecepatan angin dalam ruang antara simulasi dan pengukuran lapangan

Studi suhu ruangan yang dilakukan pada bangunan tidak hanya memberikan pemahaman yang berharga tentang kinerja termalnya, tetapi juga

memberikan kemungkinan untuk membandingkan kinerja **termal bangunan** dari hasil simulasi komputer dengan **kinerjanya** dari hasil pengukuran. **Bangunan** dihuni atau beroperasi selama penelitian **berlangsung**. Pengukuran suhu-sebenarnya yang **dikumpulkan** oleh data loggers untuk periode **beberapa** hari dibandingkan dengan **prediksi** komputer untuk periode yang sama. Grafik yang menampilkan kedua data **tersebut** (real **dan hasil kalkulasi**) dapat digunakan untuk **menilai** akurasi simulasi dan **jika** ketidaksesuaian **terjadi** maka parameter yang **relevan** dapat disesuaikan. Jika data cuaca untuk area **penelitian** tersedia, simulasi dapat **dilakukan** pada waktu-waktu yang berbeda dalam **satu tahun**. **Juga**, memungkinkan untuk **mengevaluasi** efek bahan **bangunan** dan faktor iklim pada suhu **termal di dalam** bangunan. **Performa** suhu dari material bangunan dapat dievaluasi. Studi **parametrik** lain yang berkaitan dengan bentuk dan orientasi bangunan, ukuran, tipe, dan **orientasi jendela** dapat juga dilakukan. Permodelan kasar studi **lapangan** seperti ditunjukkan pada gambar 3.6 adalah tipe konfigurasi ruangan dengan ukuran 3m x 3m x 3m. Ukuran ini menggambarkan kamar **tidur** pada studi lapangan. Model yang dibuat untuk analisis termal **disederhanakan bentuknya** karena atribut yang **relevan** disini adalah **properti termo-fisik** (seperti U-values) **selubung** bangunan.



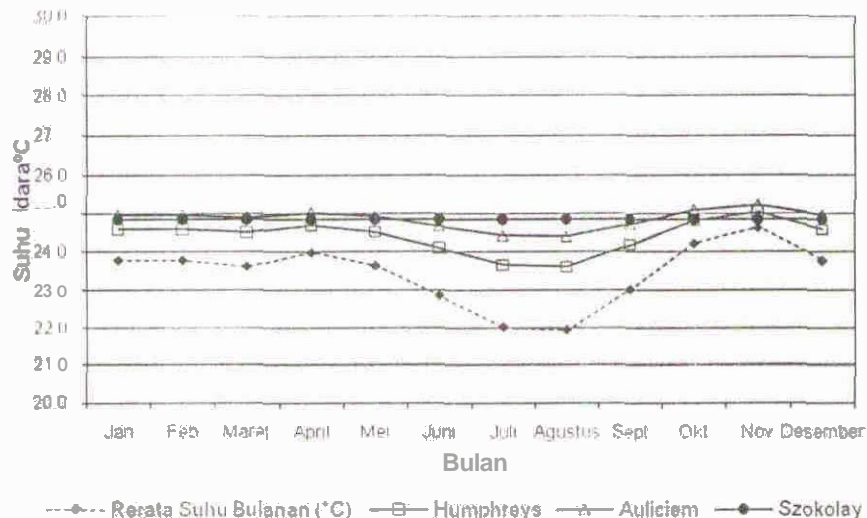
Gambar 4.5: Perspektif Tiga Dimensi Model Dasar Rumah pada Simulasi Termal Ecotect v.5.20.

BAB 6 HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Kondisi Kenyamanan Suhu Pada *Perumahan Di Malang*

5.1.1 Suhu Netral untuk Kenyamanan Suhu di Malang

Zona nyaman dibandingkan menggunakan tiga persamaan di atas dan rerata suhu udara tahunan per bulan dari data iklim untuk data cuaca BMG Malang seperti ditunjukkan pada gambar 5.2. Ini akan memberikan gambaran umum jangkauan zona nyaman untuk wilayah Malang. Nilai hasil dari studi komparatif ini dicocokkan lagi dengan studi sebelumnya. Dengan jangkauan zona nyaman sebesar 5°C (Szokolay, 1997), suhu untuk kenyamanan termal dapat meluas sekitar 2.5°C di atas dan di bawah suhu netral. Dengan mengambil 24.9°C sebagai suhu netral pada bangunan, dengan konsentrasi penelitian ini pada bangunan berpenghawaan alami, didapatkan 26.4°C sebagai batas atas zona nyaman. Suhu netral ini berlaku untuk kondisi tanpa pergerakan udara. Periode paling nyaman terjadi antara bulan Juli sampai Agustus, terkait dengan titik balik utara matahari. Periode paling tidak nyaman terjadi antara Oktober sampai November, yang merupakan bulan-bulan di antara ekuinoks dan titik balik selatan matahari, yang bersamaan dengan pergantian musim kemarau ke hujan serta posisi matahari tepat di atas Kota Malang. Area minimum dan maksimum suhu netral secara berturut-turut berada pada bulan Agustus dan November.

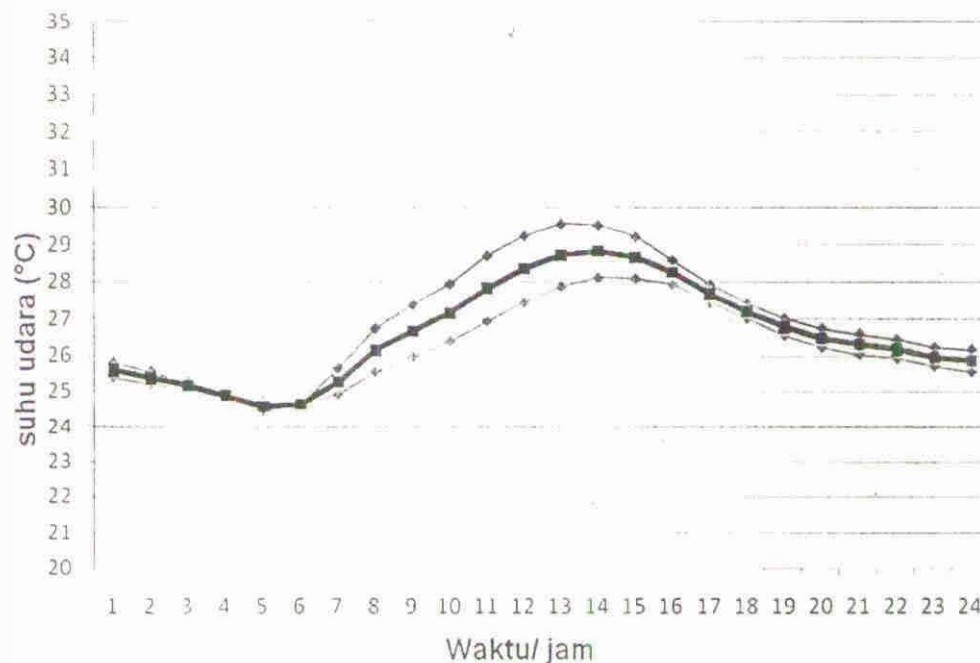


Gambar 5.1: Suhu Netral sesuai data Iklim Malang 5 tahun terakhir

5.1.2 Kenyamanan Suhu pada Studi Kasus Rumah

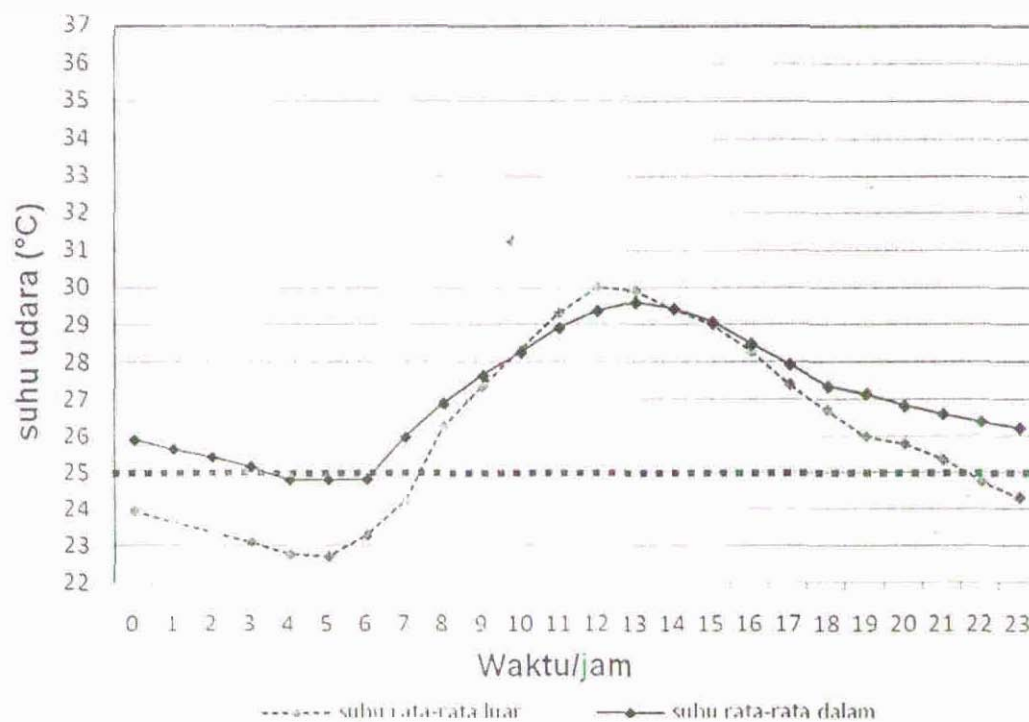
Studi kasus dilakukan pada rumah Blok 41 yang mewakili tipe rumah 40 yang merupakan tipe terbanyak di perumahan Saxofone serta berada pada posisi tengah dalam satu deret. Lokasi pengukuran adalah kamar tidur dengan tinggi 3 meter, lebar dan panjang 3 meter. Data loggers di letakkan pada dua posisi yaitu di tengah ruang dan di luar ruang. Pengukuran dilakukan setiap jam selama 2 bulan untuk mengukur suhu dan kecepatan angin.

Data perjam suhu udara dapat ditunjukkan dalam gambar 5.2. Berdasarkan pengukuran dapat dilihat suhu didalam ruang dibawah suhu diluar ruang pada jam 8 pagi hingga jam 4 sore. Suhu terpanas terjadi pada pukul 2 pada kisaran 28°C . Suhu didalam ruang terlihat lebih panas dibanding suhu di luar ruang pada sore dan malam hari. Suhu tersebut mulai meningkat pada jam 5 sore dan mencapai puncak pada tengah malam. Pengukuran juga menunjukkan bahwa kasus bangunan yang mewakili rumah sehat sederhana tipe 36 mampu menurunkan suhu di dalam ruang namun masih berada di atas suhu netral kenyamanan termal untuk daerah Malang (24.9°C).



Gambar 5.2: Pengukuran suhu di dalam ruang pada bulan September dan Oktober 2011

Pola iklim harian di daerah tropis membutuhkan strategi desain bangunan yang tanggap iklim untuk mencapai kenyamanan termal. Suhu di luar ruangan untuk bulan September dan Oktober ditampilkan pada gambar 5.3. Menurut gambar 5.3, suhu udara luar ruangan mencapai 30°C antara pukul 12:00 sampai 13:00. Suhu terendah dilaporkan sebesar 22.7°C yang terjadi pada pukul 05.00, dan suhu rerata sebesar 26°C. Menurut rumus kenyamanan Szokolay, suhu netral harus dijaga pada 24.9°C. Secara umum, suhu udara luar hasil pengukuran harian antara pukul 08.00 dan 21.00 di atas suhu level nyaman yang dibutuhkan. Demikian pula pada suhu dalam ruang, terlihat lebih tinggi dari suhu udar luar. Suhu udar dalam lebih rendah dari suhu udara luar pada pukul 11.00 hingga 13.00. Namun secara keseluruhan berada di atas batas suhu nyaman kecuali pada pukul 03.00 hingga pukul 06.00.

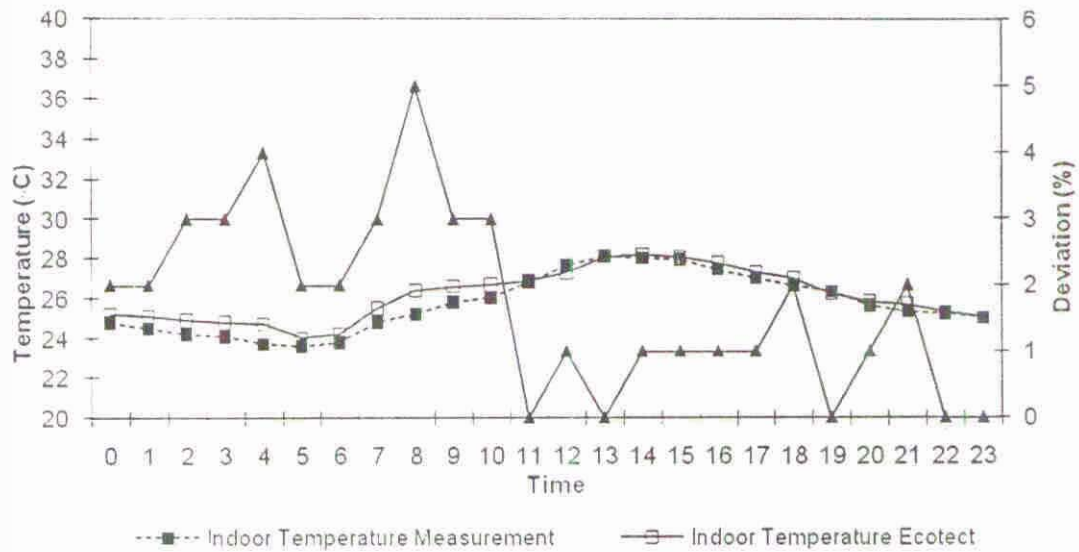


Gambar 5.3: Perbandingan Suhu Udara Rerata Luar dan Dalam Ruang

5.1.3 Validasi Simulasi Termal dengan Perangkat Lunak Ecotect 62

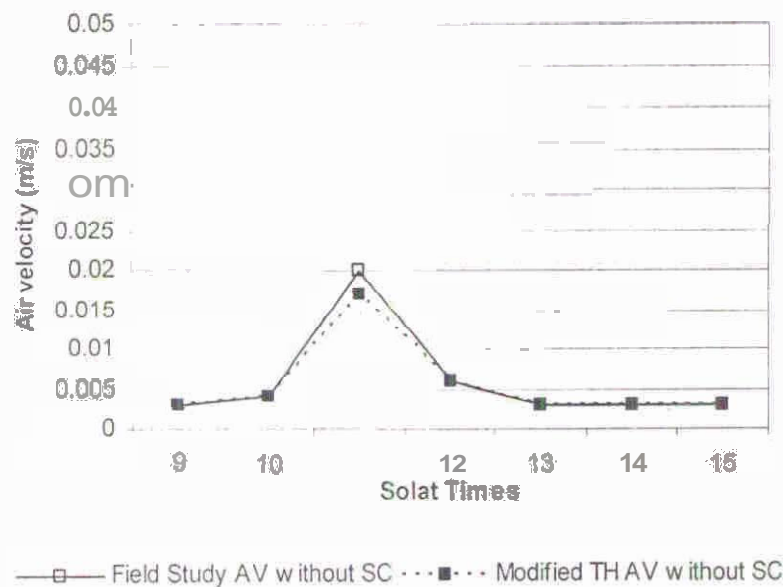
Validasi program Ecotech dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan hasil pengukuran lapangan. Gambar 4.6 menunjukkan perbandingan tersebut. Berdasarkan penelitian sebelumnya angka deviasi untuk validasi yang akurat adalah dibawah 10%. Rerata deviasi pada simulasi

penelitian adalah 2% dengan angka maksimum 5% pada jam 8 pagi. Hasil tersebut menunjukkan simulasi sudah valid



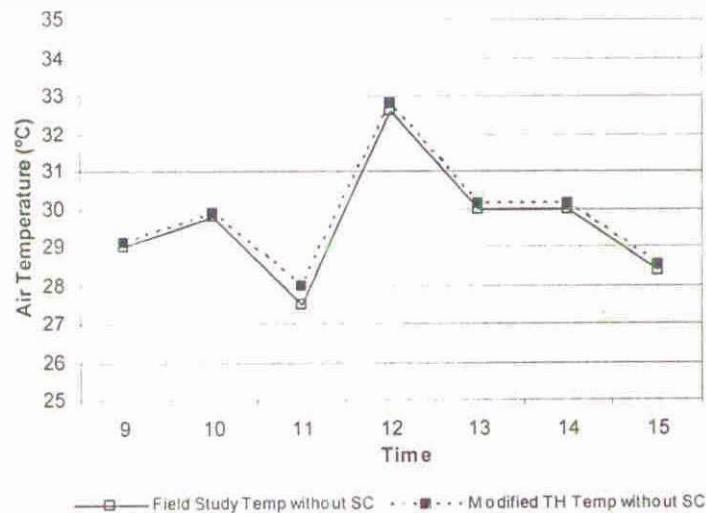
Gambar 5.4: Perbandingan hasil simulasi dan pengukuran lapangan

5.2 Penerapan Cerobong Surya Sebagai Atap Pintar Pada Rumah Sederhana



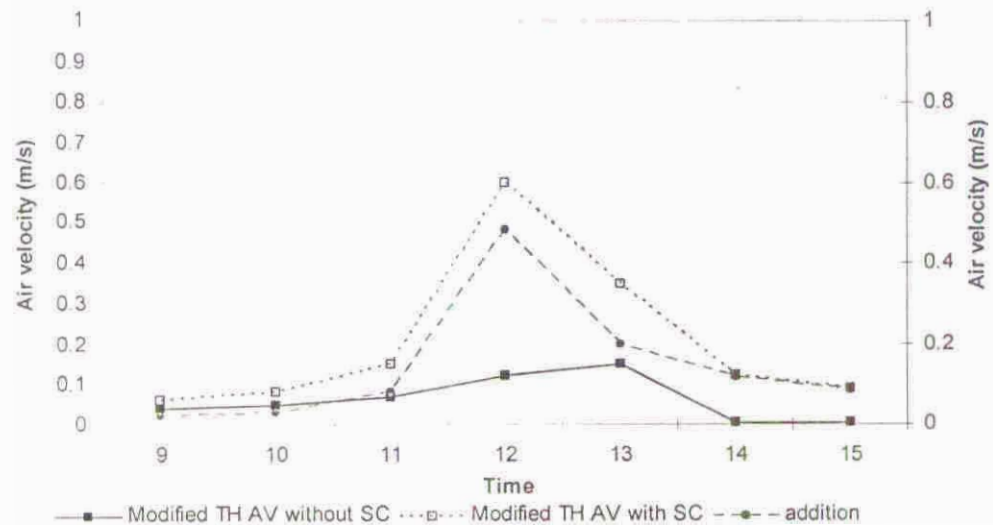
Gambar 5.5 Rata-rata kecepatan aliran udara dalam ruang pada pukul 08:00, 12:00 dan 16:00 pada simulasi eksisting dan model modifikasi

Hasil simJasi menunjukkan pola kecepatan aliran udara yang sama baik pada model eksisting dan model modifikasi. Kecepatan aliran udara maksimal dicapai pada pukul 11:00 pada kedua model dengan nilai 0.02 m/s, sedangkan kecepatan minimal sekitar 0.0003 m/s terjadi pada pukul 09:00 dan 15:00.



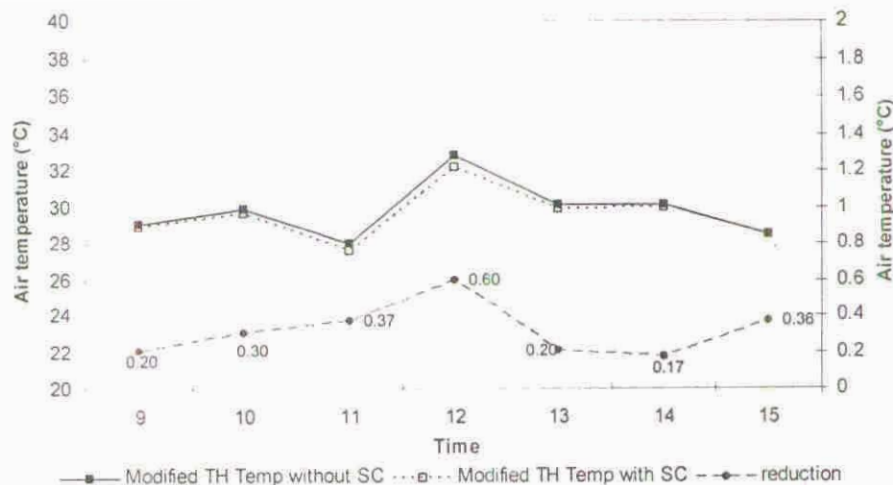
Gambar 5.6 Rata-rata suhu dalam ruang pada waktu-waktu tertentu.

Cerobong surya alternatif I digunakan untuk menginduksi aliran udara ke dalam bangunan dan meningkatkan pendinginan dalam ruang. Namun hal ini akan menimbulkan efek yang merugikan kenyamanan ventilasi pada bangunan, yang dapat mengakibatkan penggunaan ventilasi alami. Pengukuran kecepatan aliran udara dilakukan pada waktu-waktu tertentu (09:00, 10:00, 11:00, 12:00, 13:00, 14:00 and 15:00 hours) dengan orientasi ke arah timur. Kecepatan aliran udara maksimum di area penelitian dicapai pada jam 12:00, 21 Maret, saat solar cerobong surya menghadap ke arah timur. Hasil simulasi menunjukkan perbedaan kecepatan aliran udara yang cukup besar pada pagi dan sore hari dibandingkan tengah hari. Hal ini dikarenakan pengaruh pencahayaan matahari langsung yang menginduksi aliran udara ke dalam bangunan pada waktu-waktu tersebut. Pada 21 Maret, suhu tertinggi di area observasi dicapai pada pukul 12:00. Hal ini disebabkan pengaruh intensitas cahaya matahari yang dominan dan radiasi matahari yang sangat tinggi.



Gambar 5.7 Perbandingan kecepatan aliran udara rata-rata pada model modifikasi dengan dan tanpa cerobong surya

Dari grafik di atas, dapat dilihat bahwa kecepatan aliran udara rata-rata adalah 0.08 m/s, masih dibawah target minimal sebesar 0.25 m/s. Sedangkan kecepatan aliran udara maksimal (0.6 m/s) sudah melebihi persyaratan minimal kecepatan yang dibutuhkan.



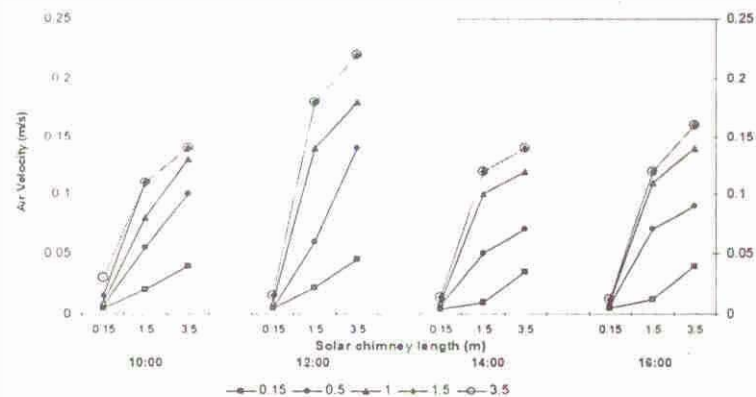
Gambar 5.8 Perbandingan rata-rata penurunan suhu dalam ruang antara model rumah deret dengan dan tanpa cerobong surya pada waktu-waktu tertentu

Pada gambar 5.8 dapat dilihat penurunan suhu terbesar terjadi pada jam 12:00 sebesar 0.6°C. Di sisi lain, penurunan suhu terkecil dengan kisaran 0.17-0.2°C pada pukul 14:00 dan 09:00 disebabkan posisi matahari berada pada

ketinggian yang lebih rendah dan minimnya sinar matahari yang masuk ke dalam cerobong. Secara keseluruhan dapat dilihat bahwa usulan geometri cerobong surya dapat menurunkan suhu dalam bangunan dibanding dengan model yang tidak menggunakan cerobong surya.

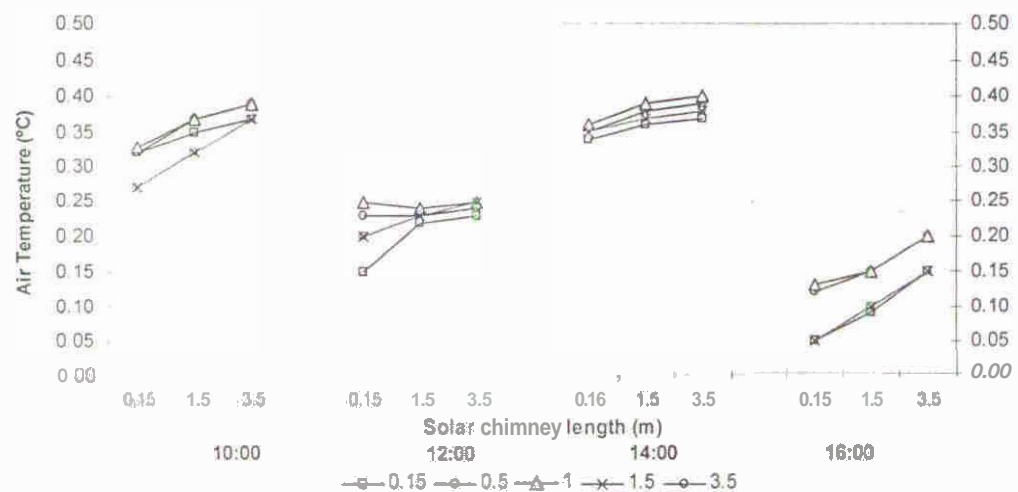
5.2.1 Pengaruh Panjang Cerobong Surya pada Model Rumah Deret

Eksperimen dilakukan pada model cerobong surya dengan panjang 0.5m, 1.5m dan 3.5m, lebar celah 0.15m, 1.5m, 3.5m dan ketinggian 3.5m



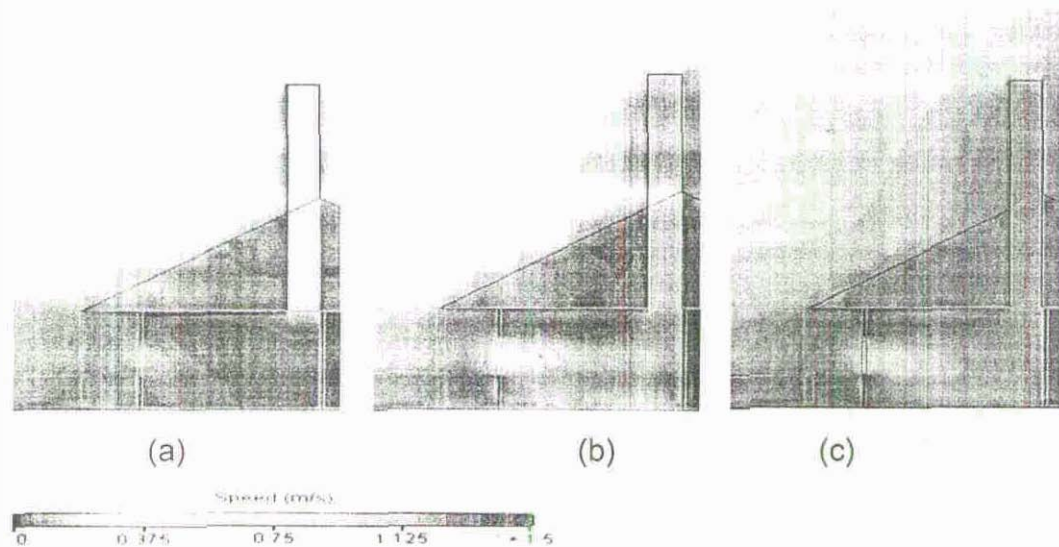
Gambar 5.9 Pengaruh kecepatan aliran udara dengan panjang cerobong surya pada model rumah deret

Dari gambar 5.9 dapat dilihat bahwa kecepatan aliran udara mencapai maksimal pada panjang cerobong surya 3.5m. Pertambahan ukuran panjang dari 0.15-3.5m juga meningkatkan kecepatan aliran udara 0.02-0.22 m/s.



Gambar 5.10 Hubungan antara penurunan suhu dengan panjang cerobong surya

Secara umum, penambahan panjang cerobong surya dapat menurunkan suhu udara dalam ruang. Sebagai akibat dari penurunan suhu yang berbeda antara lingkungan dan suhu dalam cerobong surya.

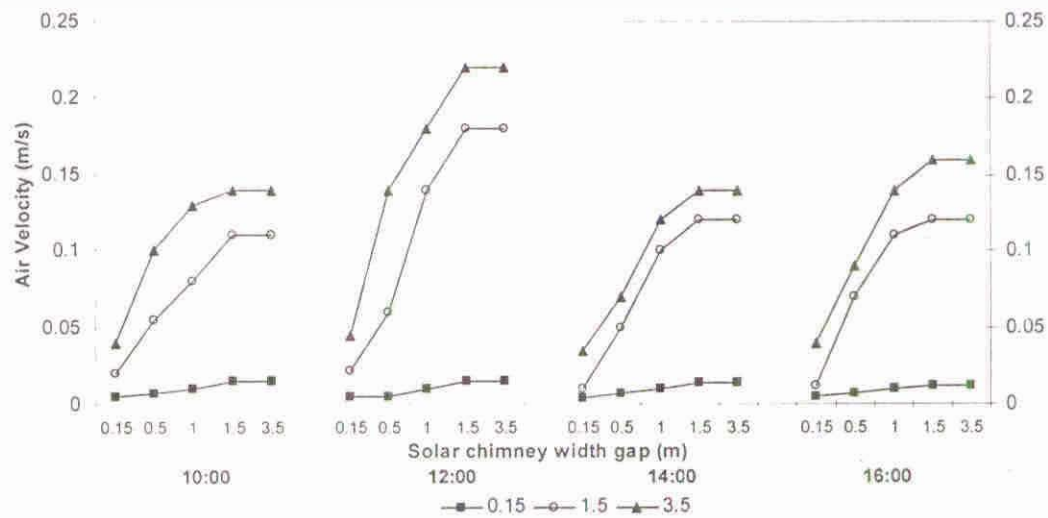


Gambar 5.1 1 Pengaruh panjang cerobong surya dan kecepatan aliran udara dalam ruang (a. 1.5m; b. 1.5m; c. 3.5m)

Gambar 5.11 menunjukkan peningkatan kecepatan aliran udara yang cukup signifikan bersamaan dengan penambahan ukuran panjang cerobong surya. Sehingga, cerobong surya dengan dimensi panjang 3.5m dapat dipertimbangkan dan dipilih untuk mendapatkan kinerja ventilasi yang baik.

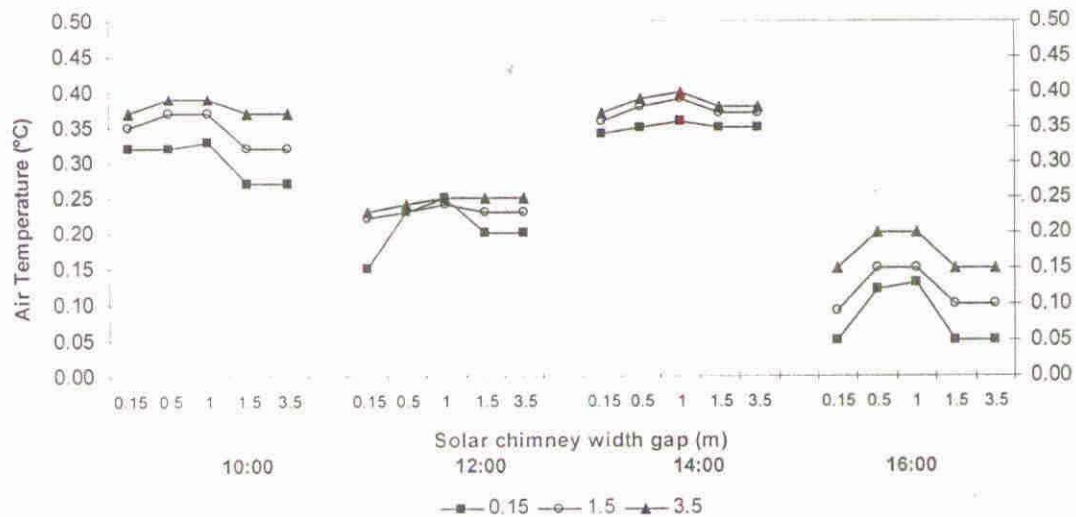
5.2.2 Pengaruh Lebar Cerobong Surya pada Model Rumah Deret

Penelitian pengaruh lebar cerobong surya terhadap kecepatan aliran udara dan suhu dalam ruang menggunakan beberapa kombinasi ukuran lebar cerobong 0.15m, 0.5m, 1m, 1.5m dan 3.5m; panjang 0.15m, 1.5m and 3.5m dan ketinggian cerobong 3.5m.

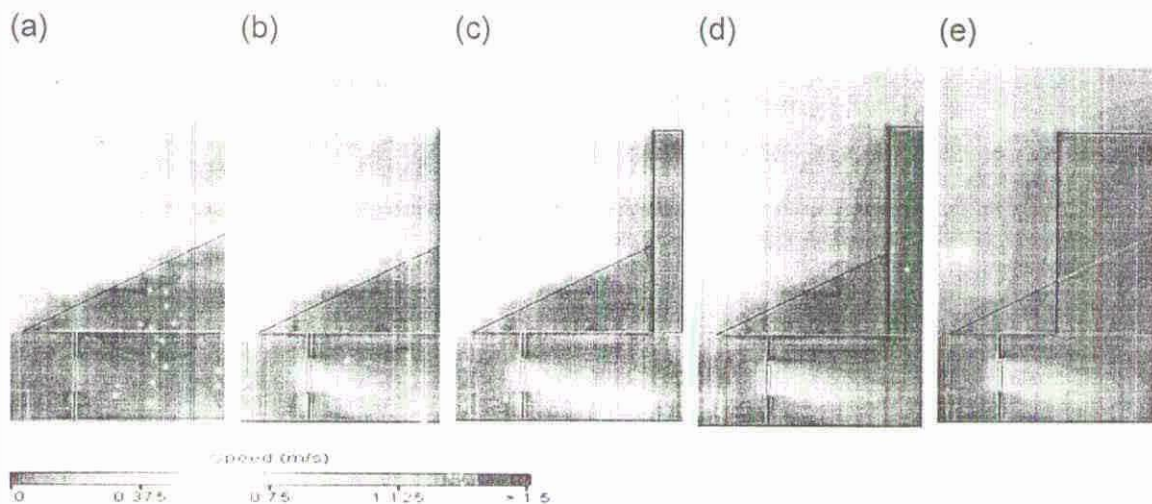


Gambar 5.12 Pengaruh kecepatan aliran udaradan lebar cerobong surya

Dari grafik di atas dapat dilihat bahwa peningkatan kecepatan aliran udara sebanding dengan pertambahan dimensi lebar cerobong surya. Kecepatan aliran udara 0.8m/s pada lebar cerobong 1m akan menurun pada lebar cerobong 0.5m dengan kecepatan sebesar 0.55 m/s.



Gambar 5.13 Hubungan antara penurunan suhu dengan lebar cerobong surya
Penurunan suhu maksimum terjadi pada lebar cerobong in.



Gambar 5.14 Hubungan kecepatan aliran udara dengan lebar cerobong surya pada model rumah deret (a is 0.15m, b is 0.5m, c is 1m, d is 1.5m, e is 3.5m)

Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa sampai 1m pertambahan lebar cerobong surya, kecepatan aliran udara meningkat seiring peningkatan turbulensi. Pada lebar cerobong 1.5m dan 3.5m, pola aliran udara menurun dibandingkan pada lebar cerobong 0.5m dan 1m. Cerobong surya dengan lebar 1m menghasilkan kecepatan aliran udara 75% lebih rendah dibanding kecepatan aliran udara pada lebar cerobong 1.5m. Oleh karena itu, cerobong surya dengan ukuran sangat lebar tidak direkomendasikan. Cerobong surya dengan ukuran paling optimal adalah cerobong surya dengan ukuran 1m.

Tabel 5.1 Perbandingan lebar celah optimal pada cerobong surya antara penelitian ini dengan penelitian sebelumnya

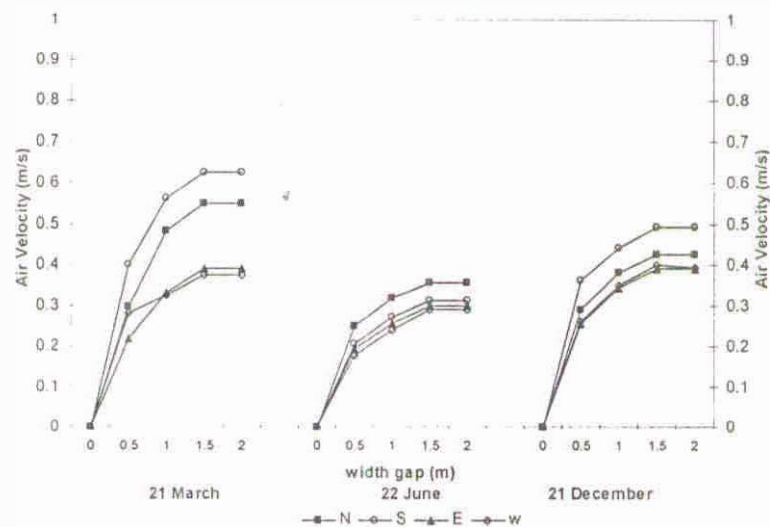
Peneliti	Lebar celah optimal	Ketinggian cerobong	metode
Bouchair (1994)	0.5m	1.95m	Simulasi
Ong (2003)	0.3m	1.875m	Eksperimen fisik
Present	1m	3.5m	Simulasi

Penelitian yang dilakukan ini mirip dengan penelitian yang dilakukan Bouchair (1994) bahwa jika lebar cerobong terlalu besar maka akan terjadi aliran udara yang terbalik, dimana ada aliran udara ke bawah melalui bagian

pusat cerobong. Hasil penelitian ini menunjukkan adanya penurunan kecepatan aliran udaw di bagian pusat cerobong, pada cerobong dengan lebar celah 1.5m dan 2m. Ong (2003) menunjukkan bahwa tidak ada aliran udara balik yang terjadi pada lebar celah cerobong 0.3m dan tinggi 1.875m, dan mampu menghasilkan ventilasi 56% lebih baik dibandingkan pada cerobong dengan lebar celah 0.1m. Pada penelitian ini, tidak ditemukan adanya aliran udara balik untuk cerobong dengan ukuran lebar celah 1m dan ketinggian 3.5m.

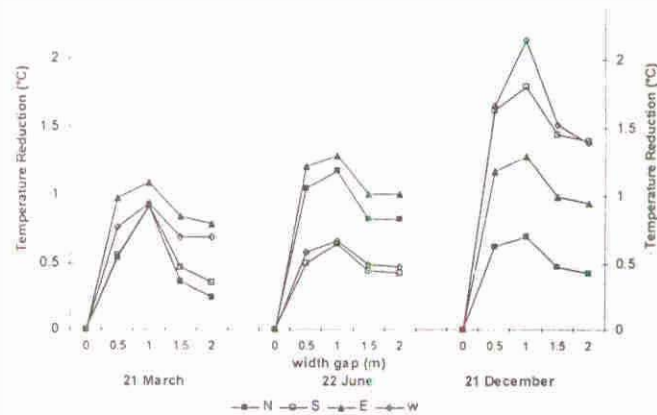
5.2.3 Lebar Cerobong Surya Paling Optimal untuk Peningkatan Kecepatan Aliran Udara dan Penurunan Suhu

Analisis komponen geometri terhadap pergerakan aliran udara dan suhu dalam bangunan, dilakukan pada lima ukuran lebar geometri (0,0.5,1,1.5 dan 2m) dengan rata-rata kecepatan aliran udara pada tiap-tiap orientasi . .



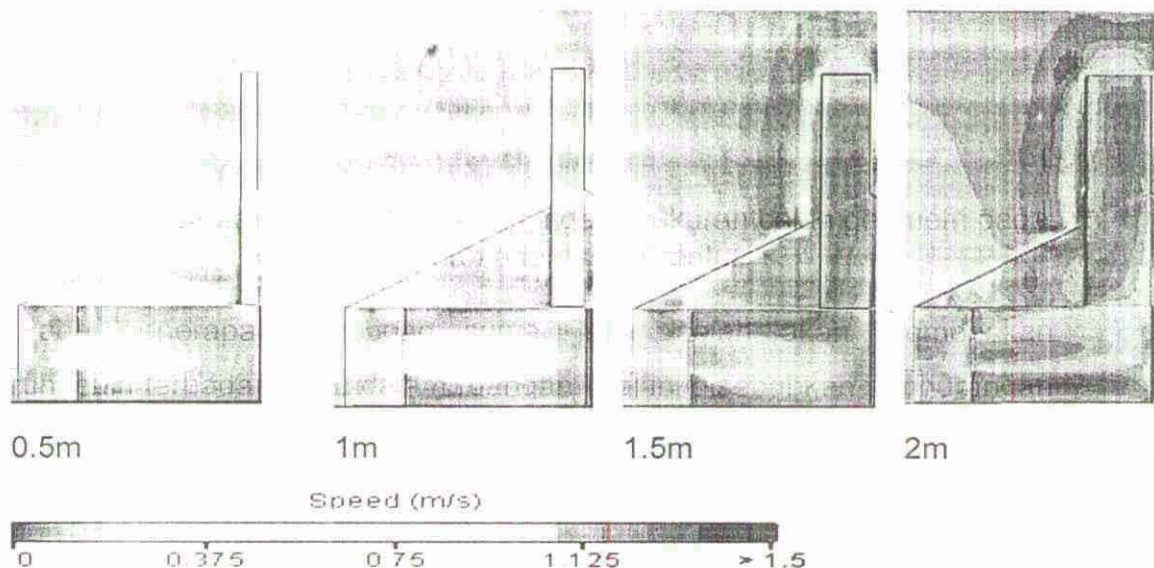
Gambar 5.15 kecepatan rata-rata aliran udara, pengaruh ukuran celah geometri pada waktu-waktu dan orientasi tertentu

Gambar di atas menunjukkan efektifitas celah geometri dalam meningkatkan kecepatan aliran udara pada area penelitian pada hari dan orientasi tertentu. Pertambahan ukuran celah geometri lebih dari 2m, akan memberikan pengaruh yang konstan terhadap pertambahan kecepatan aliran udara pada waktu-waktu tertentu (21 Maret, 22 Juni dan 21 Desember).



Gambar 5.16. rata-rata penurunan suhu, pengaruh ukuran celah geometri pada waktu-waktu dan orientasi tertentu

Pada penerapan cerobong surya, lebar celah akan memberikan pengaruh lebih terhadap suhu dalam ruangan. Hal ini disebabkan pengurangan suhu maksimal pada celah geometri 1m, yang menunjukkan intensitas matahari yang berbeda-beda, pada waktu, hari dan orientasi yang berbeda-beda pula.



Gambar 5.17 Pola kecepatan aliran udara, pengaruh ukuran celah geometri pada 21 Maret, orientasi selatan

Keempat pola kecepatan aliran udara pada gambar diatas, berbeda-beda satu sama lain. Aliran udara yang masuk ke dalam ruang menuju ke arah cerobong surya menunjukkan peningkatan kecepatan aliran udara seiring dengan penambahan ukuran celah geometri. Pada ukuran celah cerobong 0.5m, kecepatan aliran udara berfluktuasi antara 0.2m/s-0.35m/s. Sedangkan

pada celah 1m kecepatan aliran udara berkisar mulai dari 0.05m/s-0.23m/s. Pada celah geometri 1.5m, kecepatan aliran udara berkisar antara 0.35m/s-0.55m/s. Dan kecepatan aliran udara tertinggi sebesar 0.6m/s dicapai pada saat ukuran celah geometri sebesar 2m, yang menunjukkan adanya turbulensi aliran udara dalam cerobong.

Celah geometri 1 m mampu mengurangi penghalang sehingga udara mampu meningkatkan kecepatannya naik ke dalam cerobong. Namun suhu udara dalam ruang masih terpengaruh oleh aliran udara dalam cerobong.

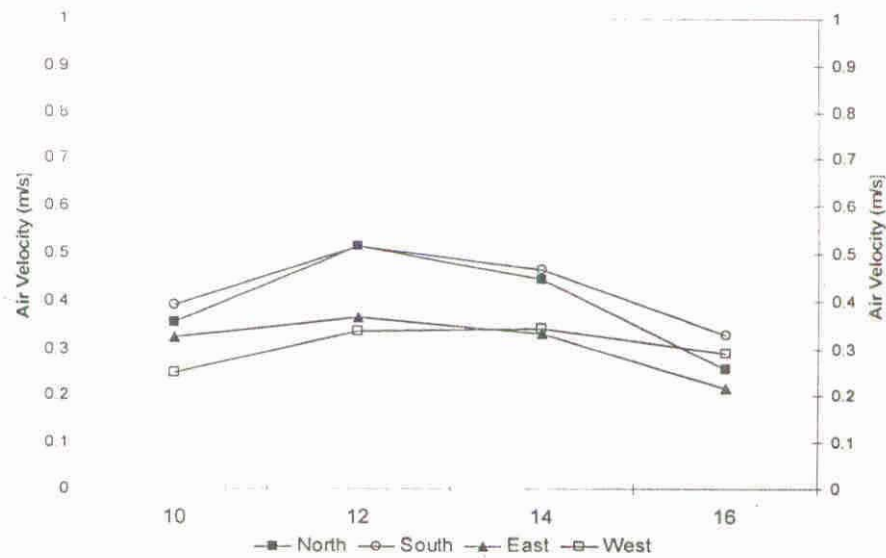
Selama penelitian berlangsung, dapat diamati bahwa lebar cerobong akan meningkat lebih pada satu titik tertentu (yang nantinya disebut sebagai lebar optimal cerobong) dan aliran fluida akan terhisap kembali ke dalam cerobong dekat bagian tengah lorong cerobong. Kemudian aliran udara ke bagian bawah akan tertahan pada aliran fluida ke atas dalam cerobong dan kemudian mengalir keluar melalui cerobong.

Penelitian ini menggunakan radiasi panas matahari (dan bukan pemanasan dinding) serta menggunakan 3m tinggi bukaan cerobong. Studi oleh Bouchair (1994) sebelumnya, tidak menyebutkan hubungan antara tinggi bukaan cerobong dan lebar optimal cerobong. Pada studi tersebut ditemukan bahwa, lebar cerobong optimal tergantung pada ketinggian cerobong dan ketinggian bukaan cerobong, semakin besar ketinggian dan ketinggian bukaan cerobong akan menghasilkan lebar bukaan yang lebih optimal dibanding pada cerobong yang lebih pendek dan bukaan yang lebih kecil.

Pada bagian berikut selanjutnya akan dibahas mengenai dampak dari lebar celah efektif cerobong surya dalam mencapai kecepatan aliran udara optimal dan pengurangan suhu. Kriteria dampak kinerja lebar celah efektif tersebut didasarkan pada orientasi kardinal utama, waktu siang-malam yang sama (*equinox*) dan titik balik matahari (*solstice*), waktu matahari dan intensitas cahaya matahari.

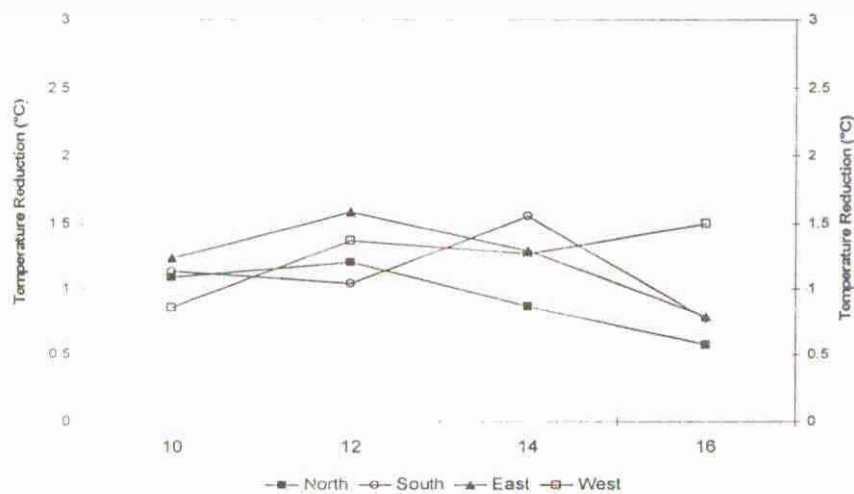
5.2.4 Pengaruh Lebar Efektif Cerobong Surya pada Waktu Matahari

Analisis dilakukan berdasar pada orientasi masing-masing celah geometri optimal cerobong surya. Kecepatan aliran udara rata-rata dan penurunan suhu diperoleh dari semua hari dengan orientasi masing-masing.



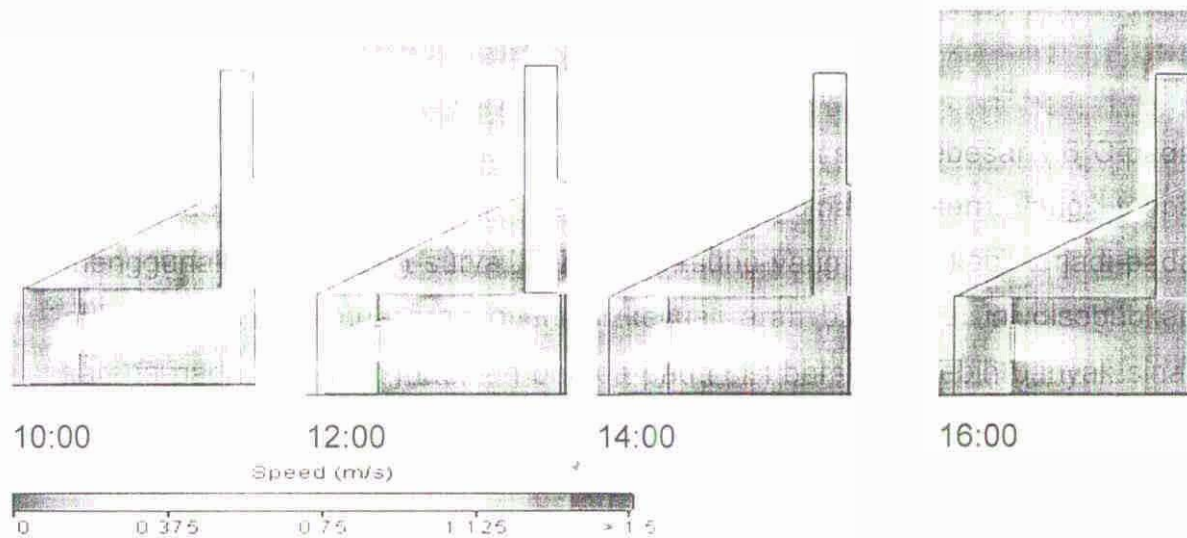
Gambar 5.18 Kecepatan rata-rata aliran udara, sebagai fungsi terhadap waktu matahari, pada masing-masing orientasi

Kecepatan aliran udara maksimal dicapai pada tengah hari (pukul 12:00) pada orientasi fasade utara dan selatan, posisi matahari berada disamping ruang pengamatan, oleh karena itu kecepatan aliran udara cukup rendah pada sore hari. Profil kecepatan aliran udara pada tengah hari (waktu maksimum) menunjukkan tren yang berbeda pada orientasi utara dan selatan dengan orientasi timur dan barat. Kecepatan aliran udara maksimum pada orientasi timur dan barat dicapai berturut-turut pada waktu pagi dan sore hari. Hal ini terutama disebabkan oleh waktu matahari.



Gambar 5.19 Penurunan suhu rata-rata, sebagai fungsi terhadap waktu matahari, pada masing-masing orientasi

Gambar 5.19 menunjukkan adanya penurunan suhu sebesar 1.6°C pada model dengan penggunaan cerobong srya dibandingkan yang tanpa menggunakan cerobong surya. Penurunan suhu yang cukup kecil terjadi pada pukul 16:00 di semua arah orientasi kecuali arah barat. Hal ini disebabkan karena pada sore hari matahari berada pada sisi barat dan lebih banyak sinar matahari langsung yang masuk ke dalam ruang pengamatan dan menginduksi ventilasi.



Gambar 5.20 Kecepatan aliran udara, sebagai fungsi terhadap waktu matahari, pada orientasi selatan dan lebar cerobong surya 1m

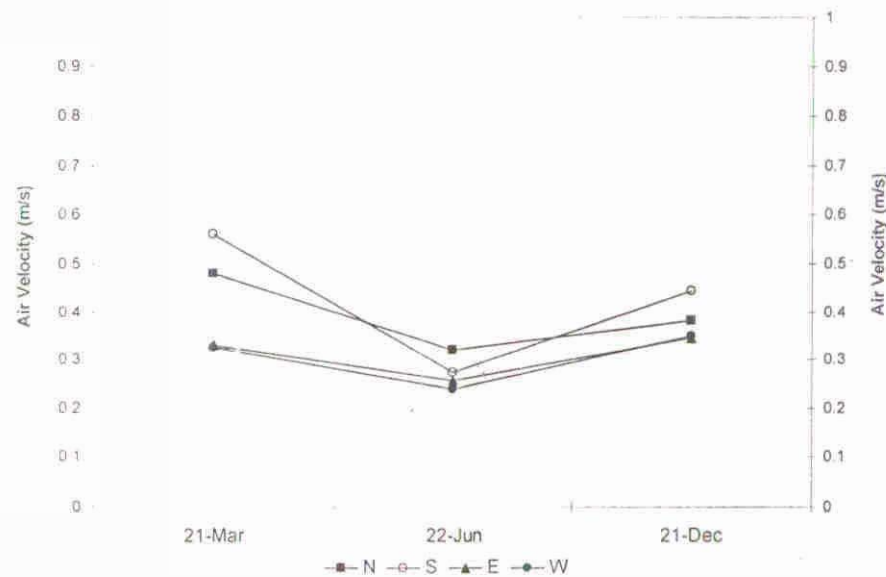
Pola kecepatan aliran udara diindikasikan akan terpengaruh oleh perbedaan waktu matahari. Kecepatan aliran udara berfluktuasi cukup tinggi pada 10:00 dan 12:00 dibandingkan pada pukul 14:00 dan 16:00. Penambahan perolehan panas matahari dalam cerobong surya menyebabkan fluida mengalir ke atas dan keluar dari cerobong. Sebagai akibatnya, fluida jenuh yang berada pada bagian atas cerobong surya menginduksi fluida ke dalam ruangan melalui inlet, kemudian mengalir ke dalam cerobong melalui inlet cerobong di bagian bawah.

Kecepatan aliran udara pada pukul 12:00 paling tinggi dibandingkan waktu-waktu lainnya. Hal ini disebabkan tingginya radiasi matahari yang memungkinkan udara di dalam cerobong menambah kecepatannya, karena peningkatan perolehan panas ke dalam cerobong meningkatkan suhu fluida dalam cerobong, sehingga terjadi perbedaan suhu antara cerobong dan aliran

di luar cerobong. Hal ini akan meningkatkan tekanan dan kecepatan aliran udara. Penelitian Bouchair (1994) menemukan hasil yang hampir serupa, dimana lebar optimum cerobong menghasilkan perbedaan suhu dalam cerobong. Bentuk geometri cerobong yang optimal memberikan keuntungan karena bentuk geometri yang optimal mampu menukar udara pada kecepatan aliran udara maksimal berdasarkan intensitas radiasi matahari. Hal ini sangat penting karena intensitas radiasi matahari sangat bervariasi sepanjang tahun. Tetapi ada beberapa faktor lain yang harus dipertimbangkan dalam desain cerobong yang berpengaruh terhadap bentuk geometri cerobong yang optimal, seperti lintasan matahari.

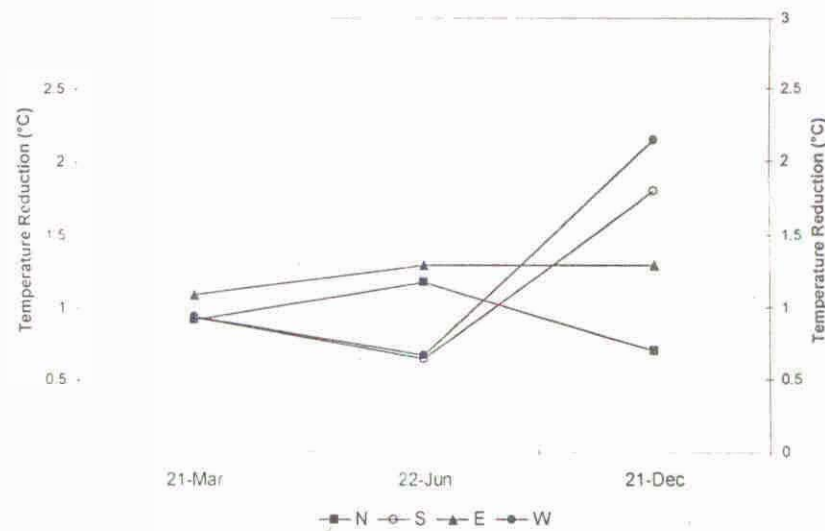
5.2.5 Pengaruh Lebar Efektif Cerobong Surya Terhadap Lintasan Matahari-Titik Pusat Matahari (*Equinox*) dan Titik Balik Matahari (*Solstice*)

Pengamatan kecepatan aliran udara dan penurunan suhu dalam ruangan dilakukan pada model penelitian di waktu-waktu yang telah ditentukan (21 Maret, 22 Juni dan 21 Desember) untuk melihat pengaruh lintasan matahari terhadap kecepatan aliran udara dan penurunan suhu dalam bangunan.



Gambar 5.21 Rata-rata kecepatan aliran udara, sebagai fungsi terhadap terhadap titik tengah matahari (*equinox*) dan titik balik matahari (*solstice*), pada masing-masing orientasi dengan lebar cerobong surya 1m

Dari gambar 5.21 dapat dilihat bahwa kecepatan aliran udara tertinggi terjadi pada 21 Maret dengan orientasi utara dan selatan. Sedangkan pada 22 Juni, kecepatan aliran udara yang terjadi adalah paling rendah dibandingkan waktu-waktu lainnya, hal ini menunjukkan posisi penyinaran matahari dan intensitas matahari memberikan pengaruh lebih terhadap kecepatan aliran udara.



Gambar 5.22 Rata-rata penurunan suhu, sebagai fungsi terhadap terhadap titik tengah matahari (*equinox*) dan titik balik matahari (*solstice*), pada masing-masing orientasi dengan lebar cerobong surya 1m

Penurunan suhu paling banyak terjadi pada 21 Desember sebesar 2.2°C, pada saat orientasi kearah barat.



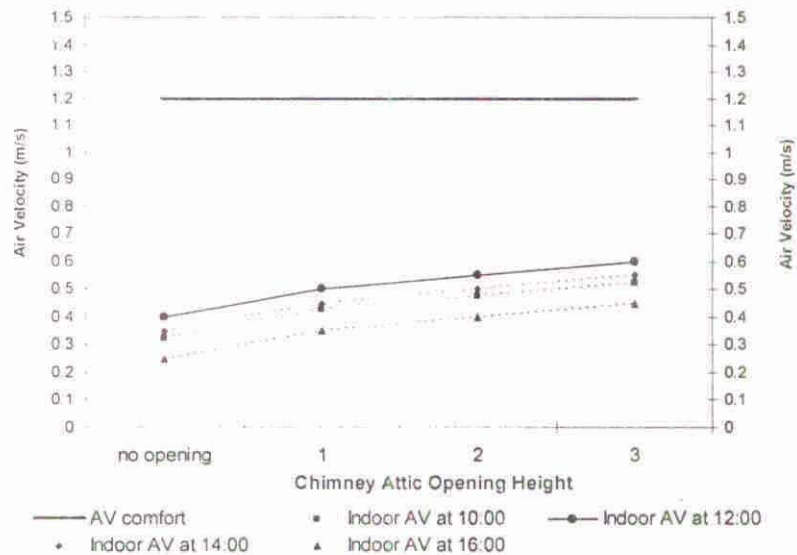
Gambar 5.23 Kontur kecepatan aliran udara, sebagai fungsi terhadap terhadap pukul 12:00 dengan orientasi selatan, dan lebar cerobong surya 1m

Dari gambar 5.23 dapat dilihat bahwa perbedaan waktu simulasi menghasilkan perbedaan pula pada kecepatan aliran udara dalam ruang. Aliran udara ang sangat cepat terjadi pada ketinggian 1.1m sejajar dengan posisi bukaan jendela. Secara umum, aliran udara paling kuat terjadi pada 21 Maret dan menurun pada 22 Juni dan 21 Desember.

Pemilihan hari dalam penelitian ini adalah berdasarkan kondisi iklim (termasuk linasan matahari dan angin musim) seperti yang dilakukan Khedari et al.(2000), Hirunlabh et al.(2001) and Alfonso (2000). Penelitian yang dilakukan ini menemukan bahwa jika cerobong surya digunakan pada tiga hari terpilih tersebut (21 Maret, 22 Juni dan 21 Desember), udara dapat terinduksi ke dalam bangunan dengan kecepatan yang cukup tinggi yang dapat digunakan untuk efek pendinginan secara psikologis dalam ruang, sesuai dengan kondisi iklim. Hasilnya menunjukkan pada tanggal 21 Maret (solar equinox dan radiasi matahari yang tinggi) dapat mencapai kecepatan aliran udara yang tinggi.

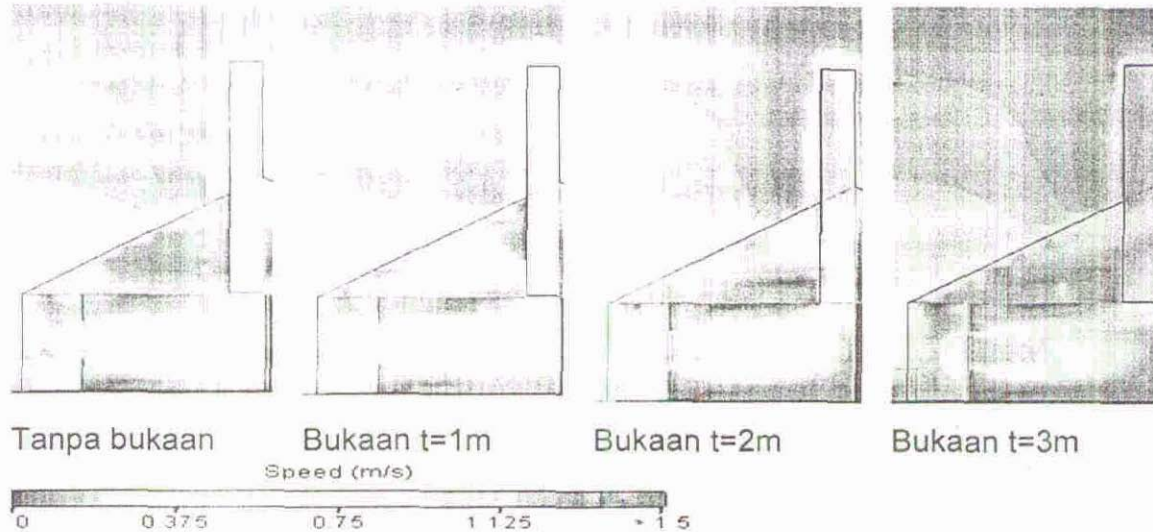
5.2.6 Pengaruh Ketinggian Bukaan Pada Loteng yang terhubung dengan Cerobong Surya

Dengan asumsi penambahan ketinggian bukaan pada loteng (mulai dari plafon sampai atap) pedes ruang pengamatan dengan tujuan untuk mencapai kesetaraan. Rata-rata kecepatan aliran udara pedes cerobong surya dengan penambahan ketinggian bukaan loteng, menghasilkan peningkatan kecepatan aliran udara pada pukul 12:00, 21 Maret dan orientasi ke arah timur. Pada bukaan loteng 3m, kecepatan aliran udara mampu mencapai target kenyamanan ventilasi sebesar 50%.



Gambar 5.24 Dampak dari ketinggian bukaan ruang bawah atap terhadap kecepatan aliran udara terhadap target kecepatan pada orientasi arah timur dan masing-masing waktu matahari

Perubahan yang jelas dapat dilihat pada setiap model, kecuali pada model dengan bukaan loteng 2m dan 3m. Pada model dasar (tanpa bukaan) kecepatan aliran udara berkisar antara 0.25m/s-0.4m/s, hasil ini lebih rendah jika dibandingkan dengan model dengan bukaan 3m dimana kecepatannya meningkat tajam sampai 0.55m/s. Peningkatan kecepatan aliran udara (dari loteng sampai ke cerobong surya) bisa diakibatkan oleh beberapa faktor seperti: udara di bawah atap dihangatkan dan mengalir ke luar menuju lubang loteng yang terhubung dengan cerobong surya. Udara hangat tersebut digantikan oleh udara dingin yang masuk ke loteng melalui lubang ruang bawah atap. Hal ini membentuk kurva lintasan pergerakan aliran udara yang mengalir mulai dari lubang pada plafond dan menuju ke lubang loteng. Sehingga, kecepatan aliran udara maksimal dicapai pada ketinggian bukaan loteng 3m.

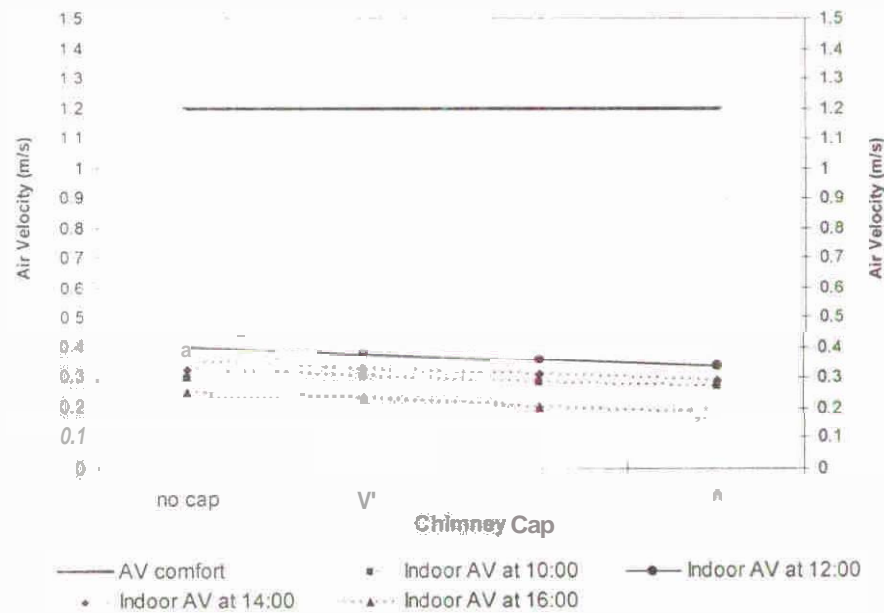


Gambar 5.25 Kontur kecepatan aliran udara, fungsi bukaan loteng yang terhubung dengan cerobong surya pada 21 Maret, pukul 12:00, lebar celah cerobong 1m dan orientasi arah timur

Pada penelitian ini, dampak dari bukaan loteng yang terhubung dengan cerobong surya lebih ditekankan pada pengaruhnya terhadap peningkatan kecepatan aliran udara. Pola utama dari kecepatan aliran udara dipengaruhi oleh ukuran bukaan. Tetapi, turbulensi lebih tidak terlihat dibandingkan pada model dasar. Aliran udara lebih berlapis-lapis dibandingkan model dasar. Ukuran dari bukaan atap akan menyebabkan udara dalam cerobong berkembang menjadi aliran udara yang berlapis. Kombinasi bukaan pada loteng dengan cerobong surya dapat memberikan efektifitas dalam penggunaan *stack ventilation*.

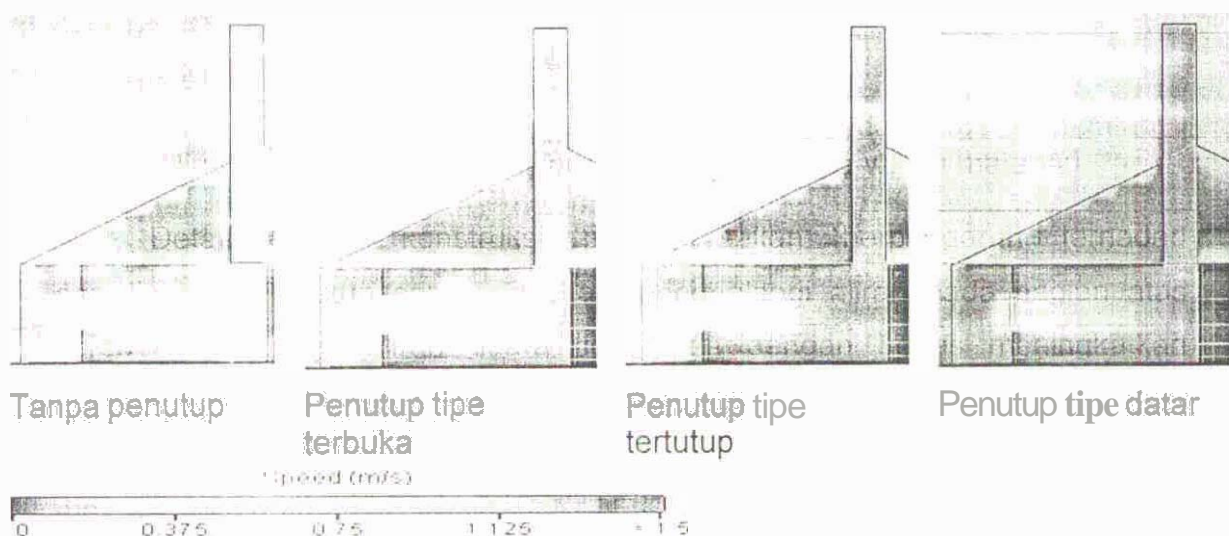
5.2.7 Pengaruh Penutup Cerobong Surya

Kecepatan rata-rata aliran udara pada cerobong dengan penutup lebih rendah dengan cerobong tanpa penutup pada 21 Maret dan orientasi arah timur. Pada penggunaan penutup yang tertutup dan datar, kecepatan rata-rata berkurang pada waktu-waktu yang telah ditentukan. Rata-rata kecepatan berkurang sampai 0.5m/s pada tipe penutup tertutup dan datar. Tipe penutup yang terbuka menunjukkan indikasi yang hampir sama dengan cerobong surya tanpa penutup. Aplikasi penggunaan penutup tipe terbuka akan memberikan total ketinggian cerobong surya setinggi 4.25m.



Gambar 5.26 Pengaruh penutup cerobong surya terhadap target kecepatan aliran udara pada orientasi arah timur dan waktu-waktu matahari

Detail sistem konstruksi penutup akan berpengaruh terhadap aerodinamis. Penutup cerobong akan menghalangi aliran pada bagian atas cerobong sehingga aliran udara tidak bisa dengan bebas meningkatkan kecepatannya. Penutup cerong dengan tipe terbuka dapat mengurangi penurunan kecepatan aliran udara karena aliran udara masih bisa bebas melewati bagian bawah penutup.

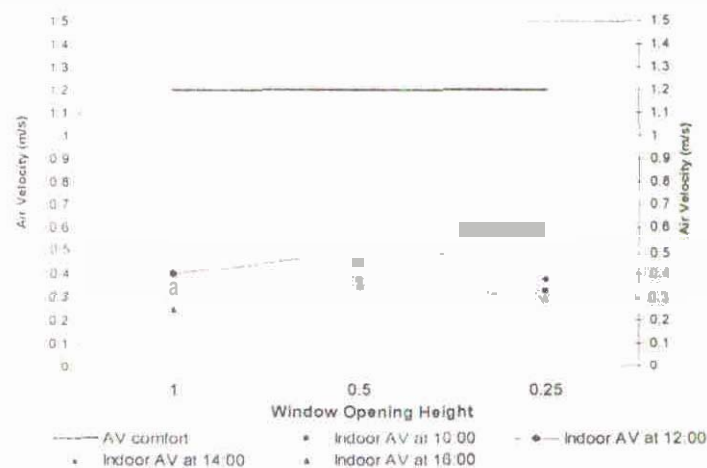


Gambar 5.27 Kontur kecepatan aliran udara, sebagai pengaruh atas tipe penutup cerobong, pada 21 Maret, pukul 12:00, lebar celah cerobong 1m dan orientasi arah timur

Jarak antara penutup cerobong tipe terbuka, tertutup maupun datar memungkinkan perkembangan pola aliran kecepatan seperti pada cerobong tanpa penutup. Dapat dilihat dengan jelas bahwa pada penggunaan penutup tipe terbuka, aliran udara yang terjadi di dalam ruangan dan cerobong surya hampir sama dengan cerobong tanpa penutup.

5.2.8 Pengaruh Ketinggian Bukaannya Jendela

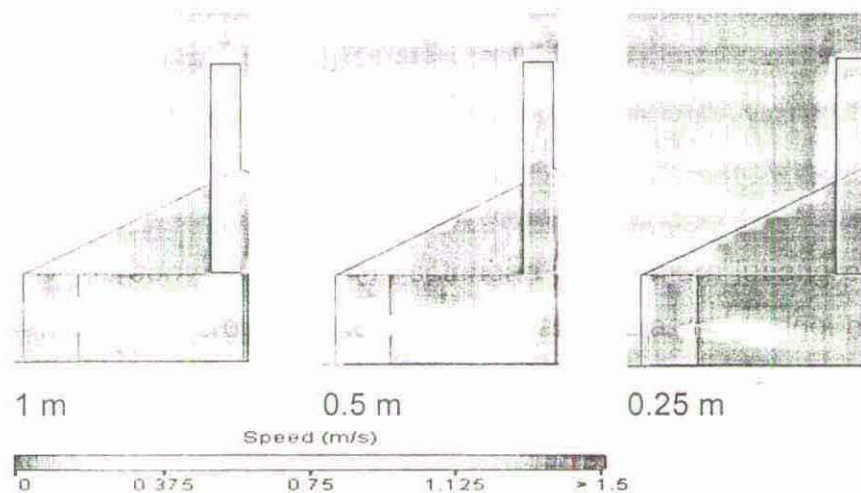
Udara yang masuk ke dalam ruang melalui jendela, mengalir pada zona hunian sebelum berbelok naik melalui lubang pada plafond. Tinggi ambang bawah jendela dengan asumsi konstan 0.9m dari lantai. Profil kecepatan menunjukkan, kecepatan tertinggi muncul pada ketinggian jendela 0.5m dan 0.25m. kecepatan aliran udara dalam ruang lebih tinggi dibandingkan pada cerobong. Pada zona hunian, kecepatan aliran udara mencapai 0.3m/s dan 0.5m/s untuk ketinggian bukaan 0.5m. jika kondisi suhu 32⁰C, maka kecepatan aliran udara minimal yang dibutuhkan untuk mencapai kenyamanan ventilasi adalah 1.2m/s. sehingga kecepatan aliran udara yang dihasilkan masih jauh dibawah persyaratan minimal.



Gambar 5.28 Pengaruh ketinggian bukaan jendela terhadap kecepatan aliran udara dalam mencapai target kecepatan, pada orientasi arah timur dan waktu matahari

Di dalam cerobong, pola aliran udara diarahkan naik ke atas pada model dengan bukaan 1m dan 0.5m. sedangkan pada model dengan bukaan 0.25m, aliran udara dibelokkan ke bagian bawah cerobong dan menurunkan kecepatan. Terjadi pola aliran udara kecil pada jarak antara ruang dan

cerobong. Arus eddy muncul pada setengah jalan antara lubang pada plafond dan bagian tengah cerobong. Kecepatan aliran udara yang tinggi muncul pada bagian atas cerobong pada bukaan jendela 0.25m dan sepanjang cerobong pada bukaan jendela 1m. kecepatan aliran udara tertinggi pada cerobong diperoleh pada penggunaan bukaan dengan tinggi 1m. semakin kecil ketinggian jendela maka kecepatan aliran udara dalam cerobong akan semakin berkurang.



Gambar 5.29 Kontur kecepatan aliran udara, sebagai pengaruh ketinggian bukaan jendela, pada 21 Maret, pukul 12:00, lebar cerobong 1m dan orientasi arah timur

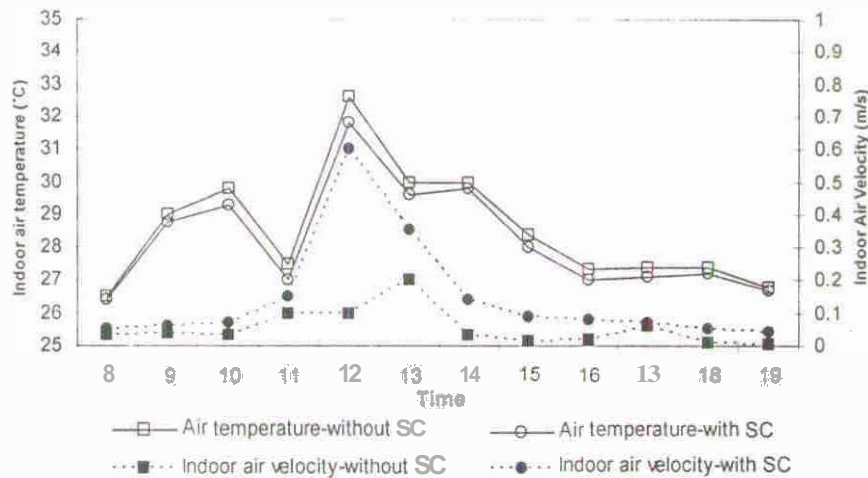
Pada penelitian ini, bukaan jendela diatur sesuai dengan ukuran jendela eksisting dan modifikasi dilakukan pada pengurangan ketinggian jendela. Pengaruh bukaan jendela dapat meningkatkan kecepatan aliran udara pada tinggi jendela 0.5m dibandingkan ukuran lainnya.

5.3 Keterpaduan Desain Selubung Pintar Bangunan

5.3.3 Perpaduan desain dengan Cerobong Surya sebagai dasar Atap Pintar

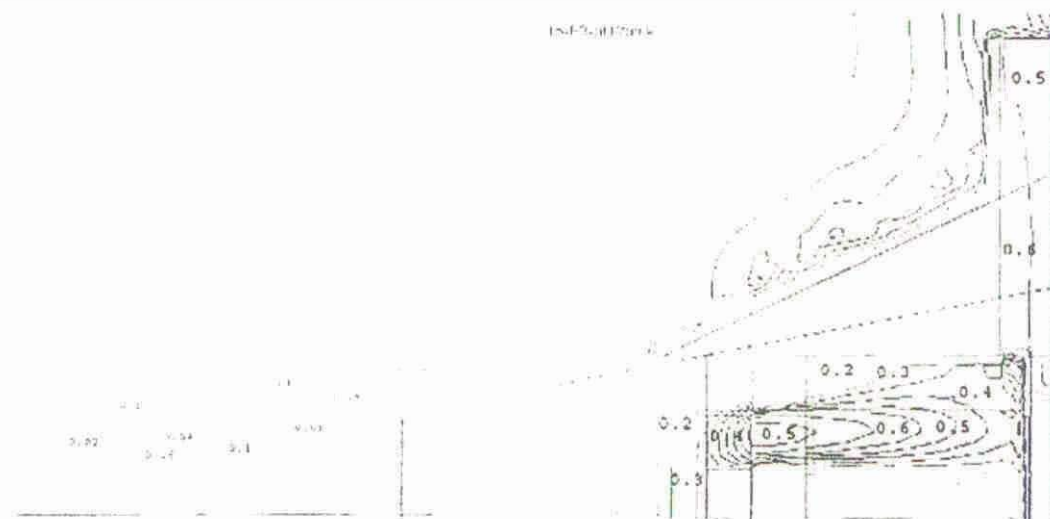
Dalam studi ini, potensi bentuk cerobong-surya optimum (lebar 1m dan panjang 3.5m) dinilai dalam kondisi yang sama (rumah berteras tanpa cerobong-surya). Dengan efek cerobong-surya, pelepasan *heat gain* dari ruang menurunkan suhu udara dalam ruangan hingga berada di bawah suhu udara luar ruangan. Gambar 5.16 menunjukkan suhu udara per-jam dari ruang tidur utama, dengan dan tanpa cerobong-surya. Saat cerobong-surya dipasang, suhu udara rerata sebesar 28.5°C. Jangkauan rerata suhu udara dalam kamar

tidur utama antara 27.5°C dan 31.1°C dari pukul 08.00 – 19.00, hasil ini 0.5°C lebih rendah dibandingkan kamar tidur utama pada rumah berteras tanpa cerobong-surya. Pengurangan suhu udara oleh cerobong-surya sebesar 1.5%.



Gambar 5.30: Suhu udara dan kecepatan udara kamar tidur utama pada rumah dengan dan tanpa cerobong-surya

Rerata kecepatan udara diamati dengan level titik pengukuran yang sama yaitu 1.1m di atas permukaan lantai. Didapati bahwa pada rumah berteras dengan cerobong-surya vertikal, ventilasi udara terpengaruh oleh cerobong-surya. Hasil dapat dibuat lebih signifikan dengan meningkatkan kecepatan udara (0.6m/s) dan pendinginan suhu udara. Kecepatan udara tertinggi dan terendah berturut-turut didapati pada pukul 12.00 dan 19.00.

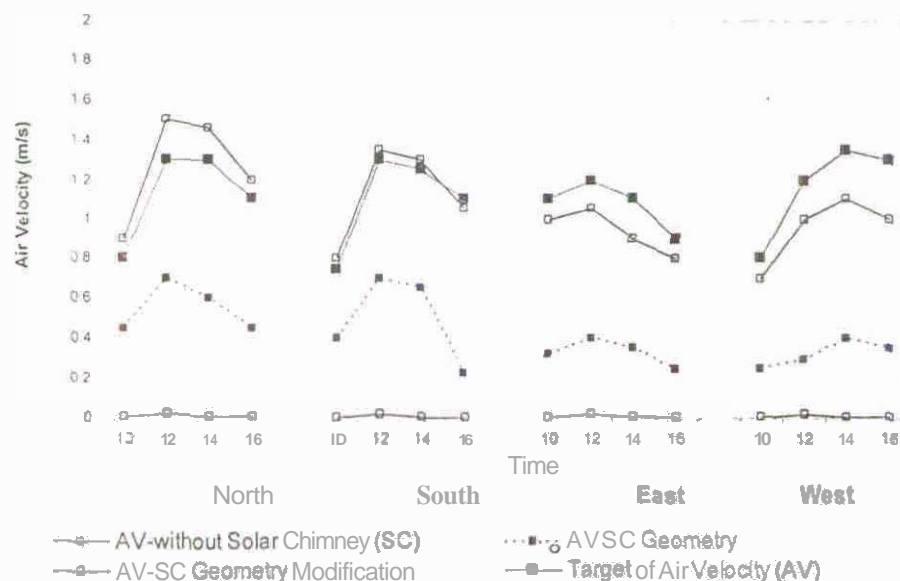


Gambar 5.31: Pola kecepatan udara dalam potongan vertikal (tengah ruangan) dengan dan tanpa cerobong-surya

5.32 Efektifitas Perpaduan desain dengan Cerobong Surya sebagai dasar Atap Pintar

Modifikasi cerobong dan variabel ruang menunjukkan peningkatan kecepatan udara dalam zona nyaman, dan ini merupakan hasil yang memuaskan. Kecepatan rerata pada cerobong surya dengan bukaan di bagian atas lebih tinggi dibandingkan pada cerobong surya tanpa bukaan di bagian atas. Pengurangan kedalaman ruang dan bukaan jendela berhasil meningkatkan kecepatan udara di dalam ruang. Gambar 5.18 menunjukkan cerobong-surya dengan modifikasi cerobong dan ruang pada area yang ditentukan, pergerakan udara berfluktuasi antara 0.3m/s dan 0.7m/s.

Dengan modifikasi cerobong surya, jangkauan kecepatan udara dari 0.9 sampai 1.4 m/s. Dapat disimpulkan, modifikasi cerobong surya meningkatkan kecepatan udara dalam target kecepatan udara absolut untuk kenyamanan termal. Hasil simulasi rumah berteras pada studi lapangan menunjukkan bahwa kecepatan udara internal yang diprediksi adalah sangat rendah atau kurang dari 0.1m/s. Nilai ini di bawah kecepatan udara internal minimum untuk kenyamanan termal, yaitu 0.25m/s. Pengamatan pada pergerakan udara internal mengungkapkan bahwa rumah berteras dengan cerobong-surya memiliki penghawaan alami lebih besar dibandingkan rumah berteras tanpa cerobong surya, ini berlaku untuk seluruh jangkauan waktu pengamatan.



Gambar 5.32: Dampak modifikasi cerobong surya terhadap kecepatan udara dalam target kecepatan udara absolut

Tingkat kecepatan udara dan aliran udara maksimum **didapatkan pada** cerobong surya dengan panjang 3.5m, yang **menunjukkan** bahwa **penambahan panjang cerobong** surya akan meningkatkan kecepatan udara **dalam ruang** sebesar 0.22m/s. Dengan ditambahkan lebar cerobong surya, kecepatan udara dalam ruang dan dalam cerobong juga ikut meningkat. Didapati bahwa dengan lebar cerobong surya 1m, peningkatan kecepatan udara (sebesar 0.18m/s) dan **pengurangan suhu** (sebesar 0.4°C) dapat **memberikan** nilai optimal dibandingkan dengan ukuran lebar cerobong surya lainnya. Ukuran **optimum** cerobong surya (**lebar 1m, panjang 3.5m, tinggi 3.5m**) sesuai untuk diaplikasikan pada **rumah berteras** dan sebaiknya diletakkan di bagian akhir ruangan. Ukuran optimum cerobong surya dapat digunakan untuk meningkatkan kecepatan udara dalam ruangan tetapi masih **belum** cukup untuk menciptakan **pendinginan fisiologis**. **Penelitian ini berhasil menemukan modifikasi** ukuran **cerobong surya yang** sesuai dengan target kenyamanan suhu.

BAB 6

KESIMPULAN

6.1 SIMPULAN

Secara ringkas beberapa simpulan dari penelitian ini **terbagi atas enam** bagian utama yaitu **prinsip dasar atap pintar bangunan** di daerah tropis, **kenyamanan suhu pada lokasi** tertentu di Indonesia, **kondisi termal** pada contoh rumah sehat sederhana **tipe 36**, **pembuatan** model dasar atap **pintar** sebagai bagian selubung bangunan, aplikasi prototype atap **pintar** pada kasus **bangunan** dan model akhir atap **pintar** Indonesia. **Secara** rinci simpulan-simpulan diatas dapat dijelaskan sebagai berikut:

Prinsip dasar atap **pintar bangunan** di daerah tropis dapat dibagi dalam **tiga tahapan**, yaitu kecerdasan dasar, kecerdasan menengah **dan** kecerdasan lanjut. Kecerdasan dasar adalah seberapa jauh atap **bangunan mampu tanggap** terhadap iklim. Kecerdasan menengah adalah seberapa jauh atap **bangunan** dapat mengakomodasi kebutuhan pengguna. **Kecerdasan** lanjut adalah **seberapa** jauh komponen **otomatisasi** atap **bangunan** dapat diterapkan dalam menghadapi perubahan iklim yang **dinamis**

Kenyamanan suhu di daerah tropis **menurut** penelitian **terdahulu** sangat sesuai menggunakan rumus suhu netral. Berdasarkan **perhitungan** suhu netral di kasus Kota Malang maka dapat diketahui suhu nyaman adalah 24.9°C . Hasil perhitungan ini didasarkan pada suhu rerata **kondisi** iklim selama **lima** tahun terakhir. **Batas** kenyamanan suhu menurut Szokolay dapat ditambah pada 2.5°C di **atas** dan **bawah** suhu netral **sehingga batas** kenyamanan suhu di Kota Malang adalah antara 22.4°C sampai 27.4°C

Pembuatan model dasar atap **pintar** sebagai bagian utama selubung **bangunan** mencakup modifikasi ukuran, material dan tipe **dinding**. Pada **tahap** ini dilakukan dengan simulasi computer yang telah **divalidasi** dengan pengukuran lapangan. Beberapa **hasil penting** adalah prosentase **besar** bukaan yang ideal dalam penurunan suhu adalah **50-60%** dari **luasan** atap dan lantai. Material kisi atap yang baik digunakan adalah tipe aluminium. Sedangkan tipe atap optimal adalah perpaduan kisi **vertikal** dan horisontal.

Hasil model dasar **bangunan pintar** kemudian dibuat dalam bentuk

ukuran sebenarnya dan diterapkan pada kasus bangunan. Berdasarkan pengukuran lapangan didapatkan bahwa kinerja prototipe atap pintar terbuka 45" mampu menurunkan suhu maksimal sebesar 3°C. Sedangkan prototipe atap pintar tertutup dapat menghangatkan ruang di malam hari yang masih sesuai dengan kenyamanan suhu. Hasil dari kinerja prototipe atap pintar masih dapat ditingkatkan dengan mengintegrasikan prototype atap dengan selubung atap. Hasil integrasi menunjukkan adanya penurunan suhu hingga 2°C dan peningkatan kecepatan angin dalam ruang. Sehingga penelitian lanjutan di arahkan pada selubung atap bangunan utamanya cerobong surya sebagai bentuk atap pintar

Hasil analisis dan penemuan dari penelitian tentang pengaruh lebar geometri cerobong surya terhadap kecepatan aliran udara dan suhu pada bidang pengamatan untuk kenyamanan ventilasi terhadap model dasar serta pada model-model modifikasi dengan lebar 0.5m, 1m, 1.5m, dan 2m dengan orientasi timur, selatan, barat dan utara. Hasil dari kecepatan aliran udara dan suhu diplot pada grafik yang sama dengan lebar celah geometri. Lebar celah cerobong surya yang lebih dari 1m menghasilkan suatu penghalang yang menyebabkan kecepatan aliran udara dalam cerobong tidak dapat meningkat. Sehingga, cerobong dengan lebar 1m dianggap sebagai lebar yang paling optimal.

Di sisi lain target kenyamanan ventilasi juga diplot di grafik yang sama dengan lebar celah geometri cerobong surya, sehingga dapat memudahkan memahami pengaruh lebar celah geometri cerobong terhadap orientasi, tanggal dan waktu-waktu yang telah ditentukan. Pola kecepatan aliran udara mengindikasikan aliran udara horizontal mengalir dari bukaan jendela menuju ke arah cerobong melalui lubang pada plafond dengan kecepatan yang befluktuasi, tergantung pada intensitas radiasi matahari pada jam dan waktu-waktu tertentu. Hal ini masih kurang dalam mencapai target kenyamanan ventilasi, sehingga modifikasi pada cerobong surya dan ruangan diperlukan untuk meningkatkan kecepatan aliran udara dalam rangka mencapai kenyamanan ventilasi.

6.1.1 Aplikasi Cerobong Surya pada Rumah Sederhana

Hasil simulasi dari studi lapangan pada 21 Maret 2006 menunjukkan indikasi bahwa kecepatan aliran udara dalam bangunan diperkirakan sangat rendah kurang dari 0.1m/s, dibawah persyaratan kecepatan minimum untuk kenyamanan ventilasi 0.25m/s. Pengamatan pada tingkat pergerakan udara menunjukkan bahwa rumah deret dengan cerobong surya akan memiliki ventilasi alami lebih banyak dibandingkan dengan rumah deret tanpa cerobong surya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kecepatan aliran udara maksimum dicapai pada 21 Maret pukul 12:00

Tabel 6.1 Pengaruh geometri cerobong surya pada model rumah deret terhadap kecepatan aliran udara dan suhu, pada orientasi timur, tanggal 21 Maret

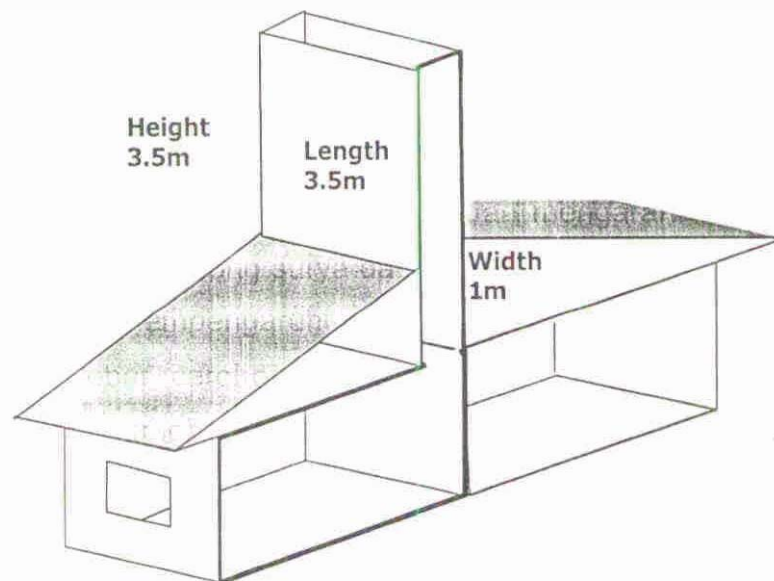
Lebar	Panjang	0.15		1.5		3.5	
		Waktu	v (m/s)	Δt (°C)	v (m/s)	Δt (°C)	v (m/s)
0.15	10.00	0.005	0.32	0.02	0.35	0.04	0.37
	12.00	0.005	0.15	0.022	0.22	0.045	0.23
	14.00	0.004	0.34	0.01	0.36	0.035	0.37
	16.00	0.005	0.05	0.012	0.09	0.04	0.15
0.5	10.00	0.007	0.32	0.055	0.36	0.1	0.38
	12.00	0.005	0.23	0.06	0.23	0.14	0.24
	14.00	0.007	0.35	0.05	0.38	0.07	0.39
	16.00	0.007	0.12	0.07	0.15	0.09	0.2
1	10.00	0.01	0.33	0.08	0.37	0.13	0.39
	12.00	0.01	0.25	0.14	0.24	0.18	0.4
	14.00	0.01	0.36	0.1	0.39	0.12	0.25
	16.00	0.01	0.13	0.11	0.15	0.14	0.2
1.5	10.00	0.015	0.27	0.11	0.32	0.14	0.37
	12.00	0.015	0.2	0.18	0.23	0.22	0.25
	14.00	0.014	0.35	0.12	0.37	0.14	0.38
	16.00	0.012	0.05	0.12	0.1	0.16	0.15
3.5	10.00	0.015	0.27	0.11	0.32	0.14	0.37
	12.00	0.015	0.2	0.18	0.23	0.22	0.25
	14.00	0.014	0.35	0.12	0.37	0.14	0.38
	16.00	0.012	0.05	0.12	0.1	0.16	0.15

Kecepatan aliran udara dan laju aliran udara maksimal diperoleh pada ukuran panjang cerobong 3.5m, yang dapat menunjukkan bahwa peningkatan ukuran panjang cerobong akan meningkatkan kecepatan aliran udara dalam ruang sebesar 0.22m/s. Sehingga dapat disimpulkan bahwa untuk mencapai

kenyamanan ventilasi diperlukan cerobong dengan dengan ukuran yang panjang.

Hubungan antara lebar cerobong surya dan kinerja kecepatan aliran udara ditentukan berdasarkan asumsi dari penurunan maksimum suhu dan induksi kecepatan aliran udara dalam ruang dan pola kecepatan aliran udara di dalam cerobong pada kondisi waktu terpilih. Sebanding dengan penambahan lebar cerobong surya, kecepatan aliran udara dalam ruang dan dalam cerobong juga meningkat.

Juga ditemukan bahwa pada lebar cerobong surya 1m, peningkatan kecepatan aliran udara sebesar 0.18m/s diikuti dengan penurunan suhu sebesar 0.4°C, memberikan hasil yang optimal. Pada lebar cerobong 1.5m kecepatan aliran udara di dalam cerobong berkurang dan mengarah turun. Dapat dilihat bahwa penggunaan cerobong surya dapat menginduksi kecepatan aliran udara dalam ruang tanpa mempengaruhi pengurangan kecepatan aliran udara dalam cerobong pada lebar cerobong sebesar 1m. oleh karena itu, penggunaan cerobong yang terlalu lebar tidak direkomendasikan. Geometri cerobong surya dengan ukurnya lebar 1m, panjang 3m dan tinggi 3.5m cocok diterapkan pada rumah deret dan diletakkan di ujung ruangan.



Gambar 6.1 Posisi cerobong surya pada model rumah sederhana

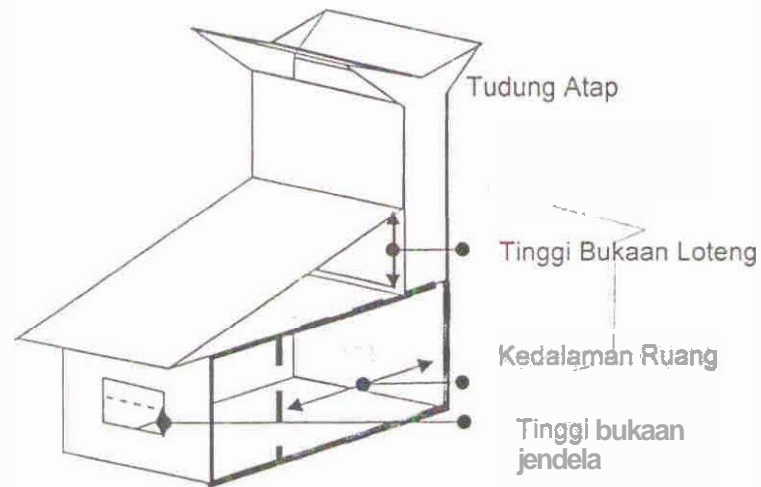
6.12 Kondisi Kinerja Optimal Penerapan Cerobong Surya pada Iklim Tropis Panas Lembab

Untuk simulasi pada kinerja iklim, lebar celah geometri yang digunakan adalah 1m. kinerja optimal tergantung pada posisi matahari dan orientasi cerobong yang terkait dengan orientasi bangunan. Bangunan dengan orientasi ke arah utara dapat mencapai kecepatan aliran udara maksimal. Sedangkan pada arah selatan, kecepatan aliran udara akan mencapai maksimal hanya pada saat matahari berada pada khatulistiwa atau sebelah selatan khatulistiwa.

Tabel 62 Ringkasan kinerja optimal pada penerapan cerobong surya di daerah tropis panas lembab

Tujuan cerobong surya	Posisi matahari	Lebar cerobong	Orientasi
Untuk meningkatkan kecepatan aliran udara	Titik Balik Utara	1m	Utara
	Titik tengah	1m	Selatan
	Titik balik selatan	1m	Selatan
Untuk menurunkan suhu	Titik Balik Utara	1m	Timur
	Titik tengah	1m	Timur
	Titik balik selatan	1m	Barat
Untuk mencapai target kenyamanan ventilasi	Titik Balik Utara	1m	Utara
	Titik tengah	1m	Selatan
	Titik balik selatan	1m	Selatan

Bangunan rumah deret pada orientasi timur menunjukkan kondisi optimal dengan penurunan suhu maksimal selama matahari berada di utara khatulistiwa dan pada saat tepat di khatulistiwa. Sebaliknya, bangunan rumah deret dengan orientasi barat akan mencapai kondisi optimal ketika posisi matahari berada di selatan khatulistiwa. Berdasarkan target kenyamanan termal pada hari-hari terpilih, diperlukan modifikasi pada bentuk geometri cerobong yang optimal untuk mencapai target tersebut. Faktor lain yang mempengaruhi kinerja cerobong surya adalah ketinggian bukaan pada area loteng yang terhubung dengan cerobong surya, penutup cerobong surya, ketinggian bukaan jendela dan kedalaman ruang.



Gambar 6.2 Modifikasi bentuk geometri optimal cerobong surya untuk mencapai kenyamanan ventilasi

6.2 SARAN

Penelitian ini cukup banyak temuan yang menunjukkan potensi dan permasalahan selubung bangunan di daerah tropis. Penelitian ini menggali aspek-aspek atap pintar sebagai bagian utama selubung bangunan. Pemilihan obyek atap didasarkan pada atap sebagai elemen bangunan yang menghubungkan antara kondisi dalam dan luar bangunan. Pada bagian akhir penelitian telah disebutkan integrasi atap dengan selubung bangunan lain dalam hal ini jendela dan atap mampu meningkatkan kinerja termal bangunan. Hal ini sesuai dengan proposal awal penelitian ini yang menyebutkan bahwa penelitian selubung pintar bangunan dilakukan dalam tiga tahap yaitu jendela pada tahun pertama, atap pada tahun kedua dan atap pada tahun ketiga. Sehingga rekomendasi penelitian untuk tahun berikutnya diusulkan penelitian tentang lansekap pintar. Hasil perpaduan antara jendela, dinding, atap dan lansekap diharapkan akan meningkatkan kinerja termal bangunan serta keterpaduan estetika desain bangunan.

BAB 7 ARTIKEL ILMIAH

Hasil penelitian telah menghasilkan 2 tulisan ilmiah untuk jurnal internasional yang pada tahap ini sedang dalam proses *review*. Berikut disampaikan abstrak dan tulisan dalam format jurnalnya.

INTERNATIONAL JOURNAL OF ACADEMIC RESEARCH

PUBLISHING HOUSE "PROGRESS"

Address: AZ1006, 4B M.Mushfig str. Apt. 107
Baku, Azerbaijan,

Tel: +994 050 531 71 84

URL: www.ijar.lit.az

www.progres.com

Email: edit@ijar.lit.az

National registration No: 2996 (from Ministry of Justice)

Print: ISSN: 2075-4124

Online: E-ISSN: 2075-7107

03.03.2011

CODE: IJAR 11528111

Paper acceptance letter

to: Agung Murti Nwgroho

Dear Author,

We are pleased to inform you that your paper entitled "A PRELIMINARY STUDY OF THERMAL ENVIRONMENT IN MALAYSIA'S TERRACED **HOUSES**" was reviewed by 2 reviewers and got positive opinion. This, paper has been accepted for publication at the peer-reviewed, indexed and abstracted "Journal of Economics and Engineering" Baku, Azerbaijan to be published in March 10, 2011.

For information: "IJAR"™ is indexed/abstracted in "Thomson Reuters" (USA), Ulrich'sWeb (USA), DOAJ (Sweden), "Scirus-Elsevier" (Netherlands), "EBSCO-Academic Search Complete" (USA), "Zentralblatt MATH" (Springer Verlag-Germany), "IndexCopernicus International" (Poland), "Genamics" (USA), "Google Scholar" (USA), "Periodiques" (France) and etc.



Publishing director

J.A. Jafarov

**JOURNAL OF ECONOMICS
AND ENGINEERING**
ISSN: 2078-0346, IJAR JEE

All rights reserved.
No part of this journal may be reprinted or
reproduced without permission in writing from
the publisher, the "Progress" Publishing Co.
www.pmqres.com

EDITOR-IN-CHIEF:

Assistant Prof. Dr. **SHAFAT ALIEV**
Azerbaijan State Economy University,
Sumgait State University,
Director of Sumgait Employment and Trade
Center, The Ministry of Trade and Social
Defense of population
(AZERBAIJAN)

MEAD CONSULTANT:

Prof. Dr. **EUGEN AXINTE**
Editor of "Materials and Design" Journal
(Elsevier),
"Gh. Asachi" Technical University of Iasi,
Faculty of Machine Manufacturing and
Industrial Management
(ROMANIA)

ADVISORY AND REVIEW BOARD:

Prof. Dr. **PHILIP HARRIS SIEGEL**
Knox School of Accounting, Hull College of
Business, Augusta State University (USA)

Prof. Dr. **MAGDY A EL-TAWIL**
Faculty of Engineering, Cairo University (EGYPT)

Dr. **I. SILVER KYARUZI**
University of Birmingham, London College
of Management Studies (ENGLAND)

Dr. **AKTHAM AL-MAGHAIREH**
Department of Economics and Finance,
United Arab Emirates University (UAE)

Dr. **MORAN WANG**,
Department of Mechanical Engineering,
Johns Hopkins University (USA)

"İqtisadiyyat və mühəndislik" Beynəlxalq Elmi Araşdırmalar Jurnalının (BEAJ) seriyalarından biridir

BEAJ (ISSN: 20754124) 2009-cu il Milli Mətbuat Günündə Azərbaycan Respublikası Ədliyyə Nazirliyi tərəfindən rəsmi Dövlət Qeydiyyatına alınıb (№ 2996). BEAJ-ın "Dil və ədəbiyyat" seriyası müstəqil şəkildə Ümumdünya ISSN Mərkəzində (Pans, Fransa) qeydiyyatdan keçərək mətbu orqan kimi ISSN: 2078-0346 nömrəsi ilə beynəlxalq nəşr statusu qazanıb.

Jurnalın bütün hüquqları "Proqres" İnternet və Poliqrafiya Xidmətləri Şirkətinə məxsusdur.

"İqtisadiyyat və mühəndislik" seriyası ABŞ-ın nüfuzlu "Academic Search Complete-EBSCO", Polşanın "indexCopernicus International", Genamics və s. elmi indeksləşdirmə bazalarına daxil edilib.

BEAJ-ın "İqtisadiyyat və mühəndislik" seriyası ilde 4 dəfə-Fevral, May, Avqust və Dekabr aylarında dərc olunur. Bütün hüquqları qorunur. Redaksiyanın yazılı icazəsi olmadan materialların təkrar nəşri, tərcümə edilərək yayılması qadağandır. Məqalələr bir qayda olaraq Beynəlxalq Redaksiya Heyətinin yekun qərarı ilə dərc olunur. Məqalələrin elektron versiyası jurnalın İnternet sahifəsində yerləşdirilir və açıq şəkildə istifadəyə verilir.

Ünvan: AZ 1006, Bakı ş. M Müşfiq 4B, 107
Veb: www.ijar.lit.az, E-məjl: edit@ijar.lit.az
Tel: +994 050 5317184

Növbəti buraxılış tarixi 26.05.2010
Materiallar toplanıb 01.01.2010-08.02.2010, Çapa imzalanıb: QS.03.2010.
Format: 62x84 1/8. Şrift: Arial. Səhifələrin sayı: 77. Məqalələrin sayı: 10.
f.ç.v. 5. liraj: 500

**CAIXA GERAL DE DEPÓSITOS (PORTUGAL) AND TECHNOLOGICA (BULGARIA):
ANALYZING COMPANIES' CORPORATE SOCIAL RESPONSIBILITY IN TWO
EUROPEAN COUNTRIES**

Desislava Yordanova, Manuel Coelho, José António Filipe, Manuel Alberto M. Ferreira

Page: 4-12

[Full text](#) (PDF, 267KB)

**THE INFLUENCE OF AUDITOR'S PROFESSIONALISM TO
TURNOVER INTENTIONS, AN EMPIRICAL STUDY ON ACCOUNTING FIRM IN
JAVA AND BALI, INDONESIA**

Dian Agustia

Page: 13-17

[Full text](#) (PDF, 220KB)

FUZZY ASSESSMENT OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

Nigar A. Abdullayeva

Page: 18-22

[Full text](#) (PDF, 226KB)

A NOTE ON PARTIAL DERIVATIVES EQUATIONS AND UTILITY FUNCTIONS

Manuel Alberto M. Ferreira, Marina Andrade

Page: 23-24

[Full text](#) (PDF, 181KB)

**A PRELIMINARY STUDY OF THERMAL ENVIRONMENT IN MALAYSIA'S
TERRACED HOUSES**

Agung Murti Nugroho

Page: 25-28

[Full text](#) (PDF, 233KB)

**A REVIEW OF THE CONTROLS ON SULFIDE SOLUBILITY IN MAGMA AND THE
FATE OF CHALCOPHILE ELEMENTS DURING MAGMA EVOLUTION**

Chima C. Ugwuegbu

Page: 29-35

[Full text](#) (PDF, 390KB)

CHAOS EFFECT IN FISHERIES MANAGEMENT

Manuel Alberto **M. Ferreira**, José António **Filipe**, Manuel Coelho, Maria Isabel **Pedro**

Page: 36-43

[Full text](#) (PDF, 288KB)

TRAFFIC MANAGEMENT OF SIGNAL INTERSECTION BASED ON MINIMIZING DISPERSION OF AIR POLLUTION IMPACT

Y.P. Devia, Lasmini A., A. K. Indriastuti

Page: 44-58

[Full text](#) (PDF, 700KB)

MATHEMATICAL MODELLING OF SPARE PARTS INVENTORY CONTROL FOR BREAKDOWN AND PREVENTIVE DEMANDS OF DIFFERENT CRITICALITY

Ugochukwu C. Okonkwo, Sam Nna Omenyi

Page: 59-65

[Full text](#) (PDF, 228KB)

"COMMONS" TRAGEDIES, AN ETHICAL ISSUE

José António Filipe, Manuel **Coelho**, Manuel Alberto M. Ferreira, Maria I. C. **Pedro**

Page: 66-69

[Full text](#) (PDF, 205KB)

THE INFLUENCE OF OWNERSHIP CONCENTRATION TO OPERATIONAL PERFORMANCE ON GO PUBLIC COMPANY IN INDONESIA

Sumiati, Dian Agustia

Page: 70-73

[Full text](#) (PDF, 1033KB)

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРЕБУЕМОГО КОЛИЧЕСТВА ЛЕГКОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ ТАКСИ И ПРАКТИКА МИРОВЫХ СТРАН В ЭТОЙ ОБЛАСТИ

Чингиз Рагимов (Chingiz Rahimov)

Page: 74-89

[Full text](#) (PDF, 392KB)

A PRELIMINARY STUDY OF THERMAL ENVIRONMENT IN MALAYSIA'S TERRACED HOUSES

Agung Murti Nugroho

Architecture Department, Faculty of Engineering, Brawijaya University, Malang (INDONESIA)
E-mail : sasimurti@yahoo.co.id

ABSTRACT

In a tropical climate, passive cooling is difficult to achieve with respect to mass housing design. A good house design keeps the indoor environment favorable and comfortable during most of the year without the use of any mechanical devices. Terraced houses are typical examples with low comfort problem that need particular consideration. Low air velocity and high air temperature are experienced during the daytime and the wind effect is not well captured especially in the single sided ventilation. Use of natural ventilation has been increasingly examined as an energy-efficient means to provide thermal comfort as well as a healthy indoor environment. This paper discusses the measurement of thermal comfort in Malaysia's single storey terraced houses. The thermal environment and comfort conditions were investigated using field measurement technique. The results indicated that the design of single storey terraced houses is not effective in providing natural ventilation for achieving thermal comfort. The microclimate condition surrounding the terraced house indicated very low wind speed. Therefore, modification of the natural ventilation mechanism needs to be manifested and evaluated.

Key words: thermal environment, thermal comfort, terraced house, natural ventilation

INTRODUCTION

The tropical humid climate, especially in Malaysia is mainly characterized by elevated temperatures and high relative air humidity. Dehumidification is one way of solving the problem of high humidity percentages with sufficient airflow through the buildings thus restoring comfort. Therefore, provision for air movement must be one of the most important considerations in building design. The air temperature and humidity combined in the enthalpy have a strong impact on perceived air quality, and perceived air quality determines the required ventilation in ventilation standard [1]. Thermal comfort can be defined as a condition of the mind, which expresses satisfaction with thermal environment [2]. In another experiment suggests air movement inside buildings need to be set between 0.1 m/s and 1.5 m/s to provide indoor thermal comfort [3]. A recent study by Griefahn et al. emphasizes that persons were less sensitive to draught when working at an increased activity level than when working at lower activity level [4]. The environmental parameters to determine thermal comfort are air temperature (T_a), mean radiant temperature (MRT), water vapour pressure (Pa) or relative humidity (RH), relative air velocity (V_r), and personal parameters, clothing or thermal resistance and activity or metabolic rate (M). However, it is reasonable to consider that all design variables are interdependent. This paper is aimed at investigating indoor thermal environment and comfort condition of a terraced house in Malaysia, based on field measurement. Air temperature and the relative humidity were selected as the main variables to determine the thermal environment. The field measurements were obtained by using the Compact Humidity Logger (CHL), and Thermal Data Logger (TDG).

Malaysia's climate is characterized by high relative humidity and air temperature. Malaysia lies between 1° and 7° North latitude and 100° and 120° East longitudes. It has two land areas: Peninsular Malaysia and East Malaysia. The present study is conducted in Peninsular as it consist 76% of the population. Most towns in the peninsular experience a seasonal climatic change dominated by the monsoons. Johor Bahru is the second largest town after Kuala Lumpur and located at the southernmost part of Peninsular. The seasonal pattern of wind and rainfall is a dominant climatic characteristic in this region. Monsoon winds occur twice a year, i.e. the Northeast and Southwest monsoon. The Southwest monsoon originates from Australia and blows over Sumatra Island and the Straits of Malacca during the months of May to September. The Northeast monsoon originates from the central Asian continent and blows across the South China Sea through Malaysia to Australia during the months of November to March. During the months of April and October, inter-monsoon winds occur. According to the meteorological data for the year 2005 in Senai, Johor Bahru, the mean monthly air temperature remains constant. This varies by only 2°C from 25°C in January to 27°C in April. The average daily air temperature is about 26.5°C throughout the year. Relative humidity varies from 75 to 85 percent. The intensity of solar radiation is 400 MJ/m² to 600 MJ/m² each month and is of high intensity during the Northeast monsoon and of low intensity during the Southwest monsoon periods. A combination of high global radiation with decreasing wind speed from February to June, which results in extremely over-heated period. During this period the mean air temperatures also indicated higher values. The property market report indicated that terraced houses accounted for approximately 57% of the total Malaysian housing stock in the year 2002 [5]. The majority of terraced houses are concentrated in Johor Bahru. Further, more than 50% of them are single storey. In order to assess the thermal environment and thermal comfort conditions, a preliminary investigation was conducted in March 2006 [6]. Therefore a typical single storey terraced house was used for the investigation in Johor Bahru, Malaysia. The terraced house layouts are parallel to the road which is 10m width and in a suburban area. The particular house used in the study is in between two terraced houses of a typical row. The typical size of the lot is about 7m in width and 20m in depth.

MATERIAL AND METHODS

The author carried out a survey to determine the environmental parameters of a typical single storey terraced house in Taman Sri Pulai housing estate, Johor Bahru on two consecutive dates from March 20th to 21st, 2006. The house comprised five rooms and was kept empty without furniture to reduce the thermal exchange between objects. The windows of the living and master bedroom are facing towards the east. The windows of the kitchen and two bedrooms face toward the west. Except for the living room, all other rooms received ventilation with single side openings. The windows have double sashes, which were retrofitted by the occupants. The window sashes (1m height, 1.5m width, and 0.2m above the floor) are fixed in the kitchen and bedrooms while the living room had a sliding window (2m height, 1m width, 0.2m above the floor). In a typical Malaysian dwelling, the windows are usually kept open during the day and closed at night in both present and traditional practice (for security). During the measurement, all doors remained closed and all windows of the house remained open. The walls and roofs are not insulated for heat transmission. The building structure consists of 150mm thick brick walls (including cement and lime plaster). The thickness of the outside and inside walls is 20cm and 15cm respectively. The total U value for the walls was about $0.5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. The instrumentation consisted of sensors with a data logger system. The sensors were setup to monitor outdoor and indoor climatic conditions. Fig. 1 shows the positions of the instrument installation within and outside the investigated house.

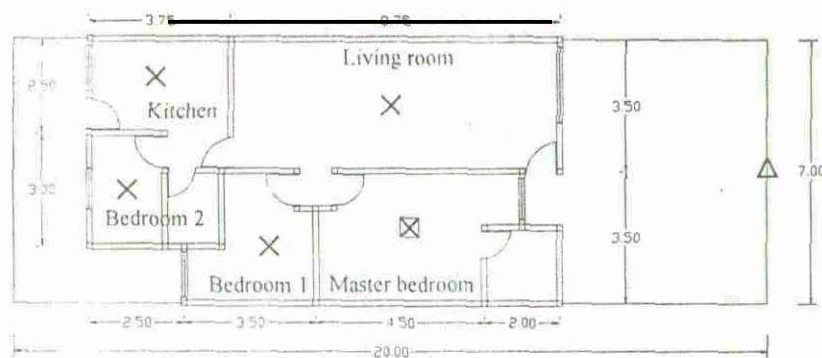


Fig.1. The positions of global weather data (Δ), compact data logger (\times), thermal data logger (\square)

Outdoor climatic conditions were collected using a globe weather station. The immediate surrounding environmental conditions were measured at 2m above the ground. Data for solar radiation, wind speed, wind direction, air temperature and relative humidity were obtained using the globe weather station. Indoor climatic conditions were collected with a thermal data logger and compact data loggers. The Inova thermal data logger obtained data on environmental parameters (air temperature, mean radiant temperature, relative humidity and wind speed), which were necessary for further thermal comfort analysis. The Dickson compact humidity loggers measured air temperature and relative humidity, which were carefully calibrated with the thermal data logger beforehand to give reliable results. The metabolic heat productions were assumed as light activity, while seated (1 met) and the clothing insulation was taken from *Oe Wall* [3] appropriate to tropical humid regions. The clothing insulation value 0.55 clo was adopted, which is a suitable value for tropical clothing. In this study, the thermal environment and thermal comfort were measured at 1.10m (human body level) above the floor where indoor air temperatures and relative humidity were observed in the four rooms (living room, bedroom 1, bedroom 2 and kitchen) and complete thermal comfort measurement in the master bedroom of the single storey building. The time step is 15 minutes for all automatic measurement. Hence, the thermal environment and the thermal comfort were investigated during 00:00h to 23:00h.

RESULTS AND DISCUSSION

Outdoor Climate Condition

Daily climatic patterns in the tropics require climate conscious building design strategies to achieve thermal comfort. Outdoor air temperature and relative humidity for 21 March 2006 are plotted in Fig 2. According to Fig. 2 the outdoor air temperature reached 31.67°C between 11:00h to 12:00h and during this period the relative humidity was at its minimum. The lowest air temperature was reported as 24.7°C at 23:00h and the average air temperature was about 26.9°C . The highest relative humidity was indicated as 97.4% at 06:00h while the lowest relative humidity, which was 65.6%, was reported at 12:00h. According to Nicol's comfort formula, the neutral air temperature needs to be maintained at 28.2°C [7]. However the data indicated that the daytime measured air temperature between 9:00h and 15:00h was above the required comfort level air temperatures except at 11:00h. Solar intensity data on 21 March 2006 emphasized 118 MJ/m^2 at 12:00 noon. This value was measured as the highest on that particular date. Daily patterns of wind speed during the daytime are between 0.1 to 0.3m/s but comparatively higher than the very low wind speed (0-0.05m/s) at night and early morning. Thus, utilization of daytime ventilation with the use of cross ventilation strategy for improving the indoor thermal comfort has an insignificant impact. The wind speed is very low during the day and night time compared to accepted comfort. During the daytime the east-west wind direction is dominant with less diversity. However, such characteristics change during late evening and early morning with low air speed.

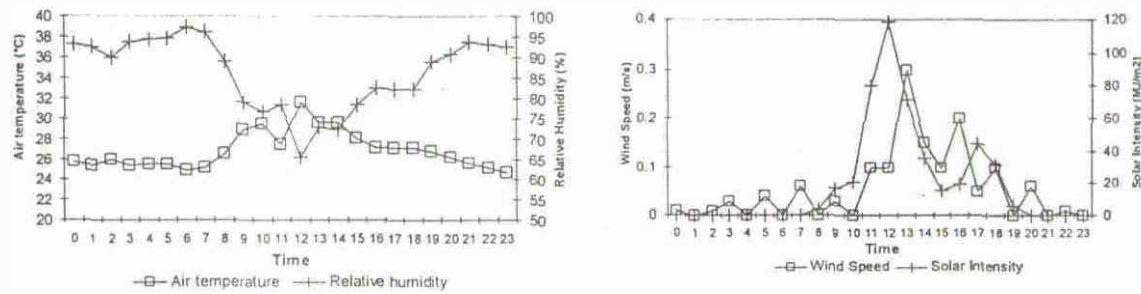


Fig. 2 Diurnal pattern of air temperature, relative humidity (right) and solar radiation, wind speed (left) (Data obtained 2m above ground, on site at the Globe Weather Station, 21 March 2006)

Indoor Thermal Environment

Using the hourly data, the relationship between indoor and outdoor temperatures of a terraced house is shown in Fig 3. The change of indoor temperature is small compared with the outdoor temperature. It is clear that the indoor temperature of the terraced houses is higher than that of the outdoors except at 12.00h. Fig. 3s indicates that the temperature in the master bedroom is higher in the morning hours and during noon hours compared to all the other rooms measured. Further, the daytime outside air temperature could be as high as 31.67°C because of the maximum solar radiation at 12:00h. During the morning and noon hours, the air temperature inside the building is almost the same as the outdoor air temperature. However, between 15.00h and 19.00h the inside air temperature is 2°–3° hotter than the outdoor air temperature. With the increase of solar radiation intensity, the indoor air temperature also increased and maintained a constant value of 30°C in the master bedroom. Further, bedroom 1 obtained an indoor air temperature of 30°C between 16:00 to 18:00 hours. This may be due to the fact that the room is oriented towards the west.

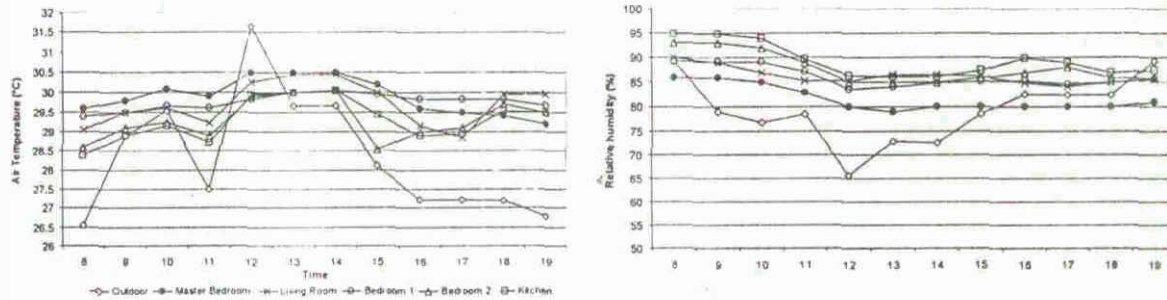


Fig. 3. Temperature (right) and relative humidity (left) measurements result (Data obtained 1.1m above the floor, 21 March 2006)

The indoor thermal environment during the investigation demonstrated a similarity profile in the hourly pattern of temperature and relative humidity. Although differences in all rooms were observed, the extent of fluctuation was 0.5°C–1°C smaller than that on the outside (0.5°C–4°C). The outside air temperature change was intense, while the inside air temperature remained stable compared to the outside. The inside air temperature was below 31°C when the outside maximum air temperature was about 32°C. Further, as Nicol's comfort formula indicates, if the average indoor temperature is 29.6°C between 8.00h and 19.00h, the particular room is above the comfort zone. However, the maximum and minimum average temperatures in the master bedroom and the kitchen are 29.9°C and 29.2°C respectively. Hence, the single day measurements (21 March 2006) indicated that the case study of a single storey terraced house is within the discomfort zone. Fig. 3 indicated that the outdoor relative humidity ratio is lower than the indoor relative humidity level during the daytime. After the inside air is heated at noon to the level of the outdoor air temperature, its relative humidity remains essentially the same for a few hours. The results emphasized the highest relative humidity in the kitchen and the lowest in the master bedroom. The lower limit of relative humidity is around 80%. The range is slightly more for conditions with no a slow air movement and decreases with higher air speeds. The relative humidity inside the kitchen fluctuated from 86% to 95%, and the master bedroom from 80% to 85%. The relative humidity of the kitchen was a little higher than that of the master bedroom. Further, the air temperature of the master bedroom exceeds by about 0.5°–1°C that of the temperature of the other room at noon. The reason may be explained by the fact that the master bedroom received solar heat in the morning, and since there is inadequate air velocity the solar heat accumulates. In this study, PMV index by Fanger is used in the Inova Thermal Data Logger equipment calculation. A complete description of the index PMV is described numerically as: cold (-3), cool (-2), slightly cool (-1), neutral (0), slightly warm (+1), warm (+2) and hot (+3). The air velocity measurements illustrate that air velocity induced flow has been established inside the room. The velocity flow inside the master bedroom could reach the values of 0–0.001m/s and were more. The PMV distribution at the height of 1.1m in the master bedroom illustrates that during the afternoon hours, the inside predicted mean vote (PMV) is noticeably lower (+0.5) than at noon (+2). The PMV was slightly warm

(between +1 to +2) in the morning, and changed to warm at noon (+2.0) when the outside temperature became high. In the afternoon the value was +0.5, which showed as a near neutral thermal comfort condition.

CONCLUSION

The aim of the study is to evaluate of thermal environment in Malaysia's Terraced House with the actual data on a selected date. The thermal environment conditions were also studied based on the climatic conditions on a selected date. The study also emphasizes that installation of a solar chimney can affect the indoor thermal condition in a hot humid climate. The field measurement investigated the thermal environment and the thermal comfort in a selected room. The thermal environment results are inadequate to provide thermal comfort, especially in the master bedroom. This study proved that low air velocity of the single side ventilation (in the case of the master bedroom) decreases the indoor thermal comfort level. The previous study shows that natural ventilation performances can be improved when ventilation is modified, by installing a solar chimney in the existing terraced houses. Therefore, further experiments are required to determine the optimum solar chimney geometry to improve natural ventilation in buildings in hot and humid tropical climates.

REFERENCES

1. Prianto, E., Maupert, P., Depecker, J.-P., Peneau (2001) "Contribution of Numerical Simulation with SOLENE to Find Out the Traditional Architecture Type of Cay — Guyana, France". *International Journal on Architecture Science, Hong Kong* 1 (4) 156 – 180.
2. Fanger, P.O. (1972) "Thermal Comfort". McGraw-Hill, New York, pp. 244
3. De Wall, H.B. (1993) "New Recommendations for Building in Tropical Climate". *Building and Environment* 28 (3) 271–285.
4. Griefahn, B., Ku'ne'ne'mund, U., Gehring, P., Mehnert, (2000) "Drafts in Odd Environments. The Significance of Air Temperature and Direction". *Industrial Health* 38, 30 – 40.
5. Kubota, T., Supian Ahmad (2005) "Wind Environment Evaluation Of Neighborhood Areas In Major Towns of Malaysia". *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 5(1), pp. 199-206.
6. Nugroho, A.M and Hamdan, M. (2006) "Evaluation of Parametrics for the Development of Vertical Solar Chimney Ventilation in Hot and Humid Climate". *The 2nd International Network For Tropical Architecture Conference*, at Christian Wacana University, Jogjakarta,
7. Humphreys, M.A, Nicol, J.F. (2001) "The Validity of ISO-PMV for Predicting Comfort Votes in Every-day Thermal Environments; Moving Thermal Comfort Standards into the 21st Century". *Windsor, UK, Loughborough University*, pp. 406 – 430.

A PRELIMINARY STUDY OF THERMAL ENVIRONMENT IN MALAYSIA'S TERRACED HOUSES

Agung Murti Nugroho

Architecture Department, Faculty of Engineering, Brawijaya University, Malang (INDONESIA)
E-mail . sasimurti@yahoo.co.id

ABSTRACT

In a tropical climate, passive cooling is difficult to achieve with respect to mass housing design. A good house design keeps the indoor environment favorable and comfortable during most of the year without the use of any mechanical devices. Terraced houses are typical examples with low comfort problem that need particular consideration. Low air velocity and high air temperature are experienced during the daytime and the hind effect is not well captured, especially in the single sided ventilation. Use of natural ventilation has been increasingly examined as an energy-efficient means to provide thermal comfort as well as a healthy indoor environment. This paper discusses the measurement of thermal comfort in Malaysia's single storey terraced houses. The thermal environment and comfort conditions were investigated using field measurement technique. The results indicated that the design of single storey terraced houses is not effective in providing natural ventilation for achieving thermal comfort. The microclimate condition surrounding the terraced house indicated very low wind speed. Therefore, modification of the natural ventilation mechanism needs to be manifested and evaluated.

Key words. Thermal environment, thermal comfort, terraced house, natural ventilation

INTRODUCTION

The tropical humid climate, especially in Malaysia is mainly characterized by elevated temperatures and high relative air humidity. Dehumidification is one way of solving the problem of high humidity percentages with sufficient airflow through the buildings thus restoring comfort. Therefore, provision for air movement must be one of the most important considerations in building design. The air temperature and humidity combined in the enthalpy have a strong impact on perceived air quality, and perceived air quality determines the required ventilation in ventilation standard [1]. Thermal comfort can be defined as a condition of the mind, which expresses satisfaction with thermal environment [2]. In another experiment suggests air movement inside buildings need to be set between 0.1m/s and 1.5 m/s to provide indoor thermal comfort [3]. A recent study by Griefahn et al. emphasizes that persons were less sensitive to draught when working at an increased activity level than when working at lower activity level [4]. The environmental parameters to determine thermal comfort are air temperature (T_a), mean radiant temperature (MRT), water vapour pressure (Pa) or relative humidity (RH), relative air velocity (V), and personal parameters: clothing or thermal resistance and activity or metabolic rate (M). However, it is reasonable to consider that all design variables are interdependent. This paper is aimed at investigating indoor thermal environment and comfort condition of a terraced house in Malaysia, based on field measurement. Air temperature and the relative humidity were selected as the main variables to determine the thermal environment. The field measurements were obtained by using the Compact Humidity Logger (CHL), and Thermal Data Logger (TDG).

Malaysia's climate is characterized by high relative humidity and air temperature. Malaysia lies between 1° and 7° North latitude and 100° and 120° East longitudes. It has two land areas; Peninsular Malaysia and East Malaysia. The present study is conducted in Peninsular as it consists 76% of the population. Most towns in the Peninsular experience a seasonal climatic change dominated by the monsoons. Johor Bahru is the second largest town after Kuala Lumpur and located at the southernmost part of Peninsular. The seasonal pattern of wind and rainfall is a dominant climatic characteristic in this region. Monsoon winds occur twice a year, i.e. the Northeast and Southwest monsoon. The Southwest monsoon originates from Australia and blows over Sumatra Island and the Straits of Malacca during the months of May to September. The Northeast monsoon originates from the central Asian continent and blows across the South China Sea through Malaysia to Australia during the months of November to March. During the months of April and October, inter-monsoon winds occur. According to the meteorological data for the year 2005 in Senai, Johor Bahru, the mean monthly air temperature remains constant. This varies by only 2°C, from 25°C in January to 27°C in April. The average daily air temperature is about 26.5°C throughout the year. Relative humidity varies from 75 to 85 percent. The intensity of solar radiation is 400 MJ/m² to 600 MJ/m² each month, and is of high intensity during the Northeast monsoon and of low intensity during the Southwest monsoon periods. A combination of high global radiation with decreasing wind speed from February to June, which results in extremely over-heated period. During this period the mean air temperatures also indicated higher values. The property market report indicated that terraced houses accounted for approximately 57% of the total Malaysian housing stock in the year 2002 [5]. The majority of terraced houses are concentrated in Johor Bahru. Further, more than 50% of them are single storey. In order to assess the thermal environment and thermal comfort conditions, a preliminary investigation was conducted in March 2006 [6]. Therefore a typical single storey terraced house was used for the investigation in Johor Bahru, Malaysia. The terraced house layouts are parallel to the road which is 10m width and in a suburban area. The particular house used in the study is in between two terraced houses of a typical row. The typical size of the lot is about 7m in width and 20m in depth.

MATERIAL AND METHODS

The author carried out a survey to determine the environmental parameters of a typical single storey terraced house in Taman Sri Pulai housing estate, Johor Bahru on two consecutive dates from March 20th to 21st, 2006. The house comprised five rooms and was kept empty without furniture to reduce the thermal exchange between objects. The windows of the living and master bedroom are facing towards the east. The windows of the kitchen and two bedrooms face toward the west. Except for the living room, all other rooms received ventilation with single side openings. The windows have double sashes, which were retrofitted by the occupants. The window sashes (4m height, 1.5m width, and 1m above the floor) are fixed in the kitchen and bedrooms while the living room had a sliding window (2m height, 1m width, 0.2m above the floor). In a typical Malaysian dwelling, the windows are usually kept open during the day and closed at night in both present and traditional practice (for security). During the measurement, all doors remained closed and all windows of the house remained open. The walls and roofs are not insulated for heat transmission. The building structure consists of 150mm thick brick walls (including cement and lime plaster). The thickness of the outside and inside walls is 20cm and 15cm respectively. The total U value for the walls was about 0.5 W/m² K. The instrumentation consisted of sensors with a data logger system. The sensors were setup to monitor outdoor and indoor climatic conditions. Fig. 1 shows the positions of the instrument installation within and outside the investigated house.

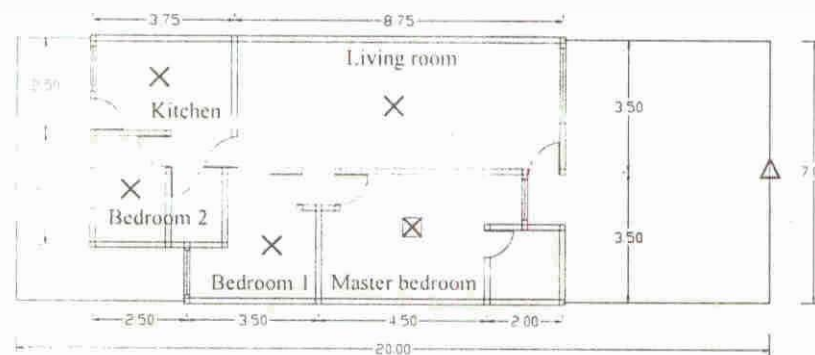


Fig. 1. The positions of global weather data (Δ), compact data logger (\times), thermal data logger (\square)

Outdoor climatic conditions were collected using a globe weather station. The immediate surrounding environmental conditions were measured at 2m above the ground. Data for solar radiation, wind speed, wind direction, air temperature and relative humidity were obtained using the globe weather station. Indoor climatic conditions were collected with a thermal data logger and compact data loggers. The Inova thermal data logger obtained data on environmental parameters (air temperature, mean radiant temperature, relative humidity and wind speed), which were necessary for further thermal comfort analysis. The Dickson compact humidity loggers measured air temperature and relative humidity, which were carefully calibrated with the thermal data logger beforehand to give reliable results. The metabolic heat productions were assumed as light activity, while seated (1 met) and the clothing insulation was taken from De Wail [3] appropriate to tropical humid regions. The clothing insulation value 0.55 clo was adopted, which is a suitable value for tropical clothing. In this study, the thermal environment and thermal comfort were measured at 1.10m (human body level) above the floor where indoor air temperatures and relative humidity were observed in the four rooms (living room, bedroom 1, bedroom 2 and kitchen); and complete thermal comfort measurement in the master bedroom of the single storey building. The time step is 15 minutes for all automatic measurement. Hence, the thermal environment and the thermal comfort were investigated during 00.00h to 23.00h.

RESULTS AND DISCUSSION

Outdoor Climate Condition

Daily climatic parameters in the tropics require climate conscious building design strategies to achieve thermal comfort. Outdoor air temperature and relative humidity for 21 March 2006 are plotted in Fig. 2. According to Fig. 2 the outdoor air temperature reached 31.67°C between 11:00h to 12:00h and during this period the relative humidity was at its minimum. The lowest air temperature was reported as 24.7°C at 23:00h and the average air temperature was about 26.9°C. The highest relative humidity was indicated as 97.4% at 06:00h while the lowest relative humidity, which was 65.6%, was reported at 12:00h. According to Nicol's comfort formula, the neutral air temperature needs to be maintained at 28.2°C [7]. However the data indicated that the daytime measured air temperature between 9:00h and 15:00h was above the required comfort level air temperatures except at 11:00h. Solar intensity data on 21 March 2006 emphasized 118 MJ/m² at 12:00 noon. This value was measured as the highest on that particular date. Daily patterns of wind speed during the daytime are between 0.1 to 0.3m/s but comparatively higher than the very low wind speed (0-0.05m/s) at night and early morning. Thus, utilization of daytime ventilation with the use of cross ventilation strategy for improving the indoor thermal comfort has an insignificant impact. The wind speed is very low during the day and night time compared to accepted comfort. During the daytime the east-west wind direction is dominant with less diversity. However, such characteristics change during late evening and early morning with low air speed.

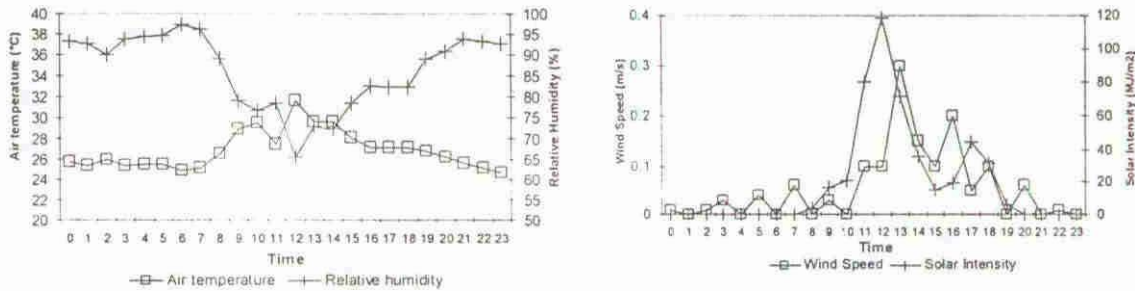


Fig. 2. Diurnal pattern of air temperature, relative humidity (right) and solar radiation, wind speed (left) (Data obtained 2m above ground, on site at Me Globe Weather Station, 21 March 2006)

Indoor Thermal Environment

Using the hourly data, the relationship between indoor and outdoor temperatures of a terraced house is shown in Fig. 3. The change of indoor temperature is small compared with the outdoor temperature. It is clear that the indoor temperature of the terraced houses is higher than that of the outdoors except at 12.00h. Fig. 3a indicates that the temperature in the master bedroom is higher in the morning hours and during noon hours compared to all the other rooms measured. Further, the daytime outside air temperature could be as high as 31.67°C because of the maximum solar radiation at 12:00h. During the morning and noon hours, the air temperature inside the building is almost the same as the outdoor air temperature. However, between 15.00h and 19.00h the inside air temperature is 2° – 3° hotter than the outdoor air temperature. With the increase of solar radiation intensity, the indoor air temperature also increased and maintained a constant value of 30°C in the master bedroom. Further, bedroom 1 obtained an indoor air temperature of 30°C between 16:00 to 18:00 hours. This may be due to the fact that the room is oriented towards the west.

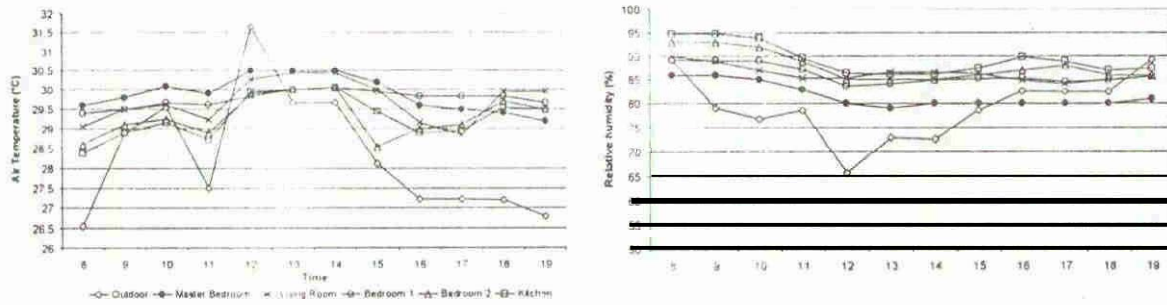


Fig. 3. Temperature (right) and relative humidity (left) measurements result (Data obtained 1.1m above the floor, 21 March 2006)

The indoor thermal environment during the investigation demonstrated a similarity profile in the hourly pattern of temperature and relative humidity. Although differences in all rooms were observed, the extent of fluctuation was 0.5°C– 1°C smaller than that on the outside (0.5°C – 4°C). The outside air temperature change was intense, while the inside air temperature remained stable compared to the outside. The inside air temperature was below 31°C when the outside maximum air temperature was about 32°C. Further, as Nicol's comfort formula indicates, if the average indoor temperature is 29.5°C between 8:00h and 19:00h, the particular room is above the 'comfort zone'. However, the maximum and minimum average temperatures in the master bedroom and the kitchen are 29.9°C and 29.2°C respectively. Hence, the single day measurement (21 March 2006) indicated that the case study of a single storey terraced house is within the discomfort zone. Fig. 3 indicated that the outdoor relative humidity ratio is lower than the indoor relative humidity level during the daytime. After the inside air is heated at noon to the level of the outdoor air temperature, its relative humidity remains essentially the same for a few hours. The results emphasized the highest relative humidity in the kitchen and the lowest in the master bedroom. The lower limit of relative humidity is around 80%. The range is slightly more for conditions with no or slow air movement and decreases with higher air speeds. The relative humidity inside the kitchen fluctuated from 85% to 95%, and the master bedroom from 80% to 85%. The relative humidity of the kitchen was a little higher than that of the master bedroom. Further, the air temperature of the master bedroom exceeds by about 0.5° = 1°C that of the temperature of the other room at noon. The reason may be explained by the fact that the master bedroom received solar heat in the morning, and since there is inadequate air velocity the solar heat accumulates. In this study, PMV index by Fanger is used in the Inova Thermal Data Logger equipment calculation. A complete description of the index PMV is described numerically as: cold (-3), cool (-2), slightly cool (-1), neutral (0), slightly warm (+1), warm (+2) and hot (+3). The air velocity measurements illustrate that air velocity induced flow has been established inside the room. The velocity flow inside the master bedroom could reach the values of 0 – 0.001m/s and even more. The PMV distribution at the height of 1.1m in the master bedroom illustrates that during the afternoon hours, the inside predicted mean vote (PMV) is noticeably lower (+0.5) than at noon (+2). The PMV was slightly warm

(between +1 to +2) in the morning, and changed to warm at noon (+2.0) when the outside temperature became high. In the afternoon the value was +0.5, which showed as a near neutral thermal comfort condition.

CONCLUSION

The aim of the study is to evaluate of thermal environment in Malaysia's Terraced House with the actual data on a selected date. The thermal environment conditions were also studied based on the climatic conditions on a selected date. The study also emphasizes that installation of a solar chimney can affect the indoor thermal condition in a hot humid climate. The field measurement investigated the thermal environment and the thermal comfort in a selected room. The thermal environment results are inadequate to provide thermal comfort, especially in the master bedroom. This study proved that low air velocity of the single side ventilation (in the case of the master bedroom) decreases the indoor thermal comfort level. The previous study shows that natural ventilation performances can be improved when ventilation is modified, by installing a solar chimney in the existing terraced houses. Therefore, further experiments are required to determine the optimum solar chimney geometry to improve natural ventilation in buildings in hot and humid tropical climates.

REFERENCES

1. Prianto, E., Houpert, P., Depecker, J.-P., Peneau (2001) "Contribution of Numerical Simulation with SOLENE to Find Out the Traditional Architecture Type of Cayenne, Guyana, France". *International Journal on Architecture Science*, Hong Kong 1 (4) 156 – 180.
2. Fanger, P.O. (1972) "Thermal Comfort". McGraw-Hill, New York, pp. 244
3. De-Wall, H.B. (1993) "New Recommendations for Building in Tropical Climate". *Building and Environment* 28 (3) 271–285.
4. Griefahn, B., Kunemund, U., Gehring, P., Mehnert. (2000) "Drafts in Cold Environments. The Significance of Air Temperature and Direction". *Industrial Health* 38, 30 – 40.
5. Kubota, T., Supien Ahmad (2005) "Wind Environment Evaluation of Neighborhood Areas in Major Towns of Malaysia". *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 5(1), pp. 199-206.
6. Nugroho, A.M. and Hamdan, M. (2006) "Evaluation of Parametrics for the Development of Vertical Solar Chimney Ventilation in Hot and Humid Climate". *The 2nd International Network For Tropical Architecture Conference*, at Christian Wacana University, Jogjakarta.
7. Humphreys, M.A., Nicol, J.F. (2001) "The Validity of ISO-PMV for Predicting Comfort Votes in Every-day Thermal Environments. Moving Thermal Comfort Standards into the 21st Century". Windsor, UK. Loughborough University, pp. 406 – 430.

The Solar Chimney Geometry for Stack Ventilation In Warm Humid Climate

Agung Murti Nugroho

Lecturer, Faculty of Engineering, Brawijaya University, Malang, Indonesia

Abstract

Natural ventilation is a well known strategy to improve indoor air velocity and reduce indoor temperature. It is the main criterion to achieve thermal comfort in terrace house in Malaysia. In hot and humid climates, one drawback of single sided ventilation is that the wind effect is not well captured, which in turn, increases the use of mechanical cooling. Therefore, it is important to understand and consider the use of solar chimney as stack induced ventilation strategy for single sided ventilation room. This study investigates the solar chimney geometry to improve indoor air velocity increment and temperature reduction in order as to achieve comfort ventilation in hot and humid climates. The experiment was carried out using natural ventilation simulation for single master bedroom in a typical single storey terrace house. The investigation is conducted using Flo-Vent 5.1, a computational fluid dynamic simulation program which has been validated by comparing its simulated result with the field measurement taken on site. The results of the experiment showed that the optimum solar chimney geometry model of 6.5m height, 3m length and 1m width gap increased the indoor air velocity to more than 30% in the simulated terrace houses compared to the field study model. This effect is significant towards improving the thermal comfort performance in terrace house through passive natural ventilation. In conclusion, the modification of the solar chimney geometry and terrace house's room such as opening of attic, chimney cap, window opening and room deep can further improve the air velocity within the targeted ventilation for thermal comfort.

Keywords: solar chimney geometry, stack ventilation, ventilation for thermal comfort

1. Introduction

Ventilation is one of the important options is providing thermal comfort in buildings (Bansal, 1994). Thus, a passive cooling system is more desirable. To reduce the mechanical cooling energy cost of new building in a hot and humid region, the design should maximize the natural ventilation and minimize the fraction of sun energy absorbed by a dwelling (Khedari J, 1997). Providing adequate natural ventilation would reduce the building cooling load in tropical areas. Two major goals in natural ventilation include provision of sufficient fresh air and satisfactory temperature. At temperatures below 34°C, which is the average temperature in many hot and humid conditions, air movement might be one of the most useful and most expensive methods to provide a comfortable indoor climate. The movement of air across human skin creates a cooling sensation caused by heat leaving the skin through convection and by the operation of perspiration. Air movement at a speed of up to

0.25 m/s can go unnoticed. The most common way to create air movement without mechanical power is to open a window and allow breezes to blow into a building. However, the problem with this simple concept is that an open window can admit dust, pollen, and dirt (Khedari J, 2000).

1.1 Stack Ventilation Strategy

One application of natural ventilation is through stack effect ventilation. One way to increment stack effect ventilation in buildings and, as a consequence, to improve indoor air quality, relies upon the use of solar energy, namely through solar induced ventilation. Ventilation provides cooling by using moving air to carry away heat from the building when the indoor temperature is above the outdoor temperature. Ventilation cooling may use air from either the interior or exterior of the building. The exterior air can be used to remove excessive heat and humidity when outdoor conditions are favorable. The indoor air circulation does not

change the interior conditions, only making them more comfortable for the building occupants. Solar chimney is one of the several available options for achieving solar-induced ventilation (Bansal, 1994). Solar chimneys are used to enhance air movement in naturally-ventilated buildings. They are similar to conventional chimneys except that the south wall is replaced by a glazing, thus enabling solar energy collection. This leads to an increase in air temperature inside the chimney channel and in the stack effect and, simultaneously, to thermal energy storage in the walls, which can be released later on during periods of small solar irradiation or night periods (Alfonso, 2000).

1.2 Solar Chimney Study

A solar chimney is a natural ventilation device, which utilizes solar radiation energy to build up stack pressure, thereby driving air flow through the chimney channel. By converting thermal energy into the kinetic energy of air movement, solar chimneys have a number of difference applications. The use of solar chimneys as ventilation devices can be found in some historical buildings, such as the so-called "Scirocco rooms" in Italy, which dated back to at least the 16th century, where the solar chimneys were used in conjunction with underground corridors and water features to provide ventilation and cooling (Di Cristofalo *et al.*, 1989). Due to the general availability of electric power in the early 20th century and the expansion of air-conditioning in the 1930s, ventilation devices driven by natural forces such as solar energy and wind force became obsolete. As a consequence, in contrast to the dramatic developments in mechanical ventilation systems up to 1980s, research and development of solar chimneys is relatively limited. During the last two decades, increasing awareness of greenhouse gas emissions and the need for effective, efficient and ecologically sound building ventilation, have led to renewed interest in solar chimneys. In recent years, a number of experimental, numerical and theoretical investigations have contributed to the current understanding of solar chimneys. In the past decade, solar chimneys have attracted much attention in various investigations. Barrozi *et al.*

(1992) modeled a solar chimney-based ventilation system for buildings. The roof of a building performed as a solar chimney to generate air flow and provide cooling for the living room. Experimental tests were carried out on a 1:12 small-scale model of the prototype. Bouchair (1994) showed that for his 1.95m high and variable width chimney which was electrically heated, the optimum ratio of chimney width/high is 1/10 for maximum air flow rate. If the chimney was too big, reverse circulation occurred whereby there was a down-ward flow. Hirunlabh *et al.* (2001) studied the performance of a metallic solar wall for natural ventilation of building in Thailand. Theoretical and experimental studies on the natural ventilation of buildings were also carried out by him for four different combinations of height and air gap. Alfonso (2003) compared the behaviour of a solar chimney with a conventional one. They presented a thermal model and transient simulation of a solar chimney by applying a finite difference model to the chimney brick wall assuming unsteady state one-dimensional heat transfer in the direction of the brick wall and not along the flow. Khedari *et al.* (2000) studied the feasibility of using roof and wall to induce ventilation. They showed a significant potential of passive solar ventilation of houses. The Roof Solar Collector could be formed below a heated roof to draw air from the inner spaces of a building. Satwiko (2005) found a Solar Wind Generated Roof Ventilation System for low cost dwellings located in high building density urban area. The roof prototype can generate evenly distributed vertical cross ventilation within the occupant's zone. Bansal *et al.* (1994) developed a steady state mathematical model for solar chimney system consisting of solar air heater connected to a conventional solar chimney. The estimated effect of the solar chimney was shown to be substantial in promoting natural ventilation for low wind speeds. Miyazi *et al.* (2005) investigated the performance of a solar chimney, which is integrated into a south façade of one-story building, as well as the effect on the heating and cooling loads of the building by using a CFD simulation and an analytical model. Present study attempts to focus on the solar chimney geometry

to assess their performance with respect to increase air velocity for target comfort ventilation by computer simulation. Thus, the above reviews suggest that solar chimney strategy on increase air velocity and decrease air temperature has been dealt as separate issues. There is no specific research done to study the relationship between solar chimney geometry and psychological cooling performance. Therefore this next research attempts to focus on the solar chimney geometry to improve stack ventilation for thermal comfort in tropical condition. The objective of this study is to improve the velocity until the absolute target air velocity is obtained. The research of the solar chimney geometry is done in three stages: first, development of solar chimney geometry (length and width or gap); second, modification of solar chimney elements (opening height, attic opening height and chimney cap) and third, modification of room elements (window opening height and room depth).

2. Methods

2.1. Research Variable

To evaluate the effect of the solar chimney geometry, various simulation tests were performed for selected day (21 March) and east orientation (existing terraced house orientation) at 12:00h. The proposed solar chimney geometry were applied terrace house model. In this stage, the proposed solar chimney models are modified physically into two modifications. The modification is by introducing length geometry and width or gap geometry. Size of length, in this study, the maximum limit of the solar chimney length is assumed as the room width (3.5m) of the selected terrace house. The other solar chimney length size as follow the basic size of window width (1.5m) and pilot testing width gap (0.15m). However, when considering the effect of chimney length, several sizes were simulated: chimney length between 0.15m, 0.5m, 1.5m and 3.5m. Size of width/gap, the width or gap of solar chimney is independent variables in this study. The width of the solar chimney are as follow of the length between 0.15m, 0.5m, 1m, 1.5m, 3.5m. The proposed solar chimney model and the modified geometry with different section will be used to investigate the objectives of the

study. Further, the characteristics of the models will be determined based on the combine of solar chimney length and width variables to be investigated and the study procedure on east orientation, four times (10.00h, 12.00h, 14.00h, 16.00h) and 21 March (Figure 1).

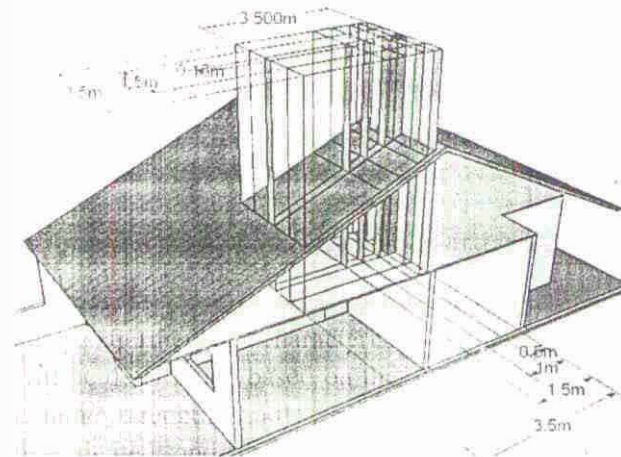


Figure 1. The combining length and width of solar chimney geometry in the terrace house

The solar chimney geometry elements modification tests were carried out for attic opening (1m, 2m, 3m) and chimney cap (introverted, extroverted, flat) at window opening 1m and room depth 5.5m. The room modification in the solar chimney includes optimum window opening (0.25m, 0.5m and 1m) and room depth (6m, 5.5m, 5m, 4m) along with the results obtained for the solar chimney modification at the same respective climate condition.

2.2. Solar Chimney Pilot Testing Measurement and Simulation

A pilot testing using one model was measured in Universiti Teknologi Malaysia (UTM), Johor Bahru on seven days from March 17th to 24th 2005. The chimney PVC pipe in the pilot testing was 3.5 meter high, 1 meter above the ground and 0.15 meter in diameter. They are supported structurally by timber framework. The model was black in colour. Data loggers were positioned at three different points and another the outdoors. The instrumentation consisted of sensors with a data logger system. The sensors were set up to monitor outdoor and indoor air temperature and humidity conditions. Figure 4 shows the positions of the instrument installation within and outside of

the PVC pipe. The time step is 15 minutes for all automatic measurement during the daytime 00.00 h to 23.00 h. Outdoor climatic conditions (solar radiation, wind speed, wind direction, air temperature and humidity) were also obtained from Senai Meteorological Station, 2005.

In the CFD simulation, the following boundary condition area is used: the material and thickness of the chimney are based on the base model, while the climatic condition is set similar to the site climatic conditions (Nugroho and Hamdan, 2003). Using the FloVent version 5.1 program, the simulation models are created directly using the drawing board window provided with this software. This is to give more accurate representation of the buildings. The sizes and the dimensions of the models involved in this simulation are similar to the pilot testing measurement. The difference between the simulation model and pilot testing is the sectional shape. The simulation consists of rectangular section while the pilot testing model consists of cylindrical shape. Like CAD software, the building created in this CFD software using 1:1 scale. The model was placed inside an overall domain solution size of 40 m x 40 m x 20 m high. The position of the model inside the overall domain solution was at 20 m from x-plane, 20 m from z-plane and 1 m from y-plane. Figure 2 shows the position of the model inside the overall domain solution. The main objective of the simulation is to estimate the air temperature inside the solar chimney model. Therefore, temperature tapping points were placed at the mid point of inlet, middle of model and outlet openings. The exact location of the monitor point determines the accuracy of the predicted internal air temperature. In this research, the major climatic variables are site, wind data or reference wind speed, wind profile, solar radiation and atmospheric boundary layer characteristics. The summary of the suburban site conditions for Johor Bahru's hot and humid climate is used in the simulation. The location of the study is UTM. The latitude is 1° 08' N and the longitude is 104° 42' E of Greenwich. The height above sea level is 37.8 m. The nearest meteorological station is located at Sultan Ismail (SI) airport known as Senai meteorological station, approximately 20 km from

Johor Bahru. The average ground characteristics of the site weather station area are considered as a combination of flat terrain and low-rise buildings. This gives the empirical exponent (α) value of 0.22, the roughness length (Z_0) value of 0.25 m and the gradient height (Z_g) value of 370 m.

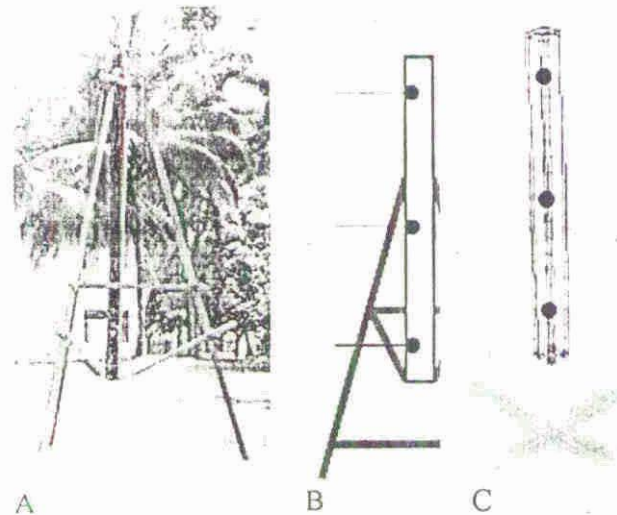


Figure 2. The solar chimney pilot testing (a), the position of data logger inside pipe (b), and the position of simulation monitor point (c)

2.3. Terraced House Measurement and Simulation

The authors carried out a survey of a typical single storey terraced house in Joyo Asri, Saxofone, Malang on two consecutive dates from September, 2010. The house was kept empty without furniture to reduce the thermal exchange between objects. The house comprised 2 rooms. The windows of the living and master bedroom are facing towards the east. Windows of the kitchen and two bedrooms are facing toward the west. A room received ventilation with single side opening. The windows have double sashes, which were retrofitted by the occupants. Two sashed windows are fixed in the kitchen and the bedrooms and the living room had a sliding window. In a typical Indonesian dwelling, the windows are usually kept opened during the day and closed at night in both present and traditional practice (for security). During the measurement all doors remained closed and all windows of the house remained opened. The walls and roofs are not insulated for heat transmission. The building structure consists of 0.15 m thick brick walls

(including cement and lime plaster). Thickness of the outside and inside walls are 0.2 m and 0.15 m, respectively. Figure 3 shows the positions of the instrument installation within and outside of the investigated house. Outdoor climatic data were collected with one global weather station. The immediate surrounding environmental conditions were measured at 2 m above the ground. The global weather station measured solar radiation, wind speed, wind direction, air temperature and humidity. Indoor climatic conditions were collected with thermal data logger and compact data loggers. The Inova thermal data logger measurement was aimed to collect data on environmental parameters (air temperature, mean radiant temperature, relative humidity and wind speed), which were necessary for Further thermal comfort analysis. The Dickson compact humidity loggers measured dry bulb temperature and relative humidity, which were carefully calibrated with the thermal data logger beforehand to give reliable results. In this study, the temperature, humidity and air velocity was measured at 1.10 m (human body level) above the floor where indoor temperatures and humidity were observed on the four rooms (living room, bedroom 1, bedroom 2 and kitchen) and complete measurement in one room (master bedroom) of single storey building. The time step is 15 minutes for all automatic measurement.

The initial conditions for simulation have been set using the climatic data from the field measurement obtained between 08.00 h to 19.00 h on 21 March 2006 (Table 1). All of the tests on five rooms were carried out by using CFD FloVent. Figure 4 show the CFD model and boundary condition. The CFD program requires inputs representing problem type, flow domain (material, type of flow, etc.), boundary conditions (walls, inlet, outlet, symmetric wall), and calculation method. The problem type is used to activate calculation modules; in this case, flow, heat transfer, and turbulence modules. The flow domain was set as (air density: 1.149 kg/m³, viscosity: 1.872E-5, specific heat: 1007 J/kg. K, conductivity: 0.02643 W/m. K, temperature: 27.6°C-32.2°C). The wind flow set at steady state, subjected to gravity of 9.8 m/s², and is turbulent. Roughness Height of the ground was set as 0.03.

Initial wind was defined at the inlet using an atmospheric boundary layer to obtain a realistic wind profile based on the exponent law (Anisley, at al. 1999). The wind speed at 2 m above ground is 0-0.2 m/s based on site Globe Weather data; The turbulent kinetic energy and energy dissipation rate were set to 0.33 and 0.48 respectively. The calculation used the standard k-ε epsilon turbulent model with 1500 iterations. To avoid convergence problems, fan relaxation I was applied. The solar radiation calculation was set to the following details (latitude: 1.8 degree, day: 21 March, solar times: 08.00 h-19.00 h).



Figure 3. The positions of global weather data (Δ), compact data Jogger (×) and thermal data logger (□)

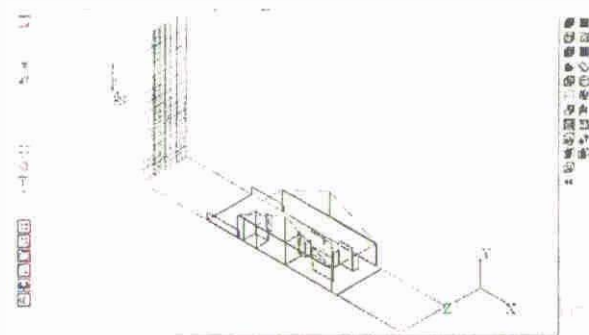


Figure 4: Terraced house model in CFD

Table 1. Field measurement input data for CFD simulation

Time	Air temp. (°C)	Humidity (%)	Wind speed (m/s)	Solar radiation (MJ/m ²)	Wind direction (°)
8	26.56	89.2	0	4.09	0
9	28.89	79	0.03	16.65	0
10	29.56	76.7	0	20.76	0
11	27.50	78.6	0.1	80.00	178
12	31.67	65.6	0.1	118.57	182
13	29.67	72.8	0.3	71.37	180
14	29.67	72.5	0.15	35.88	168
15	28.11	78.6	0.1	15.55	176
16	27.22	82.7	0.2	19.65	161
17	27.22	82.5	0.05	44.24	178
18	27.2	82.5	0.1	31.54	167
19	26.8	89.2	0	6.23	0

24. Development of Solar Chimney Geometry

Development of the basic solar chimney geometry had been undertaken for the selected climate condition (on 21 March at 12:00 h). It was simplified to provide a comparison between pilot testing and the different geometry in the same climatic conditions. The basic solar chimney geometry which are model A1 (0.15 m width, 0.15 m length same as with simplification of pilot testing pipe with 0.15 m diameter), A2 (0.3 m width, 0.15 m length), A3 (1 m width, 0.15 m length), A4 (0.15 m width, 1.5 m length), A5 (0.3 m width, 1.5 m length), A6 (1 m width, 1.5 m length), A7 (0.15 m width, 3.5 m length), A8 (0.3 m width, 3.5 m length) and A9 (1 m width, 3.5 m length). All models used aluminum as material and 3.5 m height with 0.005 m thickness. For the purpose of comparative analysis on the effect of the width and length, the basic model (A1) air velocity (v) and air flow rate (Q) values were used to determine the deviation of v and Q values at the proposed solar chimney configurations. The study indicated that the width and length of the solar chimney model are the main modification factors to achieve the maximum air velocity and air flow rate (Nugroho and Hamdan, 2006). Thus, the finding suggested several solar chimney geometry models for respective width (0.15 m, 0.3 m and 1 m) and length (0.15 m, 1.5 m and 3.5 m) variables. The selected model for performance on different conditions was determined by the air velocity and air flow rate induction. The results obtained for model A1 showed the maximum air velocity and model A9 illustrated the maximum air flow rate. Hence, it can be concluded, that for a solar chimney model, the model A1 and A9 can be used to determine the appropriate chimney geometry configurations at early design stage.

3. Results and Discussion

3.1. Pilot Testing Simulation Validation

Validation of the program was performed by comparing the measurement of pilot testing with the CFD simulation. Figure 5 shows the comparison of measurement and simulation result. It shows that the agreement between the measurement and simulation is generally good. The average difference between the measurement and simulation for ambient temperature was 0%;

for black bottom was about 3%; the maximum difference was 10% at 14:00 h in the black middle pipe. This gives confidence in using the computer code to study the air flow and temperature.

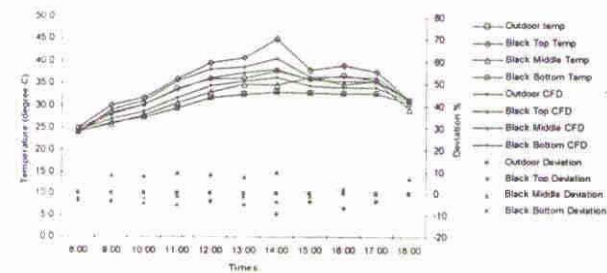
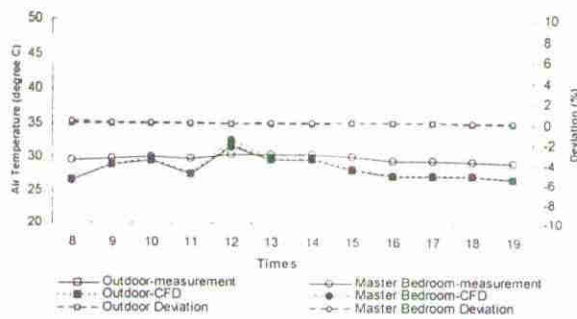


Figure 5. Comparing measurement and CFD simulation of pilot testing

3.2. Terraced House Simulation Validation

Validation of the CFD model with the field measurement results was carried out in two steps. The first step was the validation of temperatures at consecutive times and the second one was the validation of the air velocity. The purpose of this two-step validation was to find the cause of deviation between the two results. Figure 6 emphasises a good agreement between CFD simulations with the field measurement results. The difference was less than 5% for most of the calculated points on the temperature. The relative errors were less than 2% and with no difference for the ambient temperature. In those cases, the absolute differences were less than 0.4°C. In conclusion, the outdoor/ambient and indoor air temperature calculated by the CFD simulation showed a good agreement with the results of the field measurement. Figure 7 shows the plot of points for field measurement and CFD simulation airflow velocity under outdoor and indoor conditions. The figure 7 shows close agreement between measured and simulation values. Deviations are within range of 10% of the calculated air velocity. In most observations, this difference is less than 5% of the calculated values. Although there are slight differences between the results of CFD and field measurement, it can be inferred that the CFD modeling is appropriate to reproduce the phenomena occurring in the measurements. The use of the CFD model to investigate the performance of the thermal comfort ventilation thereby is validated.



Figur.6. Comparison of the temperature result between field measurement and simulation

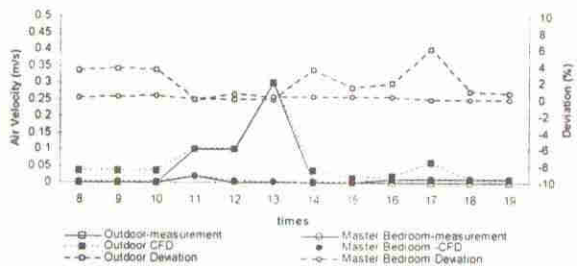


Figure 7. Comparison of the air flow velocity result between field measurement and simulation

3.3. Development of Solar chimney

The primary purpose of the solar chimney models is to use the solar radiation received by the chimney for improvement of the stack induced ventilation. The direct solar radiation incident on solar chimney were obtained at five times within general activities day hours (8:00 , 10:00, 12:00, 14:00 and 16:00 h). The average air velocity of model A1 and A9 are higher at 12:00 h than at other times on 21 March. The reason can be explained as at 12:00 h the solar irradiance is maximum (916 W/m²) even though the air velocity inside the chimney suggests a higher value. The average air velocity inside the model A1 indicated a higher value than in the model A9, on north-south orientation. The profile pattern of air velocity reduction with the increase of chimney width had a similar pattern during all three hours considered. However, the maximum amount of air velocity was received during 12:00 h. This is a clear evidence that higher amount of air velocity is produced when the sun is at higher altitudes and when the solar irradiance is the highest.

The results of the average air flow rate into the chimney showed that higher air flow rate obtained during the noon hour than in the morning and afternoon. Lower values of air flow rate in all

models were indicated at 08:00 h and 16:00 h which were caused by the lower solar intensity. Figure 8 exhibits a higher gradient curve with the increase in the width and length of chimney. This indicates that by increasing chimney section from basic model (pilot testing), it increases the total air flow rate into the chimney significantly. The average air velocity pattern on the model A1 and A9 has similar profile. However, the model A9 indicated a lower gradient profile than the model A1. The maximum air velocity was obtained during 12:00 h for model A1 (0.82 m/s). These patterns are mainly due to the effects of highest solar radiation produces maximum air velocity in all models. The results indicated that the maximum average air flow rate (2.43 m³/s) through the model A9 occurs at noon time, when the sun is at higher altitude. Model A9 illustrated different profiles of air flow rate compared to the model A1. The model A1 obtained a constant amount of air flow rate for considerable number of hours; 8:00 h to 16:00 h (for width 0.15 m). Also, the air flow rate is increased with the increase of width ratio. The chimney width of 1 m for the north-south orientation indicated 2.38 m³/s of air flow rate induction respectively compared to 0.05 m³/s of air flow rate through the chimney width of 0.15 m.

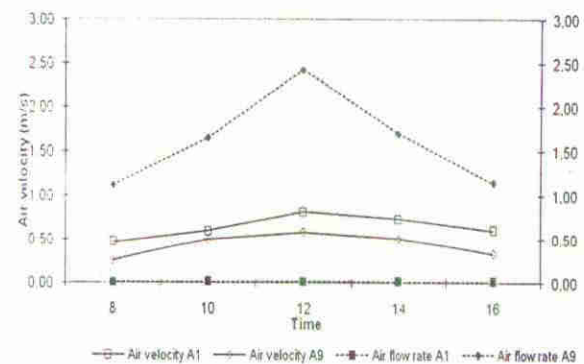


Figure 8. The air velocity and flow rate in the top, middle, bottom position of model A1 and A9 for solar times at 8:00, 10:00, 12:00, 14:00 and 16:00 h on 21 March 2005 on north-south orientation

3.4. Impact of Solar Chimney Length

A combined solar chimney length of 0.5m, 1.5m and 3.5m and chimney width gap of 1m to solar chimney height of 3.5m were experimented.

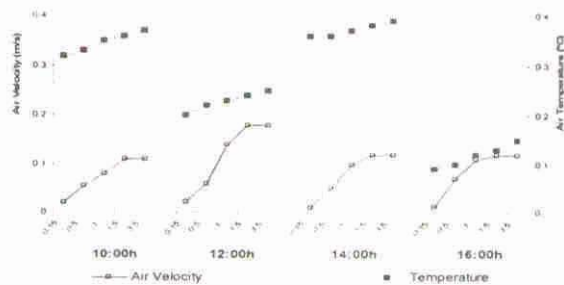


Figure 9. The air velocity and temperature in relation to the solar chimney length

From figure 9, it is clear that air velocity is higher when the length is 3.5m. Increment of length from 0.15m to 3.5m shows increase in the maximum air velocity from 0.02m/s to 0.22m/s at 12:00h. However, considering air velocity of the solar chimney, greater length chimneys are favorable. Figure 9 also shows the air temperature reduction of the solar chimney with different sizes of length. Generally, increasing the length of the solar chimney decreases the indoor air temperature, which is a consequence of the decrease in temperature different between ambient and inside of the solar chimney.

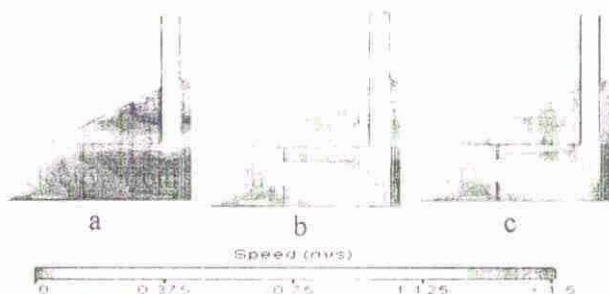


Figure 10. The air velocity contour in relation to solar chimney length (a is 0.15m, b is 1.5m and c is 3.5m)

Figure 10 demonstrates that growth rate of air velocity increases sharply when length of solar chimney becomes over 3.5m. Therefore, the size of 3.5m as the length of solar chimney is considered reasonable to obtain preferable ventilation performance. The comparison of the effect of solar chimney length for increase air velocity was also observed by Khedari *et al.*(1997) on tropical condition. Khedari *et al.*(1997) showed that the air velocity could be increased by increasing the surface area of solar

chimney or the number of units of solar chimneys on roof, east and west chimney an experimental results. Khedari *et al.*(1997) also concluded that increase in chimney length is more effective than the increase in chimney height, when one seeks to increase solar collection area in order to favour air flow rate.

3.5. Impact of Solar Chimney Width Gap

To evaluate the effect of chimney width chimney gap on reduction of indoor air temperature and air velocity, several dimensions were simulated. The chimney width or gap between 0.15m, 0.5m, 1m, 1.5m and 3.5m were used, which corresponded to chimney length 3.5m for chimney height 3.5m.

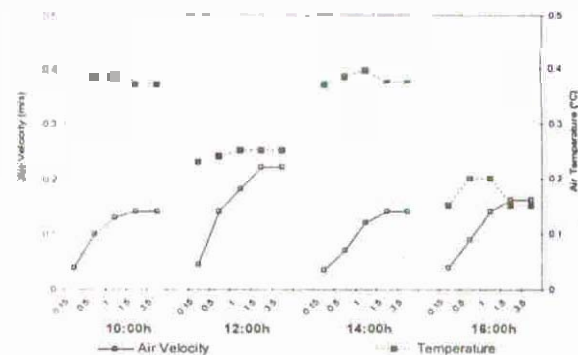


Figure 11. The air velocity and temperature in relation to the solar chimney width

Figure 11 shows the simulation results of the air velocity obtained by the solar chimney. It can be seen that the air velocity increased with increased width for correspondence length. The air velocities of about 0.8m/s at width 1m decreased until 0.55m/s at 0.5m chimney width. The air velocity generally increased as the gap width increased contrary to the present observations. Figure II shows the reduction of air temperatures at the center of the room for five different widths. It was found that the maximum indoor temperatures reduction is achieved when width gap is increased until 1m. In fact, previous research disregarded the fact that wind will remove the heat of the room to reduce the indoor temperature.

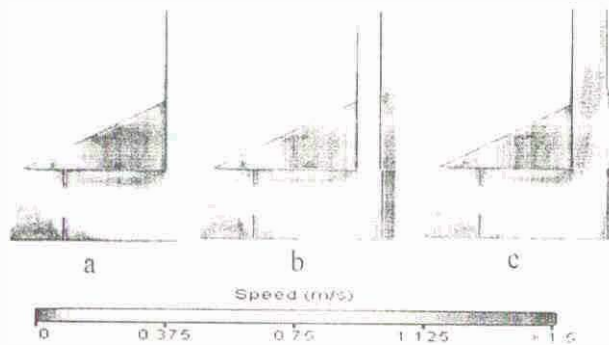


Figure 12. The air velocity contour in relation to solar chimney width (a is 0.5m, b is 1m, c is 1.5m)

Figure 12 shows the instantaneous efficiency of the solar chimney width gap. As the solar chimney width increasing until 1m, the air velocity increased without turbulence. It was found that with 1.5m and 3.5m solar chimney width gap, the air flow pattern is downward compare to 0.5m and 1m chimney width. It could be seen that the solar chimney induced the air velocity without turbulence at width between 0.5m to 1m. This showed that a solar chimney with 1m width gap provide 75% less air velocity than 1.5m width gap. Therefore, large chimney width is not recommended. It should be noted that the optimum was 1m chimney width gap. At the beginning of the present study, it was predicted that solar chimney in Malaysia has some similarity and difference with the previous study. Table 2 shows the relationship between present and previous study (Bouchair, 1994; Ong, 2003) of optimal solar chimney width or gap.

Table 2. The comparison between present and previous study of optimal solar chimney width/ gap.

Researcher	Optimum width	Chimney height	Method tool
Bouchair (1994)	0.5m	1.95m	Simulation
Ong (2003)	0.3m	1.875m	Experimental
Present	1m	3.5m	Simulation

The present result is similar to Bouchair (1994) that if the chimney was too big, reverse circulation occurred whereby there was a downward flow of air via the center of chimney. The present results showed reduction velocity in center of chimney For chimney width gap 1.5m and 2m. The different between the present result

and previous result (Bouchair, 1994 and Ong, 2003) is on the maximum chimney width gap. Bouchair (1994) showed that for solar chimney 1.95m high, the optimum ratio of chimney height/width is 10 (0.195m width or gap) for achieving maximum air flow rate. Ong (2003) showed no reverse flow was observed up to 0.3m gap For chimney 1.875m high and was able to provide 56% more ventilation than one with a 0.1m width gap. The present results showed no reverse flow for the width gap 1m on 3.5m chimney height. According to the above study, where both are in the affia of vertical solar chimney in tropical condition, the increase of the width gap far 1.5m and 2m tended to decrease the air velocity in center of chimney and reverse circulation occurred whereby there was a downward flow. However, as table 2 shows, the air velocity and air flow rate of Malaysian cases are slightly higher than the value of previous study.

3.6 Modification of Solar Chimney Elements

The height of the chimney opening attic is added to the attic height slope (the distance from the bottom of the ceiling to top roof) of the room to establish an equivalent opening attic. The average velocity in solar chimney with attic opening is higher than solar chimney without attic opening on all respective times (on 21 March). The average velocity value is increased with increase of opening attic and result with maximum velocity at 12:00h on 21 March and on east orientation. At roof opening 3 m, the velocity level reach the target level of 50% of comfort ventilation. The lowest mean velocity is at 16:00h on 21 March on east orientation. Based on above data, the relationship between heat gain of the roof and stack induced into the room is determined. It is mainly due to the higher solar heat inside the roof caused by direct sunlight received during noon hours on this day, than on other time considered. There are obvious changes in air speeds at all models, except at model with opening attic 2m and 3m. With basic model (no opening), the air speed ranges from 0.25m/s to 0.4m/s. This is lower than in the model with opening 3m where the air velocity slightly increases to 0.55m/s. The increment of air

velocity (from roof vent toward the vertical solar chimney) might be caused by the following reasons: the air under the roof surface (attic) is warmed and flows out through the roof opening connected with solar chimney. This creates a curved air movement path from the ceiling vent toward the attic. Thus, maximum air velocity is achieved for 3m chimney opening attic. Therefore, it can be assumed that the maximum velocity increment is achieved at the chimney roof opening of the same height of the roof slope.

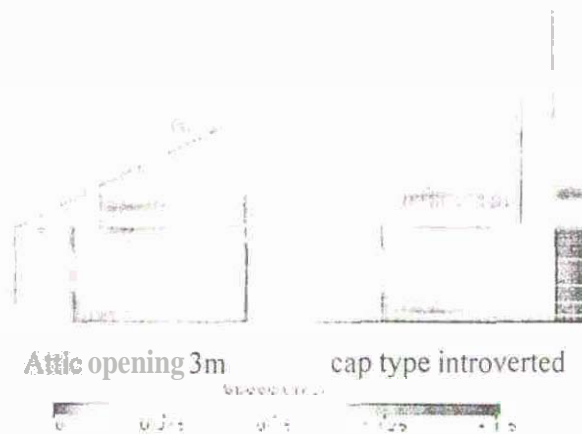


Figure 13. The air velocity contour, as a function of solar chimney attic opening and cap

The average velocity for solar chimney with cap illustrates lower value than solar chimney without cap. When the solar chimney cap is extroverted and flat, the average velocity is gradually reduced at all respective times. The mean velocity reduction obtain is until 0.05m/s for extroverted and flat cap. Constructional details of chimney cap obviously affected the aerodynamics flow. The cap obstructs the air flow on the upper chimney opening so that it could not freely develop its velocity. The result in the solar chimney cap type introverted indicate similar velocity value with the solar chimney without cap. Hence, when solar chimney cap type introverted is added to the top of solar chimney (0.75m high), it gives a total solar chimney high of 4.25 meter. The cap type introverted could eliminate the reduction of air velocity because the air flow still can freely escape below the cap.

3.7 Modification of Terrace House Elements

The air expanded immediately after entering the room through window opening. It flows

horizontally through the occupant zone before deflecting upward towards ceiling holevent. The window sill height is assuming constant an 0.9m above the floor. The speed profile shows highest speed occurred at window openings 0.5m and 0.25m. Most of the occupant zone had relatively higher speed at window opening 0.5m than 1m and 0.25m. The air speed within the room is relatively higher than that in the chimney. The air speed within the occupant zone is between 0.3m/s and 0.5m/s for window opening 0.5 m. Within the chimney, the air velocity pattern flow is directed up to the upper chimney opening for the model with window opening 1m and 0.5m.

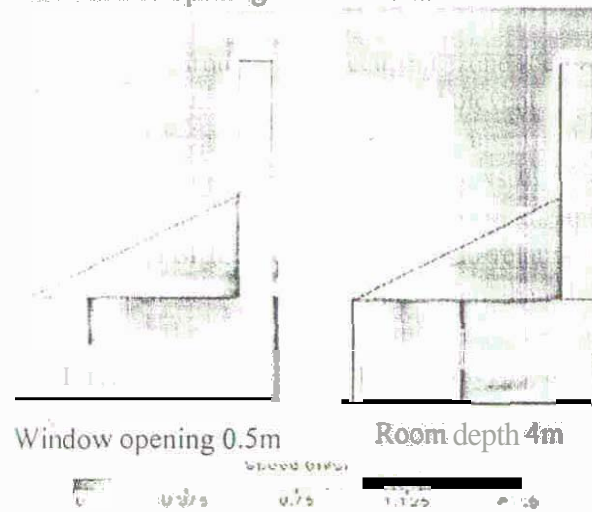


Figure 14. The air velocity contour, as a function of window opening and room depth

The average air velocity level at reference area illustrates below the target of comfort ventilation for room depth 5.5m. As the room depth decreases until 4m, the average air velocity gradually increases at reference times on 21. March on east orientation. However, with room depth 4m, it indicates the velocity value as 0.2m/s increment at reference area and is still further below the target comfort ventilation level. High air speeds occur at upper window opening and the chimney inlet or ceiling vent. Since the gap between the window opening and chimney inlet become wider more air could pass through it. The air velocity pattern in model with room depth 4m clearly shows higher air speed inside the room. The air stream under the horizontal area is directed towards the chimney inlet. This pattern is opposite trend to the situation in model with room depth 6m. The nit sped under the room depth 6m

is lower than the room depth 5.5m (basic model) and room depth 4m. This meant that reduction in room depth had successfully improved the air speed development inside the room. Most of the occupant zone is swept by air flow with a relatively high and constant speed in the room depth 4m. Figure 14 shows that the air speed in the room depth 4 m which range between 0.4m/s and 0.6m/s are close to the comfort zone.

3.8 Absolute Target Comfort Ventilation

There is major change in air velocity except around the top of the room. As in the attic opening and chimney opening, the air flows more freely through the chimney. There is no air deflection around the chimney. The new model of the chimney cap had obviously not reduced the velocity. This is to cover during rain with the cap. The air velocity is still under the influenced of the window opening and room depth.

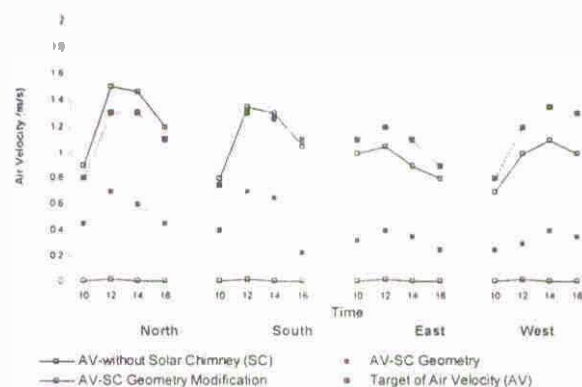


Figure 7. Impact of modification of solar chimney geometry for air velocity in absolute target air velocity

The modification of chimney and room variables illustrate an improvement of air velocity within the comfort zone, thus this is a satisfactory result. At the solar chimney geometry with chimney modification at reference area, the air movement fluctuates between 0.3 and 0.7 m/s. At the solar chimney geometry with chimney and room modification, the air speed ranges from 0.9 to 1.4 m/s. Thus, target comfort ventilation always achieved.

4 Conclusion

The simulation results of the field study on 21 March 2006 indicated that the predicted internal air velocity was very low or less than

0.1m/s. This is below the minimum internal air velocity for thermal comfort which is 0.25m/s. Observations on the internal air movement level revealed that terrace house with solar chimney had more natural ventilation than terrace house without solar chimney for all respective times. The results showed that at the maximum air velocity was achieved at 12:00 hour on 21 March 2006. The maximum air velocity and air flow rate were obtained for solar chimney length 3.5m which suggested that increasing the length of the solar chimney will increase the indoor air velocity by 0.22m/s. This indicates that for better indoor air movement, the large chimney length can improve the thermal comfort ventilation. The relationship between the solar chimney width and the air velocity performance were determined based on the assumptions of the maximum air temperature reduction and air velocity induction inside the room and air velocity pattern inside the chimney on selected conditions. As solar chimney width was increased, the air velocity inside the room and the chimney also increased. It was found that with 1m solar chimney width, the air velocity increment (0.18m/s) and together with temperature reduction (0.4°C) could provide optimal value compared to other width gaps. Also, it was found that with 1.5m width gap the air velocity inside the chimney was reduced and flowed downward. It could be seen that the solar chimney could induced air velocity without having velocity reduction inside the chimney for width less than 1m. Thus, large chimney width is not recommended. It should be noted that the optimum width gap was 1m. The solar chimney geometry (1m width, 3m length, 3.5m height) suitable to be applied on terrace house and be put at the end of the work.

The solar chimney opening height or shaft position of 1m and 2m give only a small advantage to the area of the occupant zone. It can be seen from the air velocity of chimney opening 2m and 1m that the presence of the shaft had constrained the air to flow horizontally a bit longer (compare to opening height 3 m or basic model) before it entered the chimney through the lower vent of the shaft. The attic opening contributes to the air velocity increase. Attic opening 3m shows that, the chimney connected

with attic (attic opening) had made the air within the attic escape more actively and develop a higher velocity inside the chimney and room. Thus, the modification of solar chimney using the attic opening 3m improves air velocity. The modification of chimney cap should use cap model introverted. This mean that with a cap model introverted air movement is similar with solar chimney without cap. Previous research by Satwiko (2006) also indicated that the sofa? chimney cap model introverted could be used for ventury effect if the wind condition is strong. On the other hand, the modification of solar chimney using chimney cap is good for protecting against rain.

The solar chimney variable is used to increase the air speed in the room but is still insufficient to create physiological cooling (Nugroho et al., 2007). On the other hand, the air speed generated within modification of window opening and room depth can improve the comfort ventilation. The air flow through the occupant zone could be increased with change made to the window opening height. The highest air velocity range occurred at window opening 0.5m. This is significantly good in improving air speed for target comfort ventilation. The last modification to achieves target comfort ventilation is by reducing room depth. The air velocity started deflecting upward, toward the chimney, after it traveled more than half-the width of the room. Thus, the short room depth caused the air tended to flow directly to the chimney vent.

Acknowledgement

The author would like to thank DP2M Dikti Indonesia for financially supporting this research through the Smart Envelope Building for Comfortable Housing.

References

- Alfonso, Clito (2000). *Solar Chimneys: Simulation and Experiment*. Energy and Buildings. Vol. 32, Pergamon Press, 61-79.
- Ansley, R.M. (1999). Unresolved Issues in Natural Ventilation for Thermal Comfort. Technical Paper. International One Day Forum on Natural and Hybrid Ventilation, HybVent Forum 99, Sydney, Australia.
- Bansal, N.K., Mathur, R., Bhandari M.S. (1994). A Study of Solar Chimney Assisted Wind Tower System for Natural Ventilation in Buildings, *Building and Environment*. Pergamon Press 29(4): 495-500.
- Barozzi G.S., Imbabi MS. E., Nobile E, Sousa A.C.M. (1992). Physical and Numerical dwelling of a Solar Chimney based Ventilation System for Buildings. *Building and Environment*, Vol.27, No.4, Oxford: Pergamon Press. pp.433-45.
- Bouchair (1994). Solar Chimney for Promoting Cooling Ventilation in Southern Algeria, *Building Services Engineering Research and Technology*, Vol.15, pp.81-93.
- Di Cristofalo, S., Orioli, S., Silvestrini, G., Alessandro, S., (1989). Thermal Behavior of Seizeco Rooms in Ancient Sicilian Villas, *Tunneling and Underground Space Technology*. 4: 471-473.
- Hirunlabh, J., Kongduang, W., Namprakai, P., Khedari, K. (2001). Study of Natural Ventilation of Houses by a Metallic Solar Wall under Tropical Climate. *Renewable Energy*. 18: 109-119.
- Khedari, J., Hirunlabh, J. and Bunnag, T. (1997). Experimental study of a Roof Solar Collector Toward the Natural Ventilation of New House. *Energy and Building*. 26: 159-165.
- Khedari J. (2000). Field Measurements of Performance of Roof Solar Collector, Energy and Buildings, Elsevier Science Ltd, Vol 31, pp 171-178.
- Miyazaki, T., Akisawa, A., Kashiwagi, T. (2005). The Effects of Solar Chimneys on Thermal Load Mitigation of Office Buildings under the Japanese Climate. *Renewable Energy*. 31: 987-1010.
- Nugroho, Agung Murti., Hamdan, Ahmad. (2006). The Development of Solar Chimney Prototype for Stack Ventilation in Malaysia's Single Storey Terrace House, *Architecture and Environment* Vol. 5, No. 2.
- Nugroho, Agung Murti., Hamdan, Ahmad., Ossen, Dilshan Remaz. (2007). A Preliminary Study of Thermal Comfort in Malaysia's Single Storey Terraced Houses. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*.
- Ong, K.S., Chow, C.C. (2003). Performance of a Solar Chimney, *Solar Energy*, Elsevier Science Ltd. 74:1-17.
- Satwiko, Prasasto (2005). Solar-Wind Generated Roof Ventilation System (SiVATAS) for a Warm-Humid Climate. *International Journal of Ventilation*, Vol 3 No 3.2005

DAFTAR PUSTAKA

- Abdul Malek, A. S. and Young, A (1993) "Thermal Comfort Study as an Aid to Determine Energy Savings in Building in Indonesia". ENERGEX-The 5th International Energy Conference, Seoul, Korea, 18-22 October.
- Abdul Rahman, S. and Kannan, K.S. (1997) "A Study of Thermal Comfort in Naturally Ventilated Classrooms: Toward New Indoor Temperature Standards*: Proceedings of the Asia - Pasific Conference on the Built Environment: Integrating Technology with Environment. 3-6 November.
- Albus, J.S. (1999). The engineering of mind. *Information Sciences* 117(1-2):1-18. Elsevier Science Ltd.
- Alfonso, Clito (2000). Solar Chimneys: Simulation and Experiment, *Energy and Buildings*. Vol. 32, Pergamon Press, 71-73.
- Al-Homoud, 2005, Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials, *Building and Environment* 40, pp 353-366
- Anupama Sharma, 2003, Climatic Responsive Energy Efficient Passive Techniques in Buildings, *Energy and Buildings*. Elsevier
- Auliciems, A. and Szokolay, S. (1997) "Thermal Comfort". PLEA Note 3. PLEA International / University of Queensland.
- Averill, J.R. (1973). Personal control over aversive stimuli and its relationship to stress. *Psychological Bulletin* 80:286-303. Elsevier Science Ltd.
- Azni Zain Ahmed, Sopian, K., Othman, M.Y.H., Sayigh, A.A.M and Surendran, P.N. (2002). "Daylighting as a Passive Solar Design Strategy in Tropical Buildings: A Case Study of Indonesia". *Energy Conversion and Management*. 43: 1725-1736.
- Baker, N., & Steemers, K. (2000). *Energy and Environment in Architecture - A Technical Design Guide*. London: E & FN Spon.
- Bansal, N.K, Mathur, R., Bhandari M.S. (1994). A Study of Solar Chimney Assisted Wind Tower System for Natural Ventilation in Buildings, *Building and Environment*. Pergamon Press 29(4): 495-500.
- Barlag A, Kuttler W. 1991, The significance of country breezes: for urban planning. *Energy Build* 15/16.
- Barozzi G.S., Imbabi M.S.E., Nobile E., Sousa A.C.M. (1992). Physical and Numerical modelling of a Solar Chimney-based Ventilation System for Buildings. *Building and Environment*. Oxford: Pergamon Press, 27(4): 433-45.
- Beukers, A.; van Hinte, E. (1998). *Lightness: The inevitable renaissance of minimum energy structures*. Rotterdam: 010 Publishers.
- Bouchair, A. (1994). Solar Chimney for Promoting Cooling Ventilation in Southern Algeria. *Building Services Engineering Research and Technology*. 15: 81-93.
- Bouchlaghem N. 2000. Optimizing the design of building envelopes for thermal performance. *Automation in Construction* 10(1):101-12.
- Boutet, T.S. (1987) *Controlling Air Movement: A Manual for Architects and Builders*. New York: McGraw-Hill Book Company.
- Bradshaw, Vaughn. (1993). *Building Control System*. New York: John Wiley & Sons.
- Brignell, J.E.; White, N.M. (1999). *Sensors in Adaptronics: Advanced in*

- Intelligent Sensors. In: Janocha, H. (ed.) (1999). **Adaptronics and Smart Structures: Basics, Materials, Design, and Applications**. Berlin: Springer. pp. 241-255.
- [Britannica] Encyclopædia Britannica. Available online at <<http://www.britannica.com>>.
- Burger, J.M. (1989). Negative reactions to increases in perceived personal control. *Journal of Personality and Social Psychology* 56(2):246-256. Elsevier Science
- Corrado V, Serra V, Vosilla A. 2004. Performance analysis of external shading devices. In: Proceedings of PLEA 2004, Netherlands
- de Kerckhove, D. (2001). The architecture of intelligence. Basel: Birkhäuser Verlag. Original edition: L'architettura dell'intelligenza (Universale di Architettura 98, collana fondata da Bruno Zevi; La Rivoluzione Informatica, sezione a cura di Antonino Saggio). Turin: Testo & Immagine.
- de Silva, C.W. (1995). Intelligent control: fuzzy logic applications. Boca Raton, Florida: CRC Press Inc.
- Ehrlich, C.; Papamichael, K.; Lai, J.; Revzan, K. (2002). A method for simulating the performance of photosensor-based lighting controls. *Energy and Buildings* 34:883-889. Elsevier Science Ltd.
- Elena Palomo Del Barrio, 1998. Analysis of the green roofs cooling potential in buildings, *Energy and Buildings* 27 179-193, Elsevier.
- François Garde, et al., 2004. Implementation and experimental survey of passive design specifications used in new low-cost housing under tropical climates, *Energy and Buildings* 36 (2004) 353-366, Elsevier
- Fuad H. Mallick, 1996, Thermal comfort and building design in the tropical climates, *Energy and Buildings* 23 pp 161-167.
- Garg, V.; Bansal, N.K. (2000). Smart occupancy sensors to reduce energy consumption. *Energy and Buildings* 32:81-87. Elsevier Science Ltd.
- Garg, V. (2001). Building automation and energy savings. In: Bansal, N.K.; Cook, J. (ed.) *Sustainability through building*. New Delhi: Omega Scientific Publishers. pp. 221-231.
- Gut Paul, Ackerknecht Dieter (1993). Climate Responsive Building Appropriate Building Construction in Tropical and Subtropical Regions, SKAT.
- Hagras, H.; Callaghan, V.; Colley, M.; Clarke, G. (2003). A hierarchical fuzzy-genetic multiagent architecture for intelligent buildings online learning, adaption and control. *Information Sciences* 150(1-2):33-57. Elsevier Science Ltd.
- Hayes-Roth, B. (1995). An architecture for adaptive intelligent systems. *Artificial Intelligence* 72:329-365. Elsevier Science Ltd.
- Helena Bülow-Hübe, 2001. **Energy-Efficient Window Systems: Effects on Energy Use and Daylight in Buildings**, unpublished doctoral thesis, Division of Energy and Building Design. Lund University, Lund Institute of Technology, Lund
- Hirunlabh, J., Kongduang, W., Namprakai, P., Khedari, K. (20013). Study of Natural Ventilation: of Houses by a Metallic Solar Wall under Tropical Climate. *Renewable Energy*. 18: 109-119.
- Hopkinson, R.G.; Petherbridge, P.; Longmore, J. (1966). *Daylighting*. London: Heinemann.

- IEA (international Energy Agency) (2000). Daylight in Buildings: A source book on daylighting systems and components. A report of IEA SHC Task 21 / ECBCS Annex' 29. Berkeley (USA): Lawrence Berkeley National Laboratory. LBNL-47493.
- Khedari, J., Hirunlabh, J. and Bunnag, T. (1997). Experimental study of a Roof Solar Collector Toward the Natural Ventilation of New House. *Energy and Building*. 26: 159-165.
- Khedari, J., Boonsri, B. and Hirunlabh, J. (2000). Ventilation Impact of a Solar Chimney on Indoor Temperature Fluctuation and Air Change in a School Building. *Energy and Buildings*. 32: 89-93.
- Kroner, W.M. (1997). An intelligent and responsive architecture. *Automation in Construction* 6:381-393. Elsevier Science Ltd.
- Laephakpreeda, T. (2005). Adaptive Occupancy-based Lighting Control via Grey Prediction. *Building and Environment* 40:881-886. Elsevier Science Ltd.
- Mahtia, B.N. Taufiq, Ismail, H.H. Masjuki, 2007, Correlation between thermal conductivity and the thickness of selected insulation materials for building wall, *Energy and Buildings* 39 pp 182-187
- Miyazaki, T., Akisawa, A., Kashiwagi, T. (2005). The Effects of Salar Chimneys on Thermal Load Mitigation of Office Buildings under the Japanese Climate, *Renewable Energy*.
- Majid, Abdul. 1996. Wind Driven Natural Ventilation in :High-Rise Office Building With Special Reference To The Hot-Humid Climate of 'Malaysia, University of Wales College of Cardiff, PhD, Thesis,
- Mohammad Maqsood Bajwa, 1995, The Role of Integrated Landscape Design in Energy Conservation in Detached Dwellings in The Arabian Gulf Region *Renewable Energy*, Vol. 6. No. 2, pp. 139-150
- Neumann, D. (1999). Adaptronics - a Concept for the Development of Adaptive and Multifunctional Structures. In: Janocha, H. (ed.) (1999). *Adaptronics and Smart Structures: Basics, Materials, Design, and Applications*. Berlin: Springer. pp. 5-12.
- Nugroho, A.M (2001) Simulas Lingkungan Kota, Pengaruh Tata Bangunan Terhadap Pola Aliran Udara Kawasan Sustainable Environmental Architecture 2, Diponegoro University
- Nugroho, A.M (2002) Studi eksperimenl : Penyusunan Matrik Model Bukaán atap Didasarkan Perilaku Aliran Udara dengan CFD Seminar Internasional, Proceeding, Sustainable Environment Architecture 3, Universitas Atmajaya
- Nugroho, A.M (2002) Kajian Penghawaan Alami Pada Bangunan dengan CFD (Computational Fluid Dynamics) *Journal Poltek, UNY*
- Nugroho, A.M, Djunaedi A, (2002) Simulasi Kenyamanan Termal Pengaruh Besar Kecepatan Aliran Udara Terhadap Perpindahan Panas Tubuh Manusia dengan Program Computational Fluid Dynamics *Jurnal Teknik, Unibraw*
- Nugroho, A.M, Ridwan, M. K (2002) Sistem Ventilasi pada Bangunan Pendidikan di Daerah Tropis *Simposium Internasional, Energy Efficient*
- Nugroho, A.M (2002) Simulasi Lingkungan Kota Pengaruh Tata Bangunan Terhadap Perilaku Aliran Udara Kawasan Dengan Program Computational Fluid Dynamics *Jurnal Report of Urban and Architecture*

Studies, Unibraw

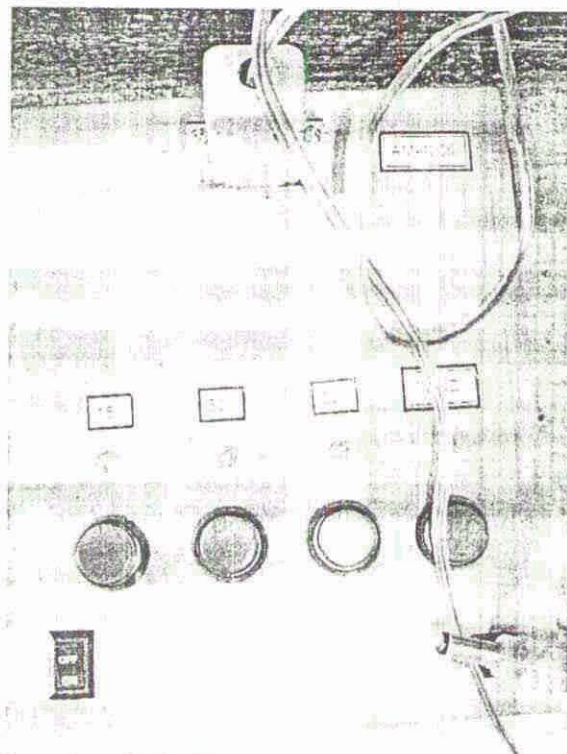
- Nugroho, A.M (2002) **Mix-Mode Ventilation System Strategy For Education Building in The Tropics** International Symposium Building Research, Tarumanagara University
- Nugroho, A.M (2003) **Perancangan Sistem Ventilasi Terpadu Pada Bangunan Pendidikan di Daerah Tropik**, Studi Kasus Perancangan Bangunan PSJK UGM Jurnal Sinektika, UMS
- Nugroho, A.M (2003) **Sun Architecture in Colonial (Indish) Building Environment Case Study: Alun-Alun Bunder Malang** The 5th International Seminar on Sustainable Environmental Architecture, Jakarta
- Nugroho, A.M, Hamdan A, (2005) **Possibility to Use Solar Induced Ventilation Strategies in Tropical Conditions by CFD simulation** The 6th International Seminar on Sustainable Environmental Architecture, ITB
- Nugroho, A.M, Hamdan A, (2005) **Towards Development of Tropical Solar Architecture: The Use of Solar Chimney as Stack Induced Ventilation Strategy** World Renewable Energy Regional Congress and Exhibition
- Nugroho, A.M. Hamdan A, (2006) **The Development of Vertical Solar Chimney Prototype for Stack Ventilation in Malaysia's Single Storey Terraced House** Architecture & Environment Vol. 5, No. 2, Oct 2006: 81-92 ITS
- Nugroho, A.M, Hamdan A, (2006) **Possibility to Use Solar Chimney to Improve Stack Ventilation in Tropical Climate** Jurnal Alam Bina, UTM
- Nugroho, A.M, Hamdan A, (2006) **The Optimum Solar Chimney Geometry for Stack Ventilation in Malaysian Condition** The 7th International Seminar on Sustainable Environmental Architecture, UNHAS
- Nugroho, A.M., Hamdan A, (2006) **Evaluation of Parametrics for the Development of Vertical Solar Chimney Ventilation in HE and Humid Climate** The 2nd International Network for Tropical Architecture Conference
- Nugroho, A.M, Hamdan A, (2006) **Natural Ventilation Performance of Standard School Design in Malaysia** The 2nd International Network for Tropical Architecture Conference
- Nugroho, A.M, Hamdan A, (2007) **The Preliminary Study of Thermal Comfort in Malaysia's Single Storey Terraced House** Journal of Asian Architecture and Building Engineering
- Nugroho, A.M, Hamdan A, (2007) **The Modification of Optimum Solar Chimney Geometry to Achieve Target Comfort Ventilation in Malaysian Condition** The 8th International Seminar on Sustainable Environmental Architecture, Petra University
- Nugroho, A.M, (2007) **The Use of CFD Simulation as Design Tool for Development, Evaluation and Prediction of Natural Ventilation** International Seminar of CFD, UGM
- Nugroho, A.M, (2008) **The Modification of Opening Tropical Design Principle**, 8th International Seminar on Sustainable Environmental Architecture, UiTM, Malaysia
- Parker, 1981, **A comparative analysis of the role of various landscape elements in passive cooling in warm humid environments**. Proc. Int. Passive and Hybrid Coding Conf., Miami Beach, FL, U.S.A.

- Parker, D. S., Chandra, S., Barkaszi, S. F. and Beal, D. J. 1995, Measured cooling energy savings from reflective roofing systems in Florida: field and laboratory results, In *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings VI*, p. 489.
- Piaget, J. (1967). *The psychology of intelligence*. London: Routledge & Kegan Paul Limited. 5th edition. Translated from the French by Piercy, M. (1st French edition in 1947; 1st English edition in 1950).
- Oléron, P. (1969). Intellectual activities. In Fraisse, P.; Piaget, J. (eds.) (1969). *Experimental psychology - its scope and method*. Vol. VII. *Intelligence*. London: Routledge & Kegan Paul Limited. Translated by SurrIDGE, T. (1st edition in French in 1963). pp. 11-84.
- Østberg, B. (2003). 101 RISP. Oslo (Norway): Emilia.
- Prianto, P. Depecker. 2003. Optimization of architectural design elements in tropical humid region with thermal comfort approach, *Energy and Buildings* 35 pp 273–280
- Rajeh, M. (1988) "Natural Ventilation in Terrace Housing of Indonesia : Effect of Air Well on Air Flow and Air Velocity". University of Queensland, Master Thesis.
- Rosangela Tenorio, 2002, Dual Mode Cooling House in The Warm Humid Tropics, *solar energy* vol. 73, no. 1, pp. 43–57.
- Satwiko, P. (1998). *Traditional Residential Architecture Designs and Thermal Comfort—a Study Using a Computational Fluid Dynamics Program to Explore, Analyse, and Learn from the Traditional Designs for Thermal Comfort*. unpublished Doctor of Philosophy Thesis. School of Architecture, Victoria University of Wellington.
- Satwiko, P. (2005). Solar-Wind Generated Roof Ventilation System (SIVATAS) for a Warm-humid Climate. *International Journal of Ventilation*. 3(3).
- Shannon, C.E.; Weaver, W. (1963). *The mathematical theory of communication*. Urbana: University of Illinois Press. (First edition: 1949).
- Selkowitz, S.E. (1999). High performance glazing systems: architectural opportunities for the 21st century. Lawrence Berkeley National Laboratory Report No. 43332. Presented at the Glass Processing Days Conference. Tampere, Finland.
- Wang Liping, Wong Nyuk Mien, 2007, The impacts of ventilation strategies and facade on indoor thermal environment for naturally ventilated residential buildings in Singapore, *Building and Environment*
- [Webster] Merriam-Webster Online Dictionary. Available online at &http://www.webster.com>.
- Wigginton, M.; Harris, J. (2002). *Intelligent skins*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Wiley, H. (1997). A fuzzy approach to daylight-responsive lighting controls. A presentation to the IEA Task 21 Experts Meeting. Brisbane. October.

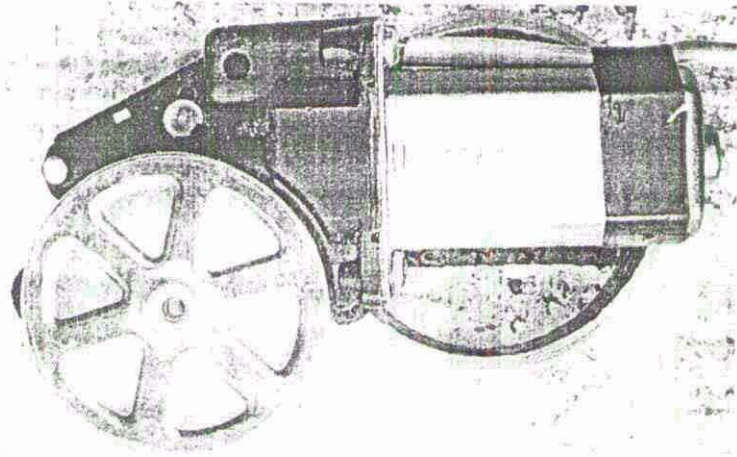
DAFTAR LAMPIRAN



Gambar L.1: Model Atap Pintar yang dipasang pada Kasus Bangunan



Gambar L.2: Tombol Motorik Atap Pintar



Gambar L.3: Motor *Power Window* yang dipasang pada Atap Pintar

2038



CERTIFICATE



is awarded to

Agung Murti Nugroho

for outstanding performance as

The Best Paper Presenter

Paper Title:

“Passive cooling performance of a ventilated roof application in tropical terrace house”

The 2nd International Conference on Sustainable Future for Human Security - Sustain 2011
on 8-10 October 2011, at Kihada Hall, Uji Campus, Kyoto University, Japan

130805.1



Prof. Junichi Mori

Yulianto P. Prihatmaji

Chairman

2nd International Conference on Sustainable Future for Human Security, Kyoto University, Japan