



TESIS - RA 142541

**PENGARUH *VENTILATION SHAFT* TERHADAP
ALIRAN UDARA DI DALAM BANGUNAN
APARTEMEN DI SURABAYA**

M. RIZAL FAHMI
3214204005

Dosen Pembimbing
Dr. Ima Defiana, ST, MT
Ir. I Gusti Ngurah Antaryama, Ph. D

Program Magister
Bidang Keahlian Arsitektur Lingkungan
Departemen Arsitektur
Fakultas Arsitektur, Desain dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
2018



THESIS - RA 142541

**EFFECT OF VENTILATION SHAFT TO THE
AIR FLOW INSIDE APARTMENT BUILDING
IN SURABAYA**

M. RIZAL FAHMI
3214204005

Supervisor
Dr. Ima Defiana, ST, MT
Ir. I Gusti Ngurah Antaryama, Ph. D

Master Program
Environmental Architecture
Architecture Department
Faculty of Architecture, Design and Planning
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
2018

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Magister Teknik (MT)

Di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

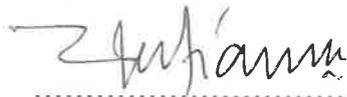
M. Rizal Fahmi

NRP. 3214204005

Tanggal Ujian : 12 Agustus 2017

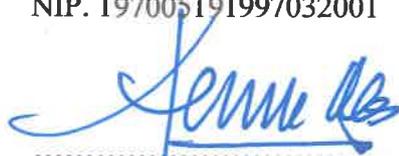
Periode Wisuda : Maret 2018

Disetujui oleh :



1. Dr. Ima Defiana ST, MT
NIP. 197005191997032001

(Pembimbing I)



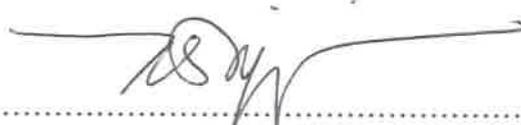
2. Ir. I Gusti Ngurah Antaryama, Ph.D.
NIP. 196804251992101001

(Pembimbing II)



3. Dr-Eng. Ir. Dipl-Ing. Sri Nastiti N.E, MT
NIP. 196111291986012001

(Penguji I)



4. Ir. Purwanita Setijanti, MSc, PhD
NIP. 195307171980032001

(Penguji II)



Fakultas Arsitektur Desain dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dekan

Ir. Purwanita Setijanti, MSc, PhD
NIP. 195904271985032001

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Saya, yang bertandatangan di bawah ini :

Nama : M. Rizal Fahmi

NRP : 3214204005

Program Studi : Magister (S2)

Jurusan : Arsitektur

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan tesis saya dengan judul :

Pengaruh *Ventilation Shaft* Terhadap Aliran Udara di Dalam Bangunan Apartemen di Surabaya

Adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 8 November 2017



M. Rizal Fahmi
NRP: 3214204005

PENGARUH *VENTILATION SHAFT* TERHADAP ALIRAN UDARA DI DALAM BANGUNAN APARTEMEN DI SURABAYA

Mahasiswa Nama : M. Rizal Fahmi
Mahasiswa ID : 3214204005
Pembimbing : Dr. Ima Defiana, ST., MT.
Co-Supervisor : Ir. I Gusti Ngurah Antaryama, Ph.D.

ABSTRAK

Salah satu cara untuk mengurangi konsumsi energi listrik pada bangunan apartemen adalah dengan mengurangi tingkat penggunaan AC dan menerapkan penghawaan alami sebagai strategi penghawaan alternatif. Penerapan ventilasi silang sebagai mekanisme penghawaan alami yang ideal pada bangunan apartemen yang memiliki desain yang kompak menjadi sulit diterapkan karena umumnya unit-unit apartemen pada bangunan tersebut hanya memiliki satu sisi yang terhubung ke luar.

Salah satu strategi yang diusulkan untuk menciptakan ventilasi silang pada bangunan apartemen adalah dengan menggunakan *ventilation shaft* yang berfungsi untuk menciptakan perbedaan tekanan angin antara *inlet* yang menghadap ke arah datangnya angin yang memiliki tekanan bersifat positif dengan *outlet* di atap bangunan yang memiliki tekanan bersifat negatif. Meski demikian, sistem *ventilation shaft* yang terhubung dengan beberapa lantai sekaligus memiliki permasalahan berupa sulitnya menciptakan aliran udara yang seragam pada lantai-lantai tersebut.

Penelitian ini menggunakan unsur eksperimen yang dilakukan dengan menggunakan bantuan simulasi CFD. Bangunan apartemen yang menjadi obyek penelitian dimodelkan dan dimodifikasi, kemudian disimulasikan menggunakan komputer. Eksperimen yang dilakukan adalah mengubah-ubah letak ketinggian model sistem *ventilation shaft* pada bangunan, ukuran *shaft*, konfigurasi dan kemiringan bukaan yang menghubungkan ruangan dengan *shaft*, arah angin, serta jumlah lantai yang terhubung dengan sistem *ventilation shaft* tersebut.

Hasil yang diperoleh dari eksperimen menunjukkan bahwa kombinasi antara konfigurasi lubang internal yang semakin membesar dari lantai atas ke lantai bawah dan jumlah lantai yang terhubung dengan sistem *ventilation shaft* sebanyak 3 lantai, serta kemiringan bukaan yang menghubungkan ruangan dengan *shaft*, dapat meningkatkan keseragaman distribusi aliran sebesar 41% hingga 81%. Perubahan letak ketinggian model sistem *ventilation shaft* pada bangunan, pengurangan ukuran *shaft* dan perubahan arah angin dapat mengurangi tingkat keseragaman distribusi aliran sebesar 50% hingga 222%.

Kata Kunci: distribusi, penghawaan alami, ventilasi silang

Halaman ini sengaja dikosongkan

EFFECTS OF VENTILATION *SHAFT* ON AIR FLOW INSIDE APARTMENT BUILDING IN SURABAYA

Student Name : M. Rizal Fahmi
Student ID : 3214204005
Supervisor : Dr. Ima Defiana, ST., MT.
Co-Supervisor : Ir. I Gusti Ngurah Antaryama, Ph.D.

ABSTRACT

Electrical energy consumption in apartment buildings can be lowered by reducing the level of air conditioning use and applying natural ventilation as an alternative ventilation strategy. Cross ventilation is an ideal mechanism to provide natural ventilation in a building. Unfortunately, it is difficult to apply cross ventilation strategy in an apartment building which has a compact design. Cross ventilation mechanism requires an inlet opening and outlet opening in different wall sides. Most apartment units have only one side which is connected to the outdoor environment, therefore cross ventilation strategy can not be applied.

Single sided rooms can be connected to an outlet opening at the roof through a ventilation shaft. Such configuration can provide a ventilation mechanism which is similar to cross ventilation. Pressure difference between the area around the inlet opening at the windward facade and the outlet opening at the roof can force the air to flow through the room. However, if the ventilation shaft is connected to multiple rooms, it would be difficult to provide a uniform air flow distribution to each room.

The experiment is carried out by Computational Fluid Dynamics or CFD. Tests are performed based on variables such as the height or vertical position of models in the building, ventilation shaft size, ventilation shaft aperture configuration and slope, wind direction and the number of rooms connected to the system. Simulation results show that the combination of opening size variation and the number of rooms connected to the shaft, and the slope of internal opening can increase the uniformity of air flow distribution by 41% to 81%. Vertical position or the height decrease of the ventilation shaft system and reduction in ventilation shaft's size can result in decrease of air flow distribution uniformity by 50% to 222%.

Keywords: distribution, natural ventilation, cross ventilation

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur, penulis mengucapkan terima kasih kepada Allah SWT , atas segala limpahan rahmat dan kasih sayang-Nya sehingga penulis berkesempatan untuk menyelesaikan pendidikan magister.

Penulis juga mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada :

1. Yang terhormat Dr. Ima Defiana ST. MT dan Ir. I Gusti Ngurah Antaryama, Ph.D selaku pembimbing atas bimbingannya.
2. Yang terhormat Dr-Eng. Ir. Dipl-Ing. Sri Nastiti N.E, MT dan Ir. Purwanita Setijanti M.Sc, Ph.D selaku penguji yang telah memberikan saran-saran yang sangat membantu penulis.
3. Kepada Ayah dan Ibu yang selalu memberikan dukungan dalam segala hal.
4. Kepada Sita, Sopul, Faiz dan Mbak Maria.
5. Kepada Grup Kontrakan dan Keluarga Lab Sains, untuk bantuan, dukungan, dan semangat yang diberikan.
6. Kontributor lainnya yang tidak dapat disebutkan satu per satu, terima kasih atas bantuan dan dukungannya kepada penulis dalam menyelesaikan penelitian ini.

Dukungan, bantuan, semangat, dan bimbingan yang diberikan oleh mereka akan selalu berguna bagi penulis untuk kedepannya. Penulis juga menyadari bahwasanya dalam penelitian ini masih terdapat banyak kekurangan. Namun penulis harus tetap mendalami kembali dan juga tentunya membutuhkan kritik dan saran. Semoga penelitian ini dapat menjadi ilmu dan pengetahuan bagi pembaca.

Surabaya, 12 Oktober 2017

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN	v
ABSTRAK	vii
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL.....	xxi
BAB 1. PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Permasalahan	7
1.3. Tujuan Penelitian	9
1.4. Manfaat	9
1.5. Batasan Penelitian.....	10
BAB 2. KAJIAN PUSTAKA	
2.1. Definisi dan Peran Ventilasi Alami	11
2.2. Mekanisme Ventilasi Alami.....	12
2.2.1 <i>Stack Effect Ventilation</i>	12
2.2.2 <i>Wind Forced Ventilation</i>	13
2.3. Aliran Angin di Daerah Perkotaan.....	18
2.4. Aliran Udara Pada Bangunan Tinggi.....	20
2.5. Aliran Udara di Dalam Bangunan.....	24
2.6. Bangunan Apartemen.....	29
2.7. Sistem Ventilasi Pada Bangunan Apartemen.....	32
2.7.1 Ventilasi Alami pada Bangunan Apartemen.....	33
2.8. <i>Ventilation shaft</i>	35
2.9. Percabangan <i>Ventilation shaft</i>	38
2.9.1 <i>Manifolds</i>	38
2.10. Sintesa Kajian Pustaka	44
BAB 3. METODE PENELITIAN	
3.1. Metode Penelitian	49
3.2. Variabel Penelitian.....	51
3.3. Populasi dan Sampel Penelitian	54
3.4. Pengumpulan Data	61
3.4.1 Jenis Data	61
3.4.2 Teknik Pengumpulan Data.....	62
3.5. Tahapan Penelitian.....	63
3.5.1 Tahap Perumusan Masalah	63
3.5.2 Tahap Kajian Pustaka	63
3.5.3 Tahap Dokumentasi Data.....	64
3.5.4 Tahap Pengumpulan dan Pengolahan Data.....	64

3.5.5 Tahap Simulasi	64
3.5.6 Tahap Analisis Hasil dan Kesimpulan	65
3.6. Rancangan Eksperimen	65
3.6.1 Model Dasar	65
3.6.2 Pembagian Kelompok Eksperimen Berdasarkan Variabel Ketinggian.....	67
3.6.3 Variasi Luas Penampang <i>Shaft</i>	71
3.6.4 Variasi Konfigurasi Luas <i>Inlet</i> dan <i>Bukaan Internal</i>	73
3.6.5 Variasi Orientasi Angin.....	75
3.6.6 Variasi kemiringan lubang internal dan elemen pengarah	75
3.6.7 Penetapan grup kontrol.....	76
3.6.8 Rancangan eksperimen model kombinasi 3 lantai dengan konfigurasi bukaan internal.....	77
3.6.9 <i>Meshing</i>	79
3.6.10 <i>Solving</i>	81
3.7. Rancangan Analisis	83
BAB 4. HASIL PENELITIAN	
4.1. Analisis Data Iklim Surabaya.....	85
4.2. Kinerja <i>ventilation shaft</i> dalam menghasilkan efek pendinginan fisiologis oleh angin dan pemerataan kecepatan aliran udara	87
4.2.1 Kinerja model <i>base case</i> (H1S1).....	89
4.2.2 Kinerja ventilasi model H2S1 dan H3S1	92
4.2.3 Kinerja ventilasi model H1S2	96
4.2.4 Kinerja ventilasi model H1B2 dan H1B3.....	98
4.2.5 Kinerja ventilasi model H1W2 dan H1W3	101
4.2.6 Kinerja ventilasi model H1T2	103
4.2.7 Kinerja ventilasi model K1-K6	105
4.3. Perbandingan kinerja	111
4.3.1 Perbandingan kinerja ventilasi model H2S1 dan H3S1 dengan model H1S1	111
4.3.2 Perbandingan kinerja model H1S2 dengan model H1S1	113
4.3.3 Perbandingan kinerja ventilasi model H1B2 dan H1B3 dengan model H1S1	115
4.3.4 Perbandingan kinerja ventilasi model H1W2 dan H1W3 dengan model H1S1	117
4.3.5 Perbandingan kinerja ventilasi model H1T2 dengan model H1S1	119
4.3.6 Perbandingan kinerja ventilasi model K1-K6 dengan model H1S1	120
4.4. Pengaruh ketinggian dan elemen desain terhadap distribusi aliran udara yang dihasilkan.....	122
4.4.1 Distribusi aliran udara pada model H1S1.....	122
4.4.2 Distribusi aliran udara pada model H2S1 dan H3S1.....	124
4.4.3 Distribusi aliran udara pada model H1S2.....	125

4.4.4	Distribusi aliran udara pada model H1B2 dan H1B3	126
4.4.5	Distribusi aliran udara pada model H1W2 dan H1W3	127
4.4.6	Distribusi aliran udara pada model H1T2.....	128
4.4.7	Distribusi aliran udara pada model K1-K6.....	129
4.4.8	Analisis kinerja model H1S1 dan pengaruh ketinggian model terhadap distribusi aliran udara	130
4.4.9	Pengaruh konfigurasi bukaan, ukuran <i>shaft</i> , dan jumlah lantai yang terhubung dengan <i>shaft</i> terhadap distribusi aliran udara	136
4.4.10	Pengaruh kemiringan lubang internal dan elemen pengarah terhadap distribusi aliran udara	142
4.4.11	Pengaruh orientasi angin terhadap distribusi aliran udara	145
4.5.	Rangkuman analisa penelitian	147
4.5.1	Kinerja <i>ventilation shaft</i> dalam menciptakan efek pendinginan fisiologis oleh angin	147
4.5.2	Pengaruh ketinggian dan elemen desain <i>ventilation shaft</i> terhadap distribusi aliran udara	152
BAB 5. KESIMPULAN		
5.1.	Kesimpulan	157
5.2.	Kinerja <i>ventilation shaft</i> dalam menghasilkan efek pendinginan	157
5.3.	Pengaruh ketinggian dan elemen desain <i>ventilation shaft</i> terhadap distribusi aliran udara.....	160
5.4.	Konsep sistem <i>ventilation shaft</i> untuk meningkatkan efek pendinginan serta distribusi aliran udara yang seragam	162
5.5.	Saran.....	163
DAFTAR PUSTAKA		165
BIODATA.....		167

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Contoh Tipe Unit dan <i>Layout</i> Apartemen di Surabaya	1
Gambar 1.2	<i>Layout</i> Bangunan Apartemen Dengan <i>Ventilation shaft</i>	3
Gambar 1.3	Ilustrasi sistem <i>ventilation shaft</i>	5
Gambar 2.1	Prinsip <i>stack effect</i> pada bangunan.....	12
Gambar 2.2	Pengaruh ukuran bukaan <i>inlet</i> dan <i>outlet</i> pada ventilasi silang dengan arah angin tegak lurus	15
Gambar 2.3	Pengaruh ukuran bukaan <i>inlet</i> dan <i>outlet</i> pada ventilasi silang dengan arah angin menyudut	16
Gambar 2.4	Grafik gradien angin pada kondisi topografi berbeda-beda.....	18
Gambar 2.5	Pemisahan aliran angin menjadi <i>layer-layer</i> di sekeliling bangunan...21	
Gambar 2.6	Aliran angin di sekeliling bangunan secara 3D.....	21
Gambar 2.7	Aliran angin di sekeliling bangunan <i>high-rise</i>	22
Gambar 2.8	Cp rata-rata pada permukaan bangunan <i>high-rise</i>	23
Gambar 2.9	Aliran angin di dalam bangunan yang dipengaruhi posisi lubang <i>inlet</i> dan tekanan di permukaan dinding luar.....	25
Gambar 2.10	Aliran angin di dalam ruangan pada bangunan <i>high-rise</i>	26
Gambar 2.11	Tipe Apartemen Berdasarkan Letak Koridornya	29
Gambar 2.12	Tipe Apartemen Berdasarkan Letak Koridornya Secara Horizontal ...	30
Gambar 2.13	Jalur Angin Yang Memanfaatkan Area Koridor	34
Gambar 2.14	<i>Layout</i> bangunan <i>hypothetical</i> yang digunakan dan Posisi Penempatan <i>Ventilation Shaft</i> Pada Unit apartemen	36
Gambar 2.15	Perbandingan Tingkat Penetrasi Angin pada Ruang Tanpa <i>Ventilation Shaft</i> dan Ruang Dengan <i>Ventilation Shaft</i>	37
Gambar 2.16	Tipe-tipe <i>manifolds</i>	39
Gambar 2.17	Aliran fluida pada pembelokan pipa	43
Gambar 3.1	Ilustrasi orientasi bangunan terhadap arah kedatangan angin.....	53
Gambar 3.2	Foto bangunan dan denah bangunan apartemen Puncak Kertajaya	54
Gambar 3.3	Foto bangunan dan ilustrasi bentuk bangunan dari atas apartemen Gunawangsa Manyar.....	55
Gambar 3.4	Foto bangunan dan denah bangunan apartemen East Coast	56
Gambar 3.5	Foto bangunan apartemen Puncak Marina dan ilustrasi jenis koridor <i>tower</i>	56
Gambar 3.6	Foto bangunan dan denah bangunan apartemen Metropolis.....	57
Gambar 3.7	Foto bangunan dan denah bangunan apartemen Dian Regency.....	58
Gambar 3.8	Foto bangunan dan denah bangunan apartemen Purimas	58
Gambar 3.9	Foto bangunan dan potongan bangunan apartemen Trillium.....	59
Gambar 3.10	Foto bangunan dan denah bangunan apartemen DePapilio	60
Gambar 3.11	Denah tipikal apartemen yang DePapilio.....	65
Gambar 3.12	Denah tipikal unit apartemen yang diuji dan model eksisting	66
Gambar 3.13	Ilustrasi besaran <i>domain</i>	67
Gambar 3.14	Ilustrasi penentuan kelompok-kelompok ketinggian berdasarkan	

<i>wind gradient</i> dan teori tentang <i>stagnation point</i>	68
Gambar 3.15 Gambar tampak pada kelompok-kelompok ketinggian.....	69
Gambar 3.16 Potongan bangunan pada masing-masing kelompok ketinggian.....	70
Gambar 3.17 Detail variasi untuk variabel luas penampang <i>shaft</i>	71
Gambar 3.18 Posisi <i>ventilation shaft</i> terhadap koridor bangunan.....	72
Gambar 3.19 Detail variasi untuk variabel bukaan	74
Gambar 3.20 Detail variasi untuk variabel orientasi angin	75
Gambar 3.21 Detail variasi untuk variabel kemiringan bukaan internal.....	76
Gambar 3.22 Detail model K1-K6	78
Gambar 3.23 Diagram keseluruhan model-model eksperimen	79
Gambar 3.24 Detail setting pada tahap <i>meshing</i>	80
Gambar 3.25 Detail <i>general setting</i> pada <i>problem setup</i>	81
Gambar 3.26 Detail <i>setting</i> untuk model perhitungan.....	82
Gambar 4.1 Denah titik pengukuran kecepatan angin.....	87
Gambar 4.2 Detail denah model H1S1	89
Gambar 4.3 Detail konfigurasi bukaan pada model H1S1	89
Gambar 4.4 Grafik kecepatan aliran udara model H1S1.....	90
Gambar 4.5 Lantai-lantai yang diamati pada tiap kelompok ketinggian.....	92
Gambar 4.6 Grafik kecepatan aliran udara model H2S1	93
Gambar 4.7 Grafik kecepatan aliran udara model H3S1	95
Gambar 4.8 Perbedaan ukuran <i>shaft</i> antara model H1S1 dan H1S2.....	96
Gambar 4.9 Grafik kecepatan aliran udara model H1S2.....	96
Gambar 4.10 Grafik kecepatan aliran udara model H1B2	98
Gambar 4.11 Grafik kecepatan aliran udara model H1B3	100
Gambar 4.12 Grafik kecepatan aliran udara model H1W2	101
Gambar 4.13 Grafik kecepatan aliran udara model H1W3	102
Gambar 4.14 <i>Treatment</i> pada model H1T2.....	103
Gambar 4.15 Grafik kecepatan aliran udara model H1T2.....	104
Gambar 4.16 Detail model K1-K6	105
Gambar 4.17 Grafik kecepatan aliran udara model K1	106
Gambar 4.18 Grafik kecepatan aliran udara model K2 dan K3	107
Gambar 4.19 Grafik kecepatan aliran udara pada model K4, K5 dan K6.....	108
Gambar 4.20 Kontur dan vektor kecepatan aliran udara lantai 29 (model K2).....	110
Gambar 4.21 Grafik perbandingan kecepatan aliran udara rata-rata pada model H1S1, H2S1 dan H3S1	111
Gambar 4.22 Grafik perbandingan kecepatan aliran udara rata-rata pada model H1S1 dan H1S2.....	114
Gambar 4.23 Kontur tekanan udara secara vertikal pada model H1S1.....	131
Gambar 4.24 Perbandingan kecepatan aliran udara rata-rata (V_r) dan debit aliran udara (Q) pada model H1S1.....	132
Gambar 4.25 Kontur tekanan pada model H1S1, H2S1 dan H3S2.....	133
Gambar 4.26 Kontur tekanan pada model K2 dan K6	134
Gambar 4.27 Debit aliran udara pada model K1-K6.....	135
Gambar 4.28 Perbandingan kontur kecepatan aliran udara di lantai 33 pada	

model <i>base case</i> (H1S1), H1B2 dan H1B3	138
Gambar 4.29 Perbandingan debit aliran pada model <i>base case</i> (H1S1), H1B2 dan H1B3 serta model K1-K6	139
Gambar 4.30 Perbandingan aliran udara di dalam <i>shaft</i> model H1S1 dan H1T2	142
Gambar 4.31 Detail perbandingan aliran udara di dalam <i>shaft</i> model H1S1 dan H1T2	142
Gambar 4.32 Perbandingan vektor kecepatan aliran udara dengan kecepatan tinggi (lantai 33) dan kecepatan rendah (lantai 29)	145
Gambar 4.33 Perbandingan kontur tekanan pada orientasi 0° (H1S1) dan 45° (H1W2)	145
Gambar 4.34 Kontur tekanan pada orientasi angin 90° (H1W3)	146
Gambar 5.1 Diagram konsep sistem <i>ventilation shaft</i>	162

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Pengaruh ukuran bukaan <i>inlet</i> dan <i>outlet</i> pada ventilasi silang dengan arah angin tegak lurus	15
Tabel 2.2	Pengaruh ukuran bukaan <i>inlet</i> dan <i>outlet</i> pada ventilasi silang dengan arah angin menyudut	16
Tabel 2.3	Nilai gradien ketinggian, z_0 , eksponen <i>power law</i> α , β , dan panjang kekasaran z_0	19
Tabel 2.4	Tipe-tipe jendela beserta karakteristiknya	27
Tabel 3.1	Detail ukuran <i>shaft</i>	72
Tabel 4.1	Data iklim tahun 2014 untuk wilayah Surabaya	85
Tabel 4.2	Konversi kecepatan angin <i>freestream</i> menjadi kecepatan angin lokal	86
Tabel 4.3	Perbandingan kecepatan aliran udara di tiap lantai model H1S1.....	91
Tabel 4.4	Perbandingan kecepatan aliran udara di tiap lantai model H2S1.....	93
Tabel 4.5	Perbandingan kecepatan aliran udara di tiap lantai model H3S1.....	94
Tabel 4.6	Perbandingan kecepatan aliran udara di tiap lantai model H1S2.....	97
Tabel 4.7	Perbandingan kecepatan aliran udara di tiap lantai model H1B2	98
Tabel 4.8	Perbandingan kecepatan aliran udara di tiap lantai model H1B3	100
Tabel 4.9	Perbandingan kecepatan aliran udara di tiap lantai model H1W3	102
Tabel 4.10	Perbandingan kecepatan aliran udara di tiap lantai model H1T2	104
Tabel 4.11	Perbandingan kecepatan aliran udara model H1S1, H2S1 dan H3S1.....	111
Tabel 4.12	Lantai A-F sebagai perwakilan untuk tiap lantai pada model H1S1, H2S1 dan H3S1	112
Tabel 4.13	Perbandingan jumlah titik yang memenuhi kriteria efek pendinginan fisiologis oleh angin pada model H1S1, H2S1 dan H3S1	113
Tabel 4.14	Perbandingan kecepatan aliran udara pada model H1S1 dan H1S2	113
Tabel 4.15	Perbandingan jumlah titik yang memenuhi kriteria efek pendinginan fisiologis oleh angin pada model H1S1 dan H1S2.....	114
Tabel 4.16	Perbandingan kecepatan aliran udara pada model H1S1, H1B2 dan H1B3	115
Tabel 4.17	Perbandingan jumlah titik yang memenuhi kriteria efek pendinginan fisiologis oleh angin pada model H1S1, H1B2 dan H1B3.....	116
Tabel 4.18	Perbandingan kecepatan aliran udara pada model H1S1, H1W2 dan H1W3	117
Tabel 4.19	Perbandingan jumlah titik yang memenuhi kriteria efek pendinginan fisiologis oleh angin pada model H1S1, H1W2 dan H1W3	118
Tabel 4.20	Perbandingan kecepatan aliran udara pada model H1S1 dan H1T2.....	119
Tabel 4.21	Perbandingan jumlah titik yang memenuhi kriteria efek pendinginan fisiologis oleh angin pada model H1S1 dan H1T2	119

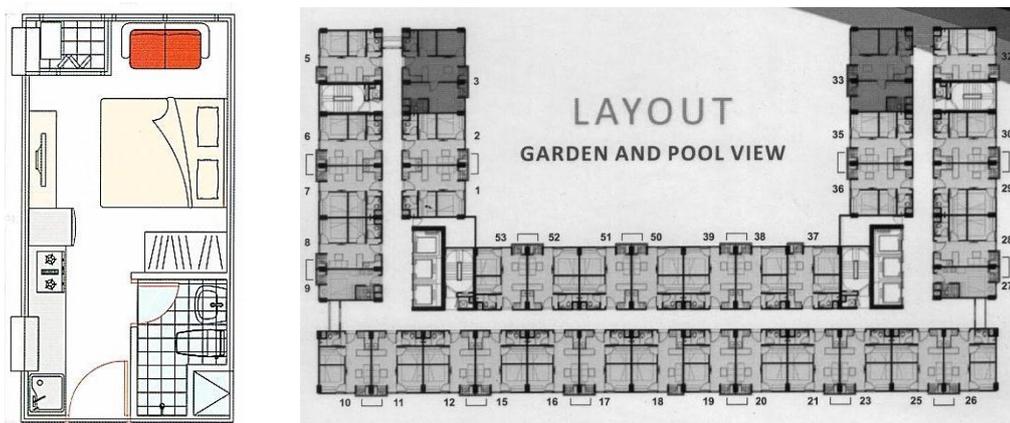
Tabel 4.22 Perbandingan persentase kecepatan aliran udara di dalam ruangan dengan kecepatan <i>input</i> simulasi pada model H1S1 dan K1-K6.....	120
Tabel 4.23 Debit aliran udara pada model H1S1	123
Tabel 4.24 Perbandingan debit aliran udara pada model H1S1, H2S1 dan H3S1	124
Tabel 4.25 Perbandingan debit aliran udara pada model H1S1, H1S2	125
Tabel 4.26 Perbandingan debit aliran udara pada model H1S1, H1B2 dan H1B3....	126
Tabel 4.27 Perbandingan debit aliran udara pada model H1S1, H1W2 dan H1W3.....	127
Tabel 4.28 Perbandingan debit aliran udara pada model H1S1 dan H1T2	128
Tabel 4.29 Perbandingan debit aliran udara pada model H1S1 dan K1-K6.....	129
Tabel 4.30 Rangkuman jumlah titik yang memenuhi kriteria efek pendinginan fisiologis oleh angin pada seluruh model yang diamati	148
Tabel 4.31 Rangkuman kecepatan aliran udara rata-rata (m/s) yang dihasilkan pada seluruh model yang diamati	151
Tabel 4.32 Debit aliran udara (m ³ /s) yang dihasilkan pada seluruh model yang diamati	153

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Salah satu cara untuk mengurangi konsumsi energi listrik pada bangunan apartemen adalah mengurangi penggunaan penyejuk udara dan menerapkan penghawaan alami sebagai strategi penghawaan alternatif. Namun pada kenyataannya, penghawaan alami sangat jarang digunakan pada apartemen. Hal ini disebabkan oleh adanya kecepatan angin yang cukup tinggi pada lantai-lantai paling atas apartemen yang berpotensi menimbulkan ketidaknyamanan. Oleh karena itu perlu suatu strategi penghawaan alami yang efektif dan nyaman agar dapat digunakan sebagai strategi penghawaan alternatif dan mampu mengurangi konsumsi energi listrik.



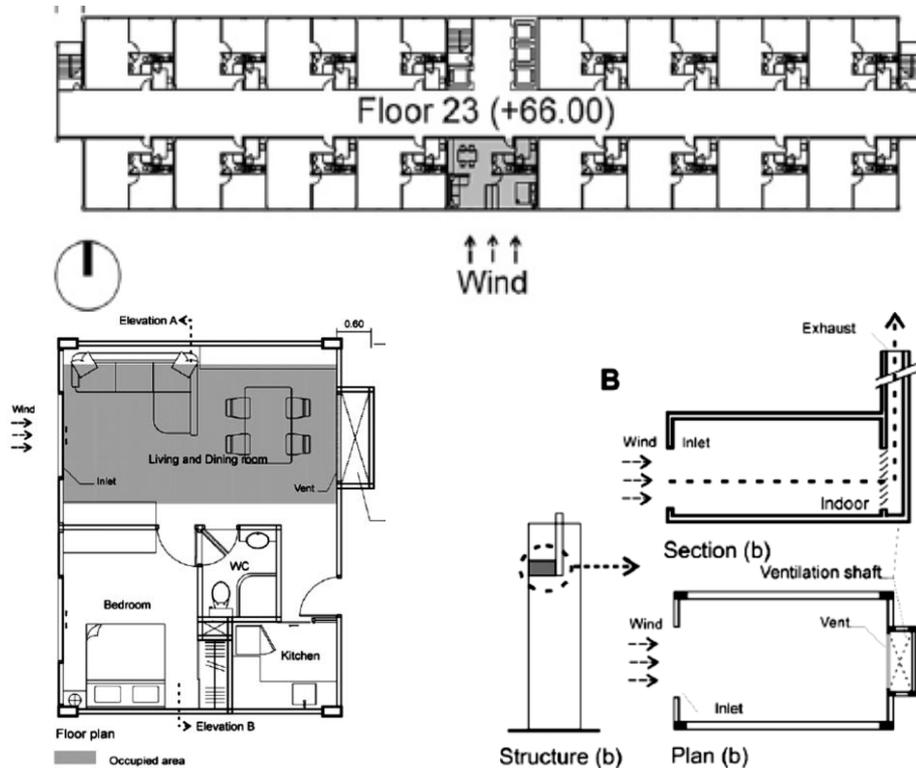
Gambar 1.1 Contoh Tipe Unit dan Layout Apartemen di Surabaya (www.rwbdg.com, 2015)

Penghawaan alami yang dapat diterapkan pada sebagian besar bangunan apartemen saat ini adalah ventilasi satu sisi atau *one-sided ventilation*. Hal ini disebabkan oleh layout bangunan apartemen umumnya memiliki desain yang kompak dengan dua barisan unit apartemen pada sisi-sisi panjang bangunan yang dipisahkan area sirkulasi di antaranya. Sebagian besar unit apartemen hanya memiliki satu sisi dinding ke arah luar yang dapat digunakan sebagai lubang ventilasi. Meski demikian, *one-sided ventilation* masih kurang efektif apabila

dibandingkan dengan ventilasi silang. Hal ini sesuai yang disebutkan oleh Mumovic (2009) bahwa *one-sided ventilation* hanya efektif sampai 2,5 kali tinggi ruangan, sementara *cross ventilation* efektif sampai 5 kali tinggi ruangan. Berdasarkan hal tersebut dapat diasumsikan bahwa ventilasi silang adalah 2 kali lebih efektif daripada ventilasi satu sisi. Untuk menciptakan ventilasi silang yang efektif, diperlukan adanya bukaan *inlet* dan bukaan *outlet* pada sisi dinding yang berbeda. Seperti yang diungkapkan oleh Allard (1998), bahwa unit apartemen setidaknya harus memiliki dinding yang pada sisi yang menghadap arah angin (*windward*) dan sisi yang membelakangi arah angin (*leeward*) untuk menciptakan ventilasi silang yang efektif. Selain itu, berdasarkan Aynsley (1977) aliran udara yang dihasilkan oleh ventilasi silang yang melalui lebih dari dua bukaan secara berurutan dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu koefisien tekanan (C_p) pada permukaan bangunan yang terdapat bukaan *inlet* dan permukaan yang terdapat bukaan *outlet*, kecepatan angin luar, luas penampang tiap bukaan dan koefisien *discharge* (C_d) tiap bukaan.

Salah satu strategi yang diusulkan untuk menciptakan ventilasi silang di bangunan apartemen adalah dengan menggunakan *ventilation shaft*. *Ventilation shaft* ini merupakan saluran vertikal yang ditujukan untuk menciptakan akses keluar bagi aliran udara pada unit apartemen yang hanya memiliki bukaan di satu sisi. Penggunaan *ventilation shaft* pada bangunan apartemen ini memiliki kesamaan dengan ventilasi silang yang melalui beberapa bukaan secara berurutan. Hal ini dapat dilihat dari urutan peristiwa yang terjadi yaitu angin dari luar masuk ke dalam ruangan melalui jendela pada unit apartemen, kemudian aliran udara masuk ke dalam rongga *shaft* melalui lubang penghubung antara *shaft* dengan ruang unit apartemen, kemudian keluar melalui lubang di ujung *ventilation shaft* yang terletak di atap bangunan. Berdasarkan urutan peristiwa tersebut dapat diketahui bahwa aliran udara melewati 3 bukaan secara berurutan yaitu jendela pada tiap unit apartemen, lubang penghubung antara *shaft* dengan ruang unit apartemen dan lubang pada ujung *ventilation shaft* yang terletak pada atap bangunan. Strategi ini memiliki potensi untuk dapat diterapkan pada bangunan apartemen berkategori *high-rise* karena adanya peningkatan kecepatan udara seiring dengan bertambahnya ketinggian bangunan dan adanya tekanan negatif

yang besar pada atap datar bangunan *high-rise* sehingga dapat menciptakan perbedaan koefisien tekanan (C_p) yang cukup untuk menciptakan *wind driven ventilation* (Prajongsan dkk, 2011).



Gambar 1.2 Layout Bangunan Apartemen Dengan *Ventilation shaft* (Atas), Posisi Penempatan *Ventilation shaft* Pada Unit apartemen (Kiri) dan Gambar Potongan Unit Apartemen Dengan *Ventilation shaft* (Kanan) (Prajongsan, 2011)

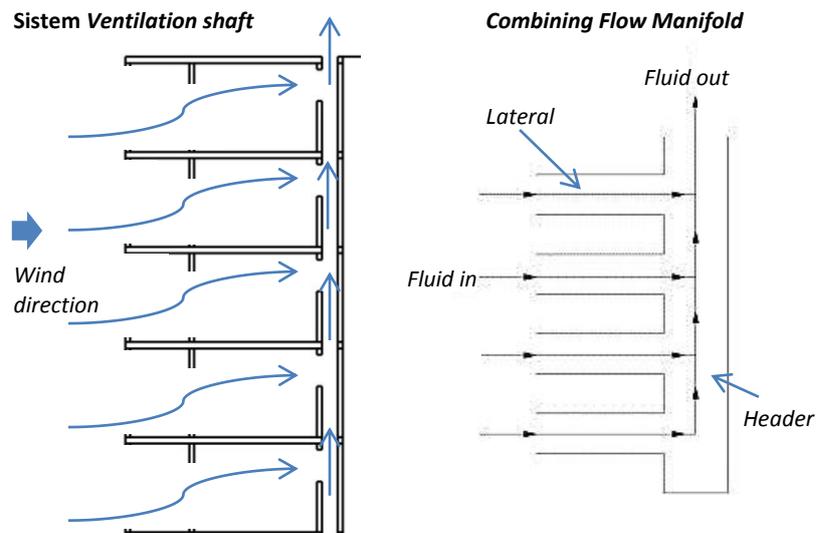
Penelitian tentang *ventilation shaft* yang dilakukan oleh Prajongsan dkk (2011) menyebutkan bahwa penggunaan *ventilation shaft* tersebut cukup efektif untuk meningkatkan aliran udara di dalam unit apartemen. Pada penelitian tersebut *cross ventilation* dapat terjadi karena aliran udara yang masuk melalui jendela dapat mengalir di dalam ruangan apartemen dan keluar melalui *ventilation shaft* yang terletak di dekat area sirkulasi (gambar 1.2). Meski demikian penelitian yang dilakukan oleh Prajongsan (2011) tersebut masih terbatas pada *ventilation shaft* yang terhubung dengan satu ruangan saja. Penggunaan *ventilation shaft* untuk lebih dari satu ruangan (sistem *ventilation shaft*) masih belum banyak dijelaskan.

Ventilation shaft yang terhubung pada satu ruangan memiliki cara kerja yang mirip dengan mekanisme ventilasi alami pada umumnya yang mengandalkan adanya perbedaan tekanan (C_p) pada lubang *inlet* di sisi *windward* dan lubang *outlet* pada sisi *leeward*. Perbedaan *ventilation shaft* yang terhubung pada satu ruangan dengan sistem *ventilation shaft* (*ventilation shaft* yang memiliki percabangan atau terhubung dengan banyak ruangan) adalah pada jumlah saluran *inlet*-nya. Sistem *ventilation shaft* akan memiliki beberapa lubang *inlet* yang tersusun secara vertikal pada fasad bangunan sisi *windward*, namun tetap memiliki satu lubang *outlet* pada sisi atap bangunan.

Berdasarkan Aynsley (1977) persebaran tekanan (C_p) pada fasad bangunan di sisi *windward* akan mengalami gradient yang disebabkan oleh kondisi kecepatan angin lokal yang meningkat seiring dengan bertambahnya ketinggian dari permukaan bumi. Hal serupa juga ditemukan pada penelitian Elshaer dkk (2016) yang menunjukkan bahwa terdapat gradien C_p yang bernilai positif pada fasad sisi *windward* bangunan *high-rise*. Apabila dikaitkan dengan sistem *ventilation shaft* yang memiliki banyak lubang *inlet* di sisi *windward*, adanya gradien C_p ini akan menyebabkan perbedaan nilai C_p pada tiap-tiap lubang *inlet*. Perbedaan ini tentunya juga dapat mempengaruhi kinerja sistem *ventilation shaft* pada tiap ruangan yang dilalui. Aynsley (1977) juga menambahkan bahwa semakin tinggi bangunan, maka semakin negatif pula tekanan yang dihasilkan di area *wake flow*. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa faktor ketinggian bangunan juga cukup berpengaruh terhadap besarnya tekanan atau C_p yang terjadi pada permukaan bangunan.

Faktor ketinggian bangunan tersebut memiliki peran penting dalam pemilihan objek penelitian. Populasi apartemen yang ada di Surabaya terdiri dari berbagai macam bangunan apartemen yang berbeda, baik dari segi bentuk bangunan, tatanan massa maupun ketinggiannya. Berdasarkan penjelasan mengenai pengaruh ketinggian di atas, maka dapat ditarik kesimpulan bahwa bangunan apartemen yang lebih tinggi akan memiliki potensi yang lebih besar dalam menciptakan ventilasi silang apabila ditambahkan sistem *ventilation shaft* ke dalam bangunan tersebut.

Sistem *ventilation shaft* memiliki kemiripan dengan kasus percabangan pada perpipaan. Percabangan ini dapat dideskripsikan berdasarkan pernyataan Mulley (2004) yang menyebutkan bahwa *manifold flow* didefinisikan sebagai pembagian suatu aliran fluida menjadi beberapa aliran yang lebih kecil (*dividing flow manifold*) atau penyatuan beberapa aliran menjadi satu aliran yang lebih besar (*combining flow manifold*). Sistem perpipaan yang memiliki percabangan tersebut disebut dengan istilah *manifolds*. Pada penelitian ini, istilah *ventilation shaft* atau *shaft* saja didefinisikan sebagai suatu saluran vertikal yang digunakan untuk meneruskan aliran udara ke sebuah lubang *outlet*. Sementara itu, istilah sistem *ventilation shaft* merujuk pada keseluruhan komponen yang berkaitan dengan proses ventilasi di dalam bangunan yaitu ruangan-ruangan unit apartemen, bukaan-bukaan yang terdapat pada ruangan tersebut, serta *shaft* yang mengalirkan udara ke atap.



Gambar 1.3 Ilustrasi sistem *ventilation shaft* (kiri) dan percabangan pada perpipaan atau manifolds (kanan)

Berdasarkan Bajura & Jones (1967), beberapa faktor yang berhubungan dengan desain yang mempengaruhi distribusi aliran di dalam *manifolds* antara lain *area ratio*, *lateral resistance* dari pipa *lateral* dan perbandingan antara panjang/diameter dari pipa *header*. *Area ratio* di dalam *manifolds* merupakan perbandingan antara jumlah total diameter dari pipa *lateral* (diameter *lateral* x n

banyaknya pipa *lateral*) dengan diameter pipa *header*. Berdasarkan teori tersebut, dapat diidentifikasi bahwa faktor desain yang berpengaruh terhadap distribusi aliran di dalam *manifolds* antara lain diameter dan panjang pipa *header*, diameter pipa *lateral*, resistansi pipa *lateral* serta banyaknya percabangan. Apabila dikaitkan dengan sistem *ventilation shaft*, maka fungsi dari diameter pipa yang dapat menentukan seberapa besar aliran di dalam pipa adalah sebanding dengan fungsi bukaan-bukaan pada ruangan yang terhubung dengan sistem *ventilation shaft* serta luas penampang *shaft* tersebut. Dengan demikian dapat dikatakan pula bahwa konfigurasi dari bukaan-bukaan di dalam ruangan serta luas penampang dari *ventilation shaft* akan mempengaruhi distribusi aliran udara di dalam sistem *ventilation shaft*.

Wang dkk (2011) menyebutkan bahwa distribusi aliran yang seragam di dalam *manifolds* dapat tercapai apabila nilai *area ratio*-nya kecil. Berdasarkan penjelasan mengenai *area ratio* dari Bajura & Jones (1976) di atas, teori dari Wang dkk (2011) tersebut dapat diterapkan pada sistem *ventilation shaft* dengan cara memperbesar ukuran *shaft* atau mengurangi jumlah lantai yang terhubung dengan sistem *ventilation shaft*. Cara lain yang dapat ditempuh adalah berdasarkan usulan dari Chen dkk (2003) yang menyebutkan bahwa distribusi aliran di dalam *manifolds* dapat dibuat lebih seragam dengan cara membuat diameter *lateral* semakin besar dari yang dekat dengan *outlet* hingga ke yang paling jauh, sehingga *lateral* yang paling jauh akan memiliki *outlet* paling besar sementara *lateral* yang dekat dengan *outlet* diameternya adalah yang paling kecil. Cara tersebut dapat diterapkan di dalam sistem *ventilation shaft* dengan cara memvariasikan ukuran lubang penghubung menjadi lebih besar pada lantai yang lebih jauh dari *outlet*. Meski demikian Wang dkk (2011) juga menyebutkan bahwa penyesuaian terhadap faktor-faktor yang mempengaruhi distribusi aliran di dalam *manifolds* tidaklah sederhana karena aliran di dalam *manifolds* sangatlah kompleks. Faktor-faktor tersebut saling mempengaruhi satu sama lain sehingga penyesuaian yang dilakukan harus mempertimbangkan semua faktor yang berpengaruh.

Penelitian ini ditujukan untuk mengkaji serta mengevaluasi kinerja sistem *ventilation shaft* yang terhubung dengan banyak ruang serta merumuskan konsep

mengenai sistem *ventilation shaft* yang mampu menghasilkan aliran udara yang cukup untuk menimbulkan efek pendinginan fisiologis. Pengujian kinerja sistem *ventilation shaft* ini dilakukan dengan menggunakan program *computational fluid dynamics* (CFD). Pengujian tersebut difokuskan ke ruang bersama di dalam unit apartemen sehingga efek yang diakibatkan oleh penggunaan sistem *ventilation shaft* dapat terlihat lebih jelas. Beberapa penelitian lain tentang ventilasi alami untuk bangunan *high-rise* yang telah dilakukan antara lain penelitian oleh Gao dkk (2011), Cheung dkk (2011) dan Zhou dkk (2014). Sementara itu, penelitian mengenai *ventilation shaft* juga sudah pernah dilakukan yaitu oleh Prajongsan dkk (2011) pada bangunan apartemen *high-rise* dan Yang dkk (2014) pada bangunan kantor 4 lantai.

1.2 Rumusan Permasalahan

Bangunan apartemen pada umumnya memiliki penataan layout yang kompak serta menggunakan koridor sirkulasi bertipe *double loaded*. Dengan konfigurasi yang demikian, sebagian besar ruangan atau unit apartemen di dalam bangunan tersebut hanya dapat menggunakan ventilasi satu sisi. Strategi penggunaan *ventilation shaft* pada bangunan apartemen merupakan suatu cara untuk menciptakan ventilasi silang pada bangunan apartemen dengan model layout yang kompak. Sistem *ventilation shaft* mengandalkan perbedaan tekanan (C_p) yang terjadi antara lubang *inlet* yang terletak pada fasad sisi *windward* dengan lubang *outlet* yang terletak di bagian atap bangunan (Prajongsan dkk, 2011). Adanya gradien C_p pada fasad sisi *windward* (Aynsley, 1977) diduga akan menyebabkan tiap-tiap lubang *inlet* akan menerima tekanan yang berbeda sehingga dapat diduga bahwa aliran udara yang dihasilkan pada tiap-tiap ruangan akan mengalami perbedaan pula.

Persebaran aliran udara di tiap-tiap ruang pada sistem *ventilation shaft* juga dapat ditinjau melalui teori mengenai *manifolds* atau percabangan pada perpipaan. Berdasarkan teori tersebut, faktor desain yang berpengaruh terhadap distribusi aliran di dalam *manifolds* antara lain diameter dan panjang pipa *header*, diameter pipa *lateral*, resistansi pipa *lateral* serta banyaknya percabangan (Bajura & Jones, 1967). Distribusi aliran di dalam *manifolds* dapat dibuat lebih seragam

dengan cara memperkecil nilai *area ratio* (Wang dkk, 2011) serta membuat diameter *lateral* semakin besar pada lantai yang lebih jauh dari *outlet* (Chen dkk, 2003). Apabila dikaitkan dengan sistem *ventilation shaft*, maka fungsi dari diameter pipa *lateral* dan *header* yang dapat menentukan seberapa besar aliran di dalam pipa adalah sebanding dengan fungsi bukaan-bukaan pada ruangan yang terhubung dengan *ventilation shaft* serta luas penampang *ventilation shaft* itu sendiri. Sementara itu banyaknya percabangan pada sistem *ventilation shaft* adalah sama dengan jumlah lantai yang terhubung dengan *shaft*. Berdasarkan penjelasan dari Shaughnessy dkk (2005), dapat diidentifikasi bahwa *turning loss*, atau berkurangnya energi aliran fluida akibat adanya pembelokan, dapat dikurangi dengan cara menggunakan *gradual bend* (pembelokan aliran dengan cara membuat lengkungan) dan menambahkan elemen pengarah. Dengan demikian dapat diduga bahwa faktor-faktor desain tersebut dapat mempengaruhi distribusi aliran udara pada sistem *ventilation shaft*.

Teori-teori di atas dapat diaplikasikan pada sistem *ventilation shaft* dengan cara mengubah posisi ketinggian model pada bangunan, mengubah ukuran *shaft* atau mengurangi jumlah lantai yang terhubung dengan *ventilation shaft*, mengubah kemiringan lubang internal, serta memvariasikan ukuran lubang internal yang menghubungkan ruangan dengan *shaft* menjadi semakin besar pada lantai yang lebih jauh dari *outlet*. Meski demikian Wang dkk (2011) juga mengingatkan bahwa pertimbangan dalam mendesain *manifolds* tidak boleh hanya memperhatikan satu faktor saja dan melupakan faktor lainnya. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa untuk dapat menghasilkan distribusi aliran yang seragam maka perlu dilakukan pertimbangan dari berbagai faktor. Hal tersebut dapat dilakukan dengan cara mengkombinasikan lebih dari satu strategi yang telah disebutkan di atas pada suatu model eksperimen.

Pertanyaan penelitian yang dapat diajukan dari pernyataan-pernyataan di atas adalah:

- Bagaimana kinerja *ventilation shaft* dalam menghasilkan efek pendinginan fisiologis oleh angin pada unit-unit yang diuji?
- Bagaimana pengaruh ketinggian serta elemen desain terhadap distribusi aliran udara yang dihasilkan oleh sistem *ventilation shaft*?
- Bagaimana konsep desain sistem *ventilation shaft* yang mampu menghasilkan efek pendinginan fisiologis serta menghasilkan distribusi aliran udara yang seragam?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini ditujukan untuk menghasilkan konsep *ventilation shaft* serta merumuskan pemahaman tentang pengaruh ketinggian dan elemen-elemen desain pada sistem *ventilation shaft*. Untuk mencapai tujuan tersebut, maka sasaran-sasaran yang ditentukan adalah sebagai berikut:

- Mengevaluasi kinerja *ventilation shaft* dalam menghasilkan efek pendinginan fisiologis oleh angin pada unit-unit yang diuji.
- Menganalisa pengaruh ketinggian serta elemen-elemen desain, yaitu bukaan-bukaan yang berhubungan dengan *shaft*, panjang *shaft* dan besarnya *shaft* beserta pengaruhnya terhadap distribusi aliran udara yang dihasilkan *ventilation shaft*.
- Merumuskan konsep desain *ventilation shaft* untuk bangunan apartemen high rise yang mampu menghasilkan efek penyejukan serta distribusi aliran udara yang merata.

1.4 Manfaat Penelitian

Pemahaman mengenai kinerja dan konfigurasi yang optimal dari *ventilation shaft* yang dihasilkan dari penelitian ini diharapkan mampu memberikan manfaat secara teoritis dan juga manfaat praktis. Manfaat tersebut antara lain:

1. Manfaat teoritis: menghasilkan pengetahuan mengenai *ventilation shaft* pada apartemen *high-rise* yang diharapkan mampu memperkaya ilmu pengetahuan khususnya mengenai ventilasi alami pada bangunan tinggi.
2. Manfaat praktis: hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat praktis kepada para desainer bangunan yaitu berupa konsep desain sistem *ventilation shaft* yang berfungsi untuk meningkatkan penghawaan alami pada bangunan apartemen *high-rise*.

1.5 Batasan Penelitian

Batasan penelitian yang ditetapkan di dalam penelitian yaitu bangunan yang digunakan sebagai referensi obyek penelitian adalah apartemen yang berkategori *high-rise*. Batasan ini ditentukan berdasarkan faktor keberadaan angin berkecepatan tinggi yang terdapat pada lantai-lantai atas bangunan tinggi. Berdasarkan penjelasan Peraturan Pemerintah RI nomor 36 tahun 2005, definisi bangunan tinggi (*high-rise*) adalah bangunan yang memiliki jumlah lantai lebih dari 8 lantai. Definisi tersebut digunakan sebagai standar minimum di dalam penentuan populasi penelitian. Pada penerapannya, bangunan apartemen yang termasuk di dalam populasi penelitian ini memiliki jumlah lantai berkisar antara 14 sampai dengan 33 lantai. Selain itu, penelitian ini juga tidak melibatkan faktor ekonomis dalam penentuan desain eksperimen. Meski demikian, faktor ekonomis tersebut secara tidak langsung termasuk sebagai pertimbangan mengenai efisiensi ruang saat menambahkan *ventilation shaft* ke dalam model bangunan untuk eksperimen.

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Peran Ventilasi Alami

Berdasarkan Koenigsberger dkk (1975), ventilasi alami dan pergerakan udara dapat digolongkan ke dalam golongan '*structural control*' karena tidak bergantung pada suplai energi dan instalasi mekanik, namun karena pentingnya bagi kenyamanan manusia, ventilasi berhak mendapat penggolongan tersendiri.

Ventilasi alami memiliki 3 fungsi utama yaitu:

1. Suplai udara segar
2. Sebagai pendinginan konveksi
3. Sebagai pendinginan fisiologis

Fungsi yang pertama yaitu untuk menyuplai udara segar sangat berkaitan erat dengan aspek kesehatan manusia. Ventilasi alami merupakan strategi yang sering dipilih untuk mewujudkan penghawaan bangunan yang sehat. Fungsi ventilasi yang kedua sebagai strategi pendinginan konvektif memerlukan adanya perbedaan suhu antara di luar dan di dalam. Pendinginan konvektif ini sangat bergantung pada volume pergantian udara karena pada strategi pendinginan ini udara merupakan medium untuk melepaskan panas di dalam bangunan. Fungsi ventilasi yang ketiga, sebagai pendinginan fisiologis, merupakan akibat dari pergerakan udara yang melewati kulit penghuni bangunan yang kemudian menghasilkan sensasi pendinginan evaporatif.

2.2 Mekanisme Ventilasi Alami

Pada dasarnya ventilasi alami dapat terjadi akibat adanya perbedaan tekanan. Perbedaan tekanan tersebut dapat terjadi melalui beberapa cara seperti yang disebutkan oleh Aynsley (1977), bahwa sumber perbedaan tekanan yang menyebabkan terjadinya pergerakan udara di dalam ruang ada 2 yaitu:

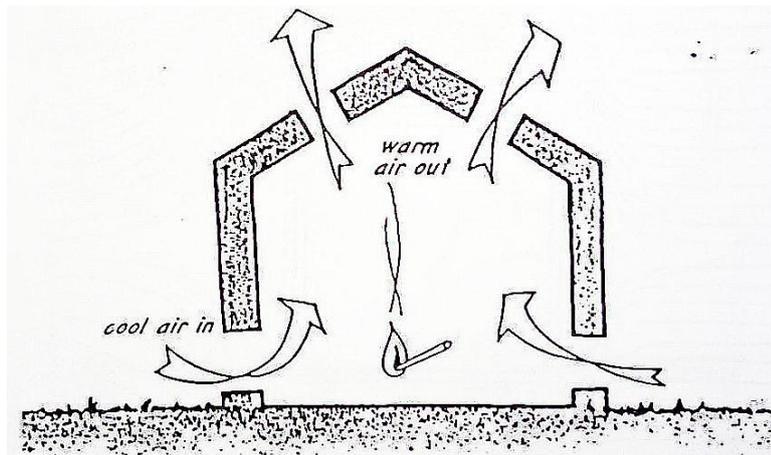
- 1) *Stack effect* karena adanya variasi pada kepadatan udara yang diakibatkan oleh perbedaan suhu.

2) *Wind pressure* yang diakibatkan oleh distribusi tekanan angin pada bangunan.

Kedua sumber penggerak aliran udara ventilasi tersebut dapat bekerja secara bersamaan. Namun apabila kedua sumber penggerak terjadi bersamaan, perbedaan tekanan yang dihasilkan oleh angin biasanya lebih dominan daripada tekanan akibat perbedaan suhu atau *stack effect*.

2.2.1 *Stack effect Ventilation*

Moore (1993) menyebutkan bahwa *stack effect* merupakan akibat dari menurunnya kepadatan udara seiring dengan pertambahan temperaturnya. Semakin tinggi perbedaan temperatur maka semakin besar pula perbedaan *buoyancy*-nya. Perbedaan *buoyancy* inilah yang menjadi sumber penggerak udara pada sirkulasi *stack effect*.



Gambar 2.1 Prinsip *stack effect* pada bangunan (Moore, 1993)

Pada gambar di atas ditunjukkan prinsip kerja sirkulasi *stack effect*, udara dari luar yang lebih dingin akan masuk ke dalam bangunan menggantikan udara yang lebih panas. Massa jenis udara yang lebih panas menjadi lebih ringan sehingga dapat terangkat ke atas dan keluar melalui celah di bagian atap.

Debit aliran udara yang dihasilkan dari *stack effect ventilation* dapat dihitung berdasarkan formula berikut (Aynsley, 1977):

$$Q = 0,12 A (H (T_1 - T_2))^{\frac{1}{2}} \quad (2-1)$$

Dengan:

Q = debit aliran udara m^3

A = total luas *free area*

H = ketinggian antara bukaan atas dengan bukaan bawah

$T_1 - T_2$ = perbedaan temperatur udara luar dan dalam

Berdasarkan persamaan di atas, dapat diketahui bahwa airflow rate sangat dipengaruhi oleh luas total area yang terbuka, ketinggian antara bukaan atas dan bawah serta perbedaan antara temperatur udara luar dan dalam. Namun demikian, mekanisme *stack effect* ini tidak terlalu efektif apabila diterapkan pada daerah beriklim tropis. Hal ini sesuai dengan pernyataan Aynsley (1977) bahwa sirkulasi *stack effect* di daerah beriklim panas cenderung kurang efektif karena bangunannya memiliki bukaan-bukaan yang besar dan volume pergantian udara yang besar sehingga perbedaan temperatur antara di luar dan di dalam bangunan menjadi lebih kecil.

2.2.2 Wind Forced Ventilation

Ventilasi alami yang disebabkan oleh tekanan angin dapat dibedakan menjadi 2, yaitu ventilasi satu sisi (*single sided ventilation*) dan ventilasi silang (*cross ventilation*). Single sided ventilation terjadi apabila sebuah ruangan hanya memiliki jendela pada satu sisi ruangan sementara ventilasi silang terjadi apabila terdapat jendela pada 2 sisi yang berbeda. Ventilasi silang yang menggunakan angin sebagai sumber penggerakannya sangat tergantung pada perbedaan tekanan antara bukaan dan keluaran anginnya. Adanya perbedaan tekanan ini akan mengakibatkan angin dapat masuk ke dalam suatu ruangan, mengalir di dalamnya kemudian keluar melalui bukaan di sisi lainnya. Ventilasi silang diklaim lebih efektif dibandingkan dengan ventilasi satu sisi seperti yang disebutkan oleh Mumovic (2009), bahwa *one-sided ventilation* hanya efektif sampai 2,5 kali tinggi ruangan, sementara *cross ventilation* efektif sampai 5 kali tinggi ruangan. Berdasarkan hal tersebut dapat diasumsikan bahwa ventilasi silang adalah 2 kali lebih efektif daripada ventilasi satu sisi.

Berdasarkan *The British Standard Method* (BS 5925, 1980 dalam Allard, 1998), *air flow rate* atau debit aliran udara pada ventilasi satu sisi dapat dihitung berdasarkan rumus berikut:

$$Q = 0,025AV \quad (2-2)$$

Dengan pengertian:

- Q : Debit aliran udara
- A : Luas bukaan
- V : Kecepatan angin referensi

Sementara itu, perhitungan untuk debit aliran udara pada ventilasi silang dinyatakan sebagai berikut:

$$Q = C_d AV \sqrt{\Delta C_p} \quad (2-3)$$

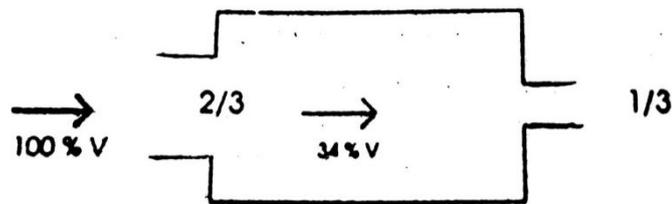
Dengan pengertian:

- C_d : Koefisien *discharge*
- ΔC_p : Perbedaan tekanan pada sisi *windward* dan *leeward*

Berdasarkan rumus perhitungan di atas, ventilasi silang memiliki lebih banyak variabel yang berpengaruh, seperti luas bukaan, distribusi tekanan angin pada permukaan bangunan serta koefisien *discharge*. Hal ini sesuai dengan yang disebutkan oleh Aynsley (1977) bahwa demi memaksimalkan kecepatan angin yang dihasilkan ventilasi silang, orientasi bangunan dan bukaan terhadap arah angin menjadi sangat penting. Apabila telah terdapat perbedaan nilai koefisien tekanan yang jelas antara sisi-sisi permukaan *inlet* dan *outlet*-nya, maka faktor-faktor lain yang mempengaruhi adalah kecepatan aliran angin luar dan koefisien *discharge* tiap bukaan dan luas bukaannya.

Berdasarkan penjelasan di atas dapat diketahui faktor-faktor apa saja yang mempengaruhi nilai debit aliran udara yang terjadi. Salah satunya adalah distribusi tekanan angin pada permukaan-permukaan bangunan. Semakin besar nilai perbedaan tekanan yang terjadi pada bukaan *inlet* dan *outlet* maka debit aliran udara yang dihasilkan akan semakin besar pula. Luasan tiap-tiap bukaan yang dilalui juga menjadi salah satu faktor yang penting.

Pengaruh luasan bukaan *inlet* dan *outlet* juga diteliti oleh Melaragno (1978) dalam Allard (1998) yang menyatakan bahwa nilai rata-rata kecepatan angin pada ventilasi silang tanpa partisi dapat dipandang sebagai suatu fungsi dari luasan *inlet* dan *outlet*. Besarnya pengaruh dari luasan *inlet* dan *outlet* tersebut dapat dilihat pada tabel berikut:



Gambar 2.2 Pengaruh ukuran bukaan *inlet* dan *outlet* pada ventilasi silang dengan arah angin tegak lurus (Melaragno, 1978 dalam Allard, 1998)

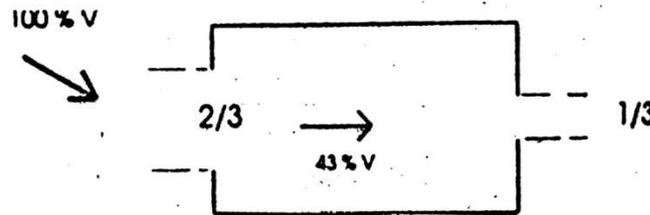
Tabel 2.1 Pengaruh ukuran bukaan *inlet* dan *outlet* pada ventilasi silang dengan arah angin tegak lurus

Conditions for perpendicular winds	V_{avg} (%)
<i>Width inlet/Width of wall</i> = 1/3 and <i>Width outlet/Width of wall</i> = 1/3	35
<i>Width inlet/Width of wall</i> = 1/3 and <i>Width outlet/Width of wall</i> = 2/3	39
<i>Width inlet/Width of wall</i> = 1/3 and <i>Width outlet/Width of wall</i> = 1	44
<i>Width inlet/Width of wall</i> = 2/3 and <i>Width outlet/Width of wall</i> = 1/3	34
<i>Width inlet/Width of wall</i> = 2/3 and <i>Width outlet/Width of wall</i> = 2/3	37
<i>Width inlet/Width of wall</i> = 2/3 and <i>Width outlet/Width of wall</i> = 1	35
<i>Width inlet/Width of wall</i> = 1 and <i>Width outlet/Width of wall</i> = 1/3	32
<i>Width inlet/Width of wall</i> = 1 and <i>Width outlet/Width of wall</i> = 2/3	36
<i>Width inlet/Width of wall</i> = 1 and <i>Width outlet/Width of wall</i> = 1	47

Sumber: Melaragno (1978) dalam Allard (1998)

Pada kondisi arah datang angin yang tegak lurus dengan *inlet*, dapat diidentifikasi bahwa kecepatan aliran udara paling tinggi didapatkan saat *inlet* dan *outlet* memiliki lebar maksimum. Meski demikian konfigurasi lebar *inlet* maksimum dan *inlet* minimum justru menghasilkan kecepatan aliran udara yang paling rendah sementara pada konfigurasi lebar *inlet* minimum dan *outlet*

maksimum kecepatan aliran udara yang dihasilkan masih cukup tinggi mendekati nilai kecepatan angin saat lebar *inlet* dan *outlet* sama-sama maksimum.



Gambar 2.3 Pengaruh ukuran bukaan *inlet* dan *outlet* pada ventilasi silang dengan arah angin menyudut (Melaragno, 1978 dalam Allard, 1998)

Tabel 2.2 Pengaruh ukuran bukaan *inlet* dan *outlet* pada ventilasi silang dengan arah angin menyudut

Conditions for oblique to <i>inlet</i> winds	V_{avg} (%)
Width inlet/Width of wall = 1/3 and Width outlet/Width of wall = 1/3	42
Width inlet/Width of wall = 1/3 and Width outlet/Width of wall = 2/3	40
Width inlet/Width of wall = 1/3 and Width outlet/Width of wall = 1	44
Width inlet/Width of wall = 2/3 and Width outlet/Width of wall = 1/3	43
Width inlet/Width of wall = 2/3 and Width outlet/Width of wall = 2/3	51
Width inlet/Width of wall = 2/3 and Width outlet/Width of wall = 1	59
Width inlet/Width of wall = 1 and Width outlet/Width of wall = 1/3	41
Width inlet/Width of wall = 1 and Width outlet/Width of wall = 2/3	62
Width inlet/Width of wall = 1 and Width outlet/Width of wall = 1	65

Sumber: Melaragno (1978) dalam Allard (1998)

Berdasarkan tabel di atas dapat diidentifikasi bahwa kecepatan aliran udara di dalam ruang yang terjadi saat kondisi arah datang angin menyudut terhadap *inlet* umumnya lebih besar daripada saat kondisi arah datang angin tegak lurus dengan *inlet*. Hal ini menunjukkan bahwa arah angin memiliki pengaruh yang cukup signifikan terhadap kecepatan aliran udara yang dihasilkan di dalam ruangan. Tabel di atas juga menunjukkan bahwa kecepatan aliran udara cenderung meningkat saat lebar *inlet* atau *outlet*nya diperbesar. Kecepatan aliran udara paling besar juga terjadi saat lebar *inlet* dan *outlet* mencapai maksimum.

Ventilasi silang juga dapat terjadi melalui beberapa ruang sebelum mencapai lubang *outlet*. Hal ini dapat dijelaskan melalui rumus perhitungan debit aliran udara pada ventilasi silang yang melalui beberapa bukaan secara berurutan (Aynsley, 1977) sebagai berikut:

$$Q = \left(\frac{(C_{p1} - C_{p\ n+1})v_z^2}{\frac{1}{C_{d1}^2 A_1^2} + \frac{1}{C_{d2}^2 A_2^2} + \dots + \frac{1}{C_{dn}^2 A_n^2}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2-4)$$

Dengan pengertian:

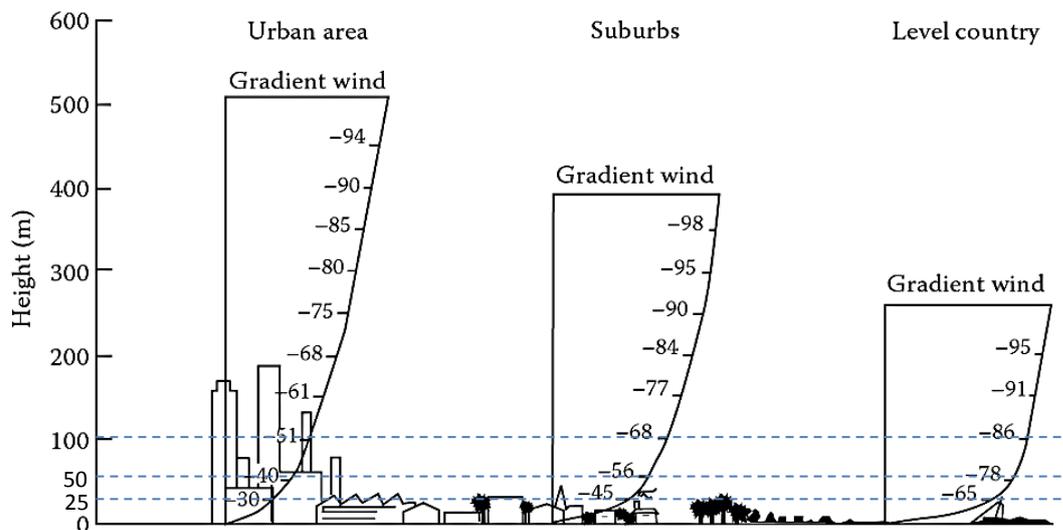
- Q : Debit aliran udara
- C_d : Koefisien *discharge*
- A : Luas bukaan
- C_{p1} : Tekanan angin pada bukaan di sisi *windward*
- C_{p_{n+1}} : Tekanan angin pada bukaan di sisi *leeward*
- v_z : Kecepatan angin pada titik referensi

Berdasarkan rumus di atas dapat diidentifikasi bahwa terdapat kesamaan dalam perhitungan ΔCp antara ventilasi silang pada ruang tunggal dengan ruang banyak atau melalui beberapa bukaan yang berurutan. Faktor yang menentukan adalah nilai Cp pada fasad luar di arah *windward* serta fasad luar di arah *leeward*. Meski demikian, perhitungan debit untuk ventilasi silang yang melalui beberapa bukaan berurutan (ventilasi silang pada multi-zona) perlu memperhatikan nilai koefisien *discharge* (Cd) pada tiap tiap bukaan yang dilalui.

Salah satu penelitian tentang ventilasi silang pada multi zona adalah yang dilakukan oleh Chu dkk (2010) yang meneliti tentang loss factor dari bukaan-bukaan pada bangunan dengan ventilasi silang. Di dalam penelitian tersebut disebutkan bahwa apabila luas bukaan eksternal kurang dari 3% dari luas dinding, maka besarnya bukaan internal tidak berpengaruh banyak terhadap proses ventilasi silang. Namun saat luas bukaan eksternal lebih besar dari 5%, maka luas bukaan internal memiliki pengaruh yang dominan pada proses ventilasi silang. Pada kondisi demikian, besarnya bukaan internal akan mempengaruhi nilai *resistance* ruang sehingga pada akhirnya juga mempengaruhi *ventilation rate* yang dihasilkan.

2.3 Aliran Angin di Daerah Perkotaan

Aliran angin yang terjadi di dekat permukaan bumi akan mendapat pengaruh dari tingkat kekasaran permukaan di daerah yang dilaluinya. Berdasarkan Szokolay (2004) pengaruh dari permukaan bumi ini akan menyebabkan terjadinya aliran turbulen dan menciptakan suatu *boundary layer*. Boundary layer tersebut dapat memiliki ketinggian yang bervariasi, tergantung dari kekasaran permukaan bumi yang dilaluinya mulai dari 270m di daerah padang terbuka hingga lebih dari 500m di daerah pusat kota. Tingkat kekasaran permukaan bumi juga mempengaruhi kecepatan angin yang terjadi di dalam *boundary layer* tersebut. Hal ini juga dijelaskan oleh Aynsley (1977) bahwa pada ketinggian sekitar 500m, arah dan kecepatan angin merupakan fungsi dari bentuk, intensitas dan lokasi geografis dari sistem atmosfer. Gradien kecepatan angin terus mengalami perubahan sesuai ketinggian dari permukaan bumi seperti yang ditunjukkan oleh gambar di bawah.



Gambar 2.4 Grafik gradien angin pada kondisi topografi berbeda-beda (diadaptasi dari Turner, 1969 dalam Godish dkk, 2015)

Grafik di atas menggambarkan tentang gradien kecepatan angin sebagai fungsi dari ketinggian pada kondisi topografi yang berbeda yaitu area urban, suburban dan *open country*. Berdasarkan grafik tersebut dapat diidentifikasi bahwa gradien kecepatan angin mengalami perubahan pada ketinggian-ketinggian

tertentu. Sebagai contoh, di daerah urban, pada ketinggian 0-25 m kecepatan angin mengalami perubahan sebesar 30 (dari 0 ke 30), kemudian pada ketinggian 25-50 delta kecepatan anginnya adalah 10 (dari 30 ke 40) sementara pada ketinggian 50-100 m delta kecepatan anginnya adalah 11 (dari 40 ke 51). Pada ketinggian rendah (0-25 meter), dapat dipahami bahwa pengaruh dari kekasaran permukaan bumi sangatlah besar sehingga kecepatan angin pada rentang ketinggian tersebut memiliki perbedaan yang cukup signifikan. Meski demikian perlu dicermati juga bahwa pada rentang ketinggian 25-50 m dan rentang ketinggian 50-100m, delta kecepatan anginnya hampir sama yaitu hanya 10 dan 11 namun rentang ketinggian tersebut berbeda 2 kali lipat yaitu sejauh 25 meter dan 50 meter. Pola-pola tersebut juga dapat ditemui pada area suburban dan open country.

Klasifikasi suatu area berdasarkan tingkat kekasaran permukaan bumi dapat dijelaskan lebih lanjut menggunakan tabel berikut ini:

Tabel 2.3 Nilai gradien ketinggian, z_0 , eksponen *power law* α , β , dan panjang kekasaran z_0

Kategori permukaan	Deskripsi permukaan	Gradien Ketinggian z_G (m)	Panjang Kekasaran Z_0 (m)	Mean Speed Exponent α	Gust Speed Exponent β
1	Laut terbuka, gurun, padang tundra, padang es	250	0.001	0.11	0.07
2	Daerah pedesaan terbuka dengan semak rendah dan pepohonan yang jarang	300	0.03	0.15	0.09
3	Daerah pinggiran kota, kota kecil, area hijau	400	0.3	0.25	0.14
4	Daerah pusat kota, gedung tinggi, area industri	500	3	0.36	0.20

Sumber: Aynsley (1977)

Variasi kecepatan angin pada ketinggian tertentu dapat diperkirakan dengan menggunakan ekspresi matematika yang disebut dengan ‘*Power Law*’ dengan perhitungan sebagai berikut:

$$V_z = V_{zG} (z/z_G)^\alpha \quad (2-5)$$

- V_z = Kecepatan angin pada ketinggian z
 V_{zG} = Kecepatan angin pada titik referensi
 α = Eksponen berdasarkan kekasaran permukaan

Berdasarkan perhitungan dari rumus di atas dapat diketahui bahwa kecepatan angin akan meningkat seiring dengan pertambahan jarak dari permukaan tanah. Selain itu, kecepatan angin juga dipengaruhi oleh tingkat kekasaran permukaan atau *terrain roughness*. Semakin padat kondisi suatu area, maka nilai kekasaran permukaannya akan semakin meningkat dan kecepatan angin pada ketinggian tertentu cenderung semakin berkurang apabila dibandingkan dengan kawasan lainnya yang lebih rendah kekasaran permukaannya.

2.4 Aliran Angin di Sekeliling Bangunan Tinggi

Aliran angin yang melalui suatu obyek dapat mengalami pemisahan menjadi beberapa lapisan yang berbeda. Sebelum mempelajari aliran udara di sekitar bangunan tinggi, diperlukan pemahaman mengenai lapisan-lapisan aliran angin yang terjadi di sekitar suatu obyek. Lapisan-lapisan aliran angin ini telah dijelaskan oleh Aynsley (1977), bahwa terdapat tiga *flow regions* yaitu:

1. Freestream flow.

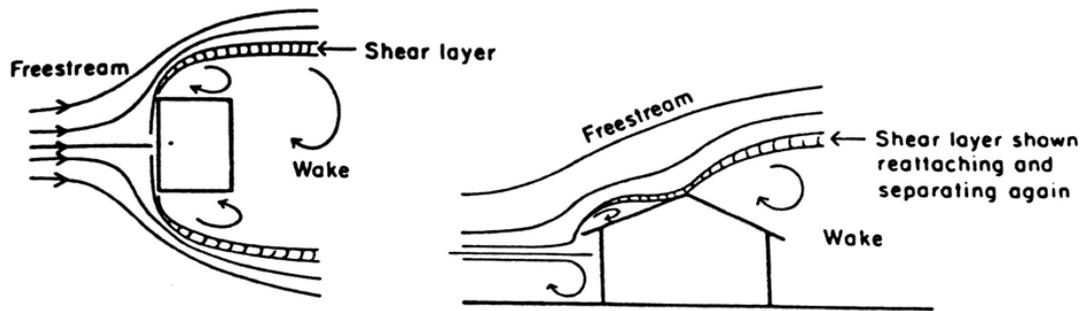
Freestream flow ini merupakan aliran angin yang terjadi sebelum mencapai obyek serta aliran di area yang tidak terkena pengaruh langsung dari obyek yang dilalui. Pada aliran tersebut, *shear* yang terjadi cukup kecil dan pada aliran inilah Persamaan Bernoulli dapat diterapkan serta dianggap valid.

2. Shear layers.

Aliran ini ditandai dengan tingginya *mean shear rate* yang terjadi. Pada aliran ini kecepatan angin dapat mengalami variasi dari nol di dekat permukaan obyek yang dilalui, hingga mendekati kecepatan aliran freestream di batas paling luarnya. Selain itu aliran ini juga dapat menjadi pemisah antara *freestream flow* dengan *wake flow*.

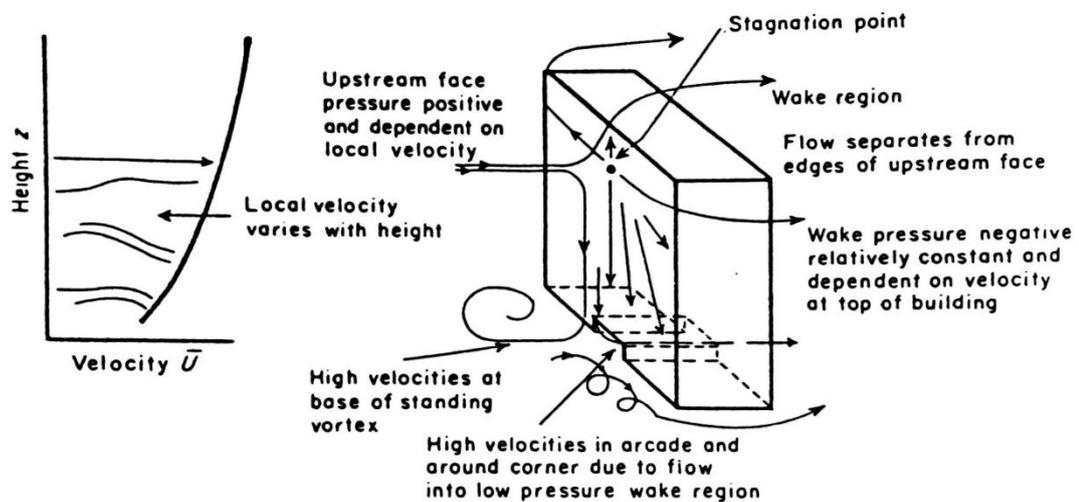
3. Wake flow.

Aliran ini terjadi di belakang *shear layer* yang ditandai dengan adanya aliran balik atau aliran turbulen yang memiliki kecepatan relatif rendah dibandingkan dengan kecepatan pada *freestream flow*.



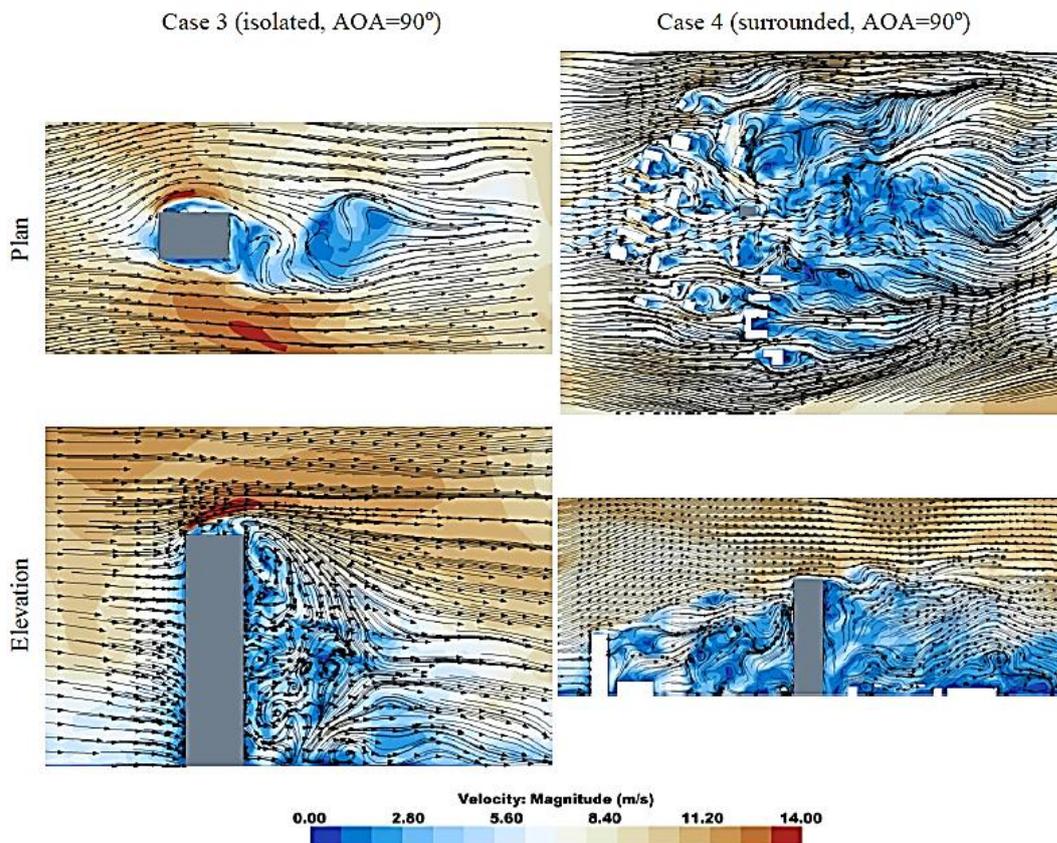
Gambar 2.5 Pemisahan aliran angin menjadi layer-layer di sekeliling bangunan (Aynsley, 1977)

Ilustrasi di atas menunjukkan bagaimana pemisahan aliran angin menjadi beberapa bagian saat melewati suatu obyek bangunan secara 2 dimensi. Berdasarkan ilustrasi dan penjelasan di atas dapat diidentifikasi bahwa aliran *freestream* dapat berbelok ke arah samping atau ke atas saat melewati suatu obyek bangunan. Sementara itu *wake flow* dapat terbentuk di samping, di belakang ataupun di bagian atas obyek bangunan dengan adanya *shear layer* yang menjadi pembatas antara wilayah *wake flow* dengan *freestream flow*.



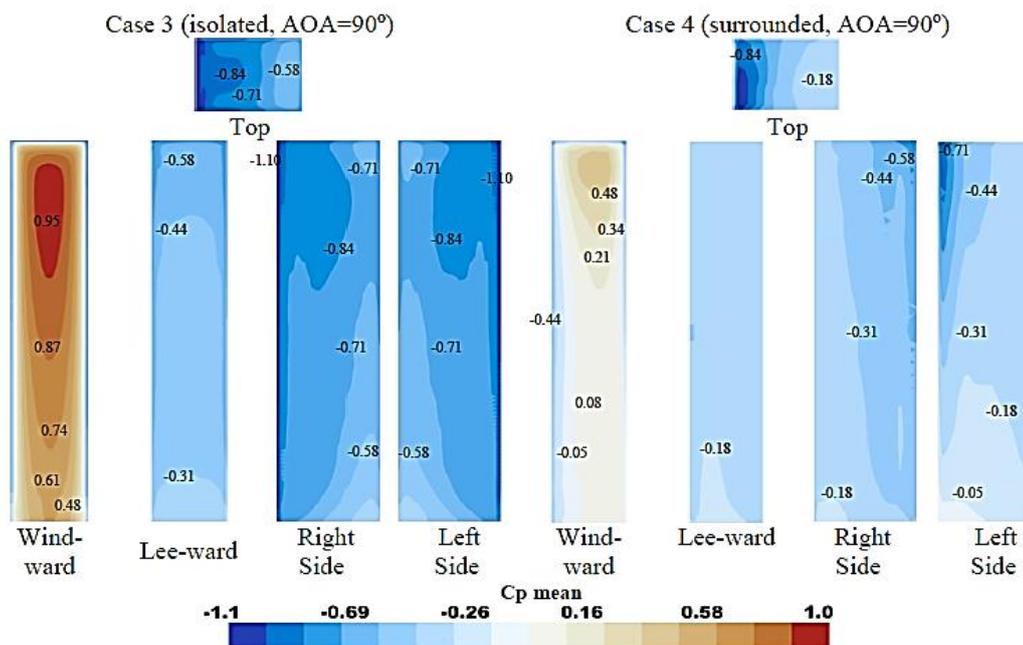
Gambar 2.6 Aliran angin di sekeliling bangunan secara 3D (Aynsley, 1977)

Ilustrasi di atas dapat memberikan gambaran lebih lanjut mengenai aliran udara di sekitar bangunan dalam bentuk 3 dimensi. Angin yang datang menuju ke arah bangunan dipengaruhi oleh adanya gradien angin yang meningkat seiring bertambahnya ketinggian. Berdasarkan Aynsley (1977) adanya wind gradien ini juga menyebabkan gradien persebaran tekanan di fasad bangunan di arah *windward* yang kemudian mengakibatkan angin di bawah *stagnation point* akan mengalir ke arah bawah hingga menghasilkan aliran *vortex* di bagian bawah bangunan. *Stagnation point* ini umumnya terjadi di bagian atas fasad depan bangunan, yaitu sekitar 80% dari ketinggian bangunan seperti terlihat pada gambar di atas. Sementara itu tekanan rendah yang terjadi di area *wake flow* sangat tergantung pada kecepatan angin pada *freestream layer* yang terjadi di atas bangunan.



Gambar 2.7 Aliran angin di sekeliling bangunan *high-rise* yang terisolasi (kiri) dan yang dikelilingi bangunan lain (kanan) (Elshaer dkk, 2016)

Aliran angin di sekitar bangunan tinggi serta persebaran tekanan pada fasad bangunan tinggi yang diakibatkan oleh angin juga dapat dilihat dari hasil penelitian Elshaer dkk (2016) yang melakukan studi mengenai respon bangunan terhadap angin pada *isolated building* dan *surrounded building*. Gambar 2.7 menunjukkan aliran angin yang terjadi di sekitar bangunan tinggi dalam kondisi terisolasi (kiri) dan dikelilingi oleh bangunan lainnya (kanan). Dari gambar tersebut dapat diidentifikasi bahwa kondisi lingkungan sekitar dan keberadaan bangunan tinggi lain di dekat memiliki pengaruh yang signifikan terhadap aliran angin di sekitar bangunan obyek. Hal tersebut juga mempengaruhi persebaran tekanan di permukaan bangunan obyek seperti dapat dilihat pada gambar di bawah.



Gambar 2.8 C_p rata-rata pada permukaan bangunan *high-rise* yang terisolasi (kiri) dan yang dikelilingi bangunan lain (kanan) (Elshaer dkk, 2016)

Berdasarkan gambar di atas dapat diidentifikasi bahwa tekanan positif yang terjadi pada permukaan *isolated building* di arah *windward* mengalami gradien yang terus meningkat seiring bertambahnya ketinggian. Peningkatan tekanan oleh angin pada permukaan bangunan di sisi *windward* ini berbanding lurus dengan kecepatan angin lokal yang meningkat seiring dengan ketinggian.

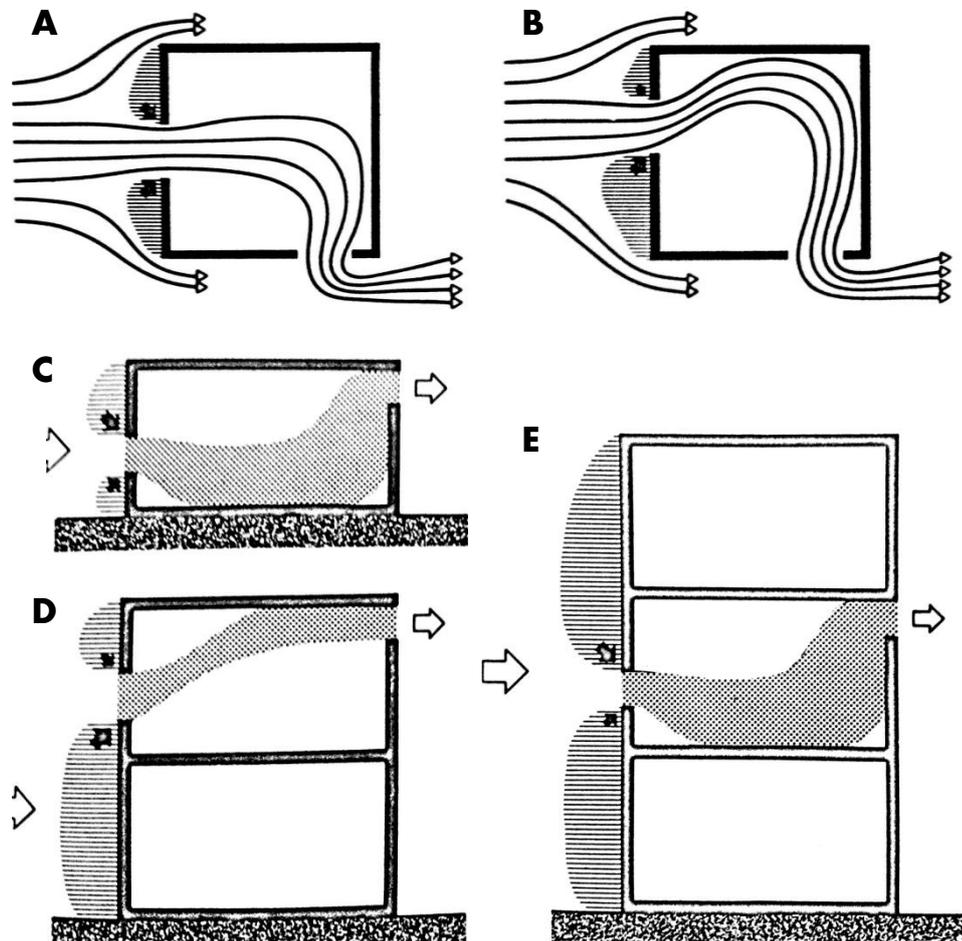
Dengan kata lain, bagian atas bangunan akan menerima kecepatan angin luar serta tekanan yang lebih tinggi daripada bagian bawah bangunan. Sementara itu, sisi bangunan lainnya, yaitu sisi samping kanan-kiri, sisi *leeward* dan atap bangunan akan memperoleh tekanan yang bersifat negatif. Tekanan yang paling negatif terjadi pada bagian atap yang dekat dengan sisi *windward* serta pada sisi samping bagian atas bangunan yang dekat dengan sisi *windward*. Hal ini memiliki kaitan erat dengan adanya kecepatan angin yang sangat tinggi di bagian atap bangunan, terutama di ujung atap yang dekat dengan sisi *windward*. Aynsley (1977) juga menambahkan bahwa semakin tinggi bangunan, maka semakin negatif pula tekanan yang dihasilkan di area *wake flow*. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa faktor ketinggian bangunan juga cukup berpengaruh terhadap besarnya tekanan atau C_p yang terjadi pada permukaan bangunan.

Sementara itu, persebaran tekanan pada permukaan bangunan yang dikelilingi oleh bangunan lain atau *surrounded building* ternyata memiliki pola yang mirip dengan bangunan terisolasi namun dengan nilai tekanan positif dan tekanan negatif yang relatif lebih kecil. Aliran angin yang tidak teratur di sekitar bangunan juga mempengaruhi persebaran tekanan, terutama di sisi-sisi samping bangunan. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi lingkungan sekitar juga memiliki pengaruh besar terhadap besaran dan persebaran tekanan atau C_p di permukaan bangunan.

2.5 Aliran Udara di Dalam Bangunan

Selain faktor kecepatan udara, temperatur dan kelembaban udara, pola aliran udara di dalam ruangan juga merupakan faktor penting yang mempengaruhi efektivitas dari ventilasi silang. Agar ventilasi silang menjadi efektif, udara diharapkan dapat mengalir pada level ketinggian manusia sehingga efek pendinginan yang terjadi akan lebih maksimal. Salah satu faktor yang dapat mempengaruhi pergerakan aliran udara di dalam ruangan adalah posisi bukaan-bukaannya, terutama bukaan pada sisi *windward*. Hal ini sesuai dengan yang disebutkan oleh Lippsmeier (1997) bahwa faktor yang paling penting untuk pengarahannya adalah lobang masuknya dan kondisi tekanan pada dinding luar.

Kondisi tekanan yang terjadi di sekitar lubang masuknya udara akan menjadi faktor penentu kemana arah udara di dalam ruangan mengalir.

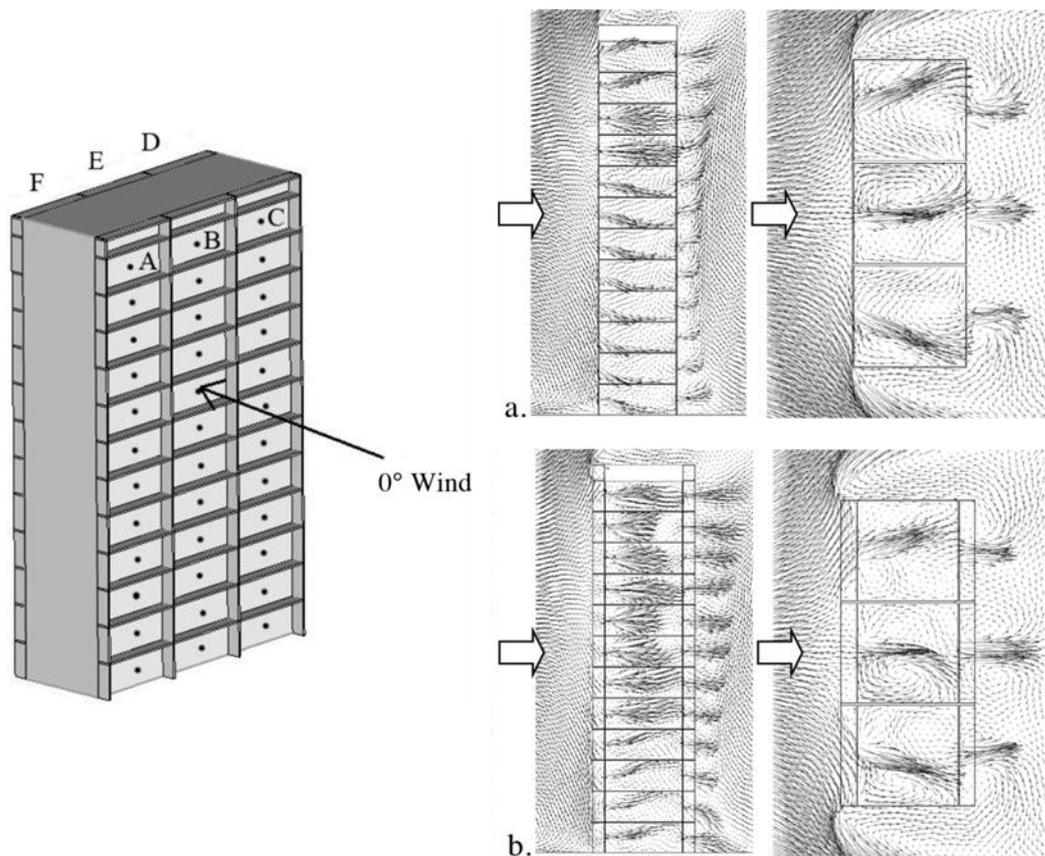


Gambar 2.9 Aliran angin di dalam bangunan yang dipengaruhi posisi lubang *inlet* dan tekanan di permukaan dinding luar (Lippsmeier, 1997)

Berdasarkan gambar A dan B di atas, dapat diidentifikasi bahwa pada ventilasi silang di bangunan satu ruang berbentuk persegi, posisi lubang masuk atau *inlet* secara horizontal akan mempengaruhi arah aliran udara yang terjadi di dalam ruangan. Hal ini dikarenakan pada kondisi bangunan tersebut, posisi *inlet* akan mempengaruhi tekanan yang terjadi di sekitar *inlet* tersebut sehingga pada akhirnya arah aliran udara akan terpengaruh juga. Sementara itu, gambar C, D dan E menunjukkan bahwa arah aliran udara secara vertikal di dalam ruangan juga dipengaruhi oleh tekanan yang ada di atas dan di bawah posisi *inlet*. Apabila tekanan pada bagian atas *inlet* lebih besar daripada tekanan dari bawah, maka

udara cenderung mengalir pada ketinggian manusia, namun apabila tekanan dari bawah lebih besar daripada tekanan dari atas *inlet*, maka udara cenderung bergerak naik dan mengalir di dekat langit-langit ruangan.

Meski demikian, hasil penelitian yang dilakukan oleh Mohamed (2014) dkk menunjukkan bahwa adanya balkon dapat membantu mengarahkan aliran udara di dalam ruang menjadi lebih sejajar dengan ketinggian manusia.



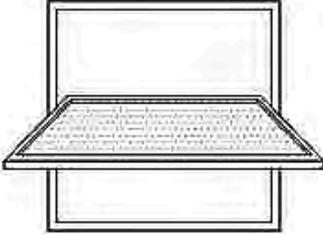
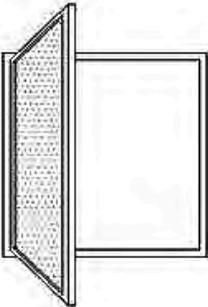
Gambar 2.10 Aliran angin di dalam ruangan pada bangunan *high-rise* (a) tanpa balkon dan (b) dengan balkon (Mohamed dkk, 2014)

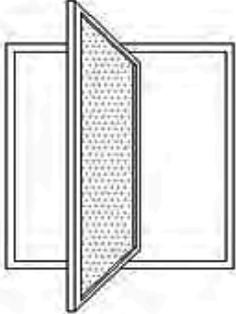
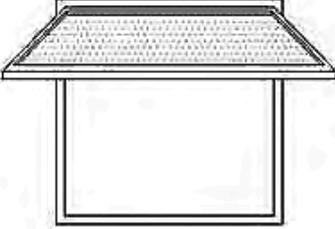
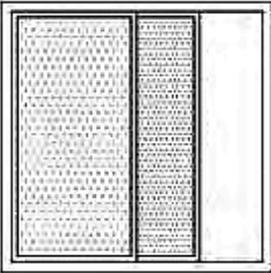
Gambar 2.10 a menunjukkan bahwa aliran udara di dalam ruang pada bangunan tanpa balkon sangat terpengaruh oleh arah angin di dekat permukaan luar bangunan. Sementara itu, pada bangunan dengan balkon (gambar 2.10 b), aliran udara pada sebagian besar lantai dapat diarahkan menjadi lebih sejajar di tengah ruangan hingga mencapai lubang keluar. Hal tersebut menunjukkan bahwa elemen balkon cukup efektif dalam membantu mengarahkan aliran udara di dalam ruangan agar lebih sejajar dengan ketinggian manusia.

Pada penelitian tersebut disebutkan juga bahwa kedalaman dari balkon dapat mempengaruhi kinerja dari ventilasi silang. Balkon yang terlalu dalam (kedalaman sekitar 3 m atau lebih) justru dapat mengurangi *ventilation rate* apabila dibandingkan dengan balkon dengan kedalaman 1,5 m. Arah angin luar juga sangat mempengaruhi kinerja ventilasi silang bangunan dengan balkon. *Ventilation rate* paling besar dihasilkan pada kondisi arah kedatangan angin 0° sementara *ventilation rate* terendah dihasilkan pada kondisi arah datang angin 90° . Dengan demikian, desain balkon dan desain layout bangunan secara keseluruhan juga perlu diperhatikan agar dapat menghasilkan ventilasi silang yang lebih maksimal.

Elemen lain yang juga dapat mempengaruhi adalah tipe jendela yang digunakan sebagai lubang masuk angin. Berikut ini merupakan tipe-tipe jendela beserta karakteristiknya masing-masing menurut Awbi (2003):

Tabel 2.4 Tipe-tipe jendela beserta karakteristiknya

Tipe Jendela	Karakteristik Jendela
<p data-bbox="384 1151 568 1182"><i>Vertical Pivot</i></p> 	<p>Jendela tipe ini memiliki <i>flow area</i> yang cukup besar sehingga mampu menghasilkan <i>air flow rate</i> yang besar pula. Saat digunakan sebagai ventilasi satu sisi, udara masuk melalui bagian bawah dan keluar dibagian atas apabila suhu di luar cukup rendah. Sementara itu pada ventilasi silang, udara dapat masuk lewat bagian atas dan bawah secara bersamaan. Meski demikian jendela tipe ini cenderung membuat udara mengalir ke arah atas.</p>
<p data-bbox="411 1482 541 1514"><i>Side hung</i></p> 	<p>Jendela tipe ini memiliki area efektif yang lebih rendah daripada tipe sebelumnya sehingga <i>air flow rate</i> yang dihasilkan juga lebih rendah. Pada jendela tipe ini, udara dapat masuk secara menyamping dan pada ketinggian yang rendah. Kelemahan dari jendela ini adalah rentan terkena hembusan angin kencang hingga terbuka penuh, serta mudah membawa masuk air hujan.</p>

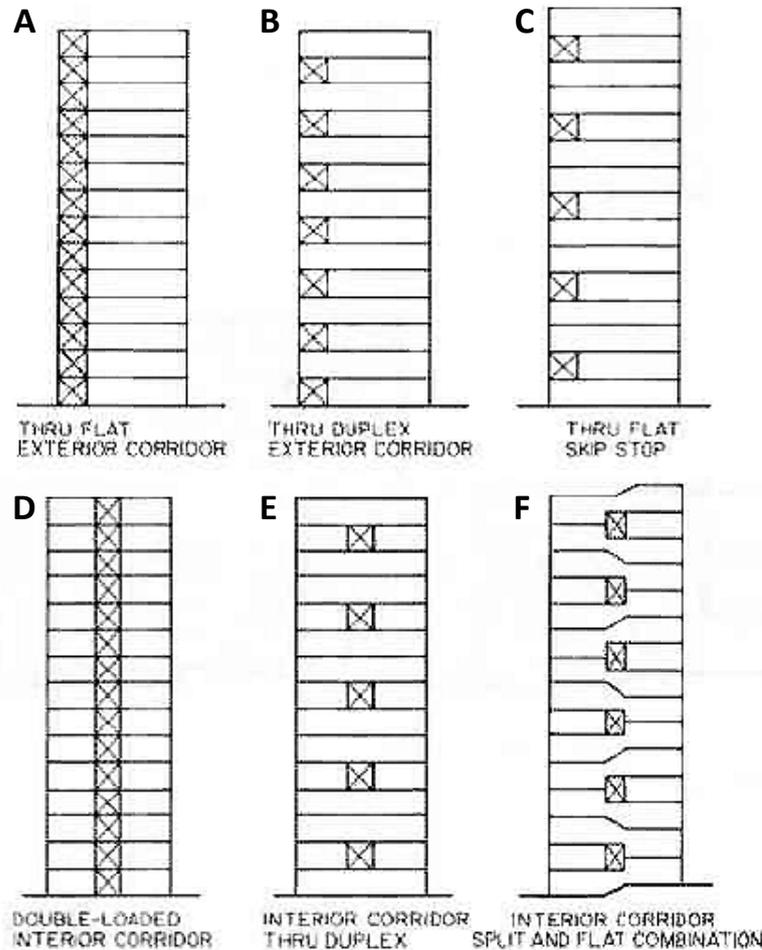
<p style="text-align: center;"><i>Vertical pivot</i></p> 	<p>Jendela tipe ini memiliki kinerja yang hampir sama dengan tipe jendela horizontal-pivot. Kelebihan dari jendela ini adalah dapat berfungsi sebagai wind scope atau penangkap angin saat angin berhembus dari arah samping.</p>
<p style="text-align: center;"><i>Top/bottom hung</i></p> 	<p>Jendela tipe ini memiliki <i>flow area</i> yang lebih kecil daripada tipe-tipe sebelumnya karena area yang terbuka hanya terbatas di bagian bawah atau atas saja. Jendela ini memiliki kinerja paling baik saat digunakan sebagai ventilasi satu sisi saat cuaca dingin. Namun demikian, jendela tipe ini kurang efektif saat digunakan pada musim panas, terutama untuk mengalirkan udara ke zona-zona yang dihuni manusia karena udara cenderung mengalir ke zona yang tidak dihuni.</p>
<p style="text-align: center;"><i>Vertical/horizontal slide</i></p> 	<p>Jendela tipe ini memiliki kinerja yang mirip dengan jendela tipe <i>vertical/horizontal pivot</i>. Kelebihan dari jendela tipe ini adalah kemudahan untuk mengatur luas bukaannya.</p>

Sumber: Diadaptasi dari Awbi (2003)

Berdasarkan penjelasan pada tabel di atas, kelebihan dan kekurangan masing-masing tipe jendela dapat diketahui. Apabila dikaitkan dengan kondisi aliran angin di permukaan bangunan tinggi yang didominasi oleh aliran ke arah vertikal, maka jendela tipe *horizontal pivot* dapat memberikan keuntungan dengan berfungsi sebagai *wind scope*. Sedangkan pada bangunan yang mendapatkan banyak aliran ke arah samping, maka jendela tipe *vertical pivot* akan memberikan keuntungan lebih sebagai penangkap angin.

2.6 Bangunan Apartemen

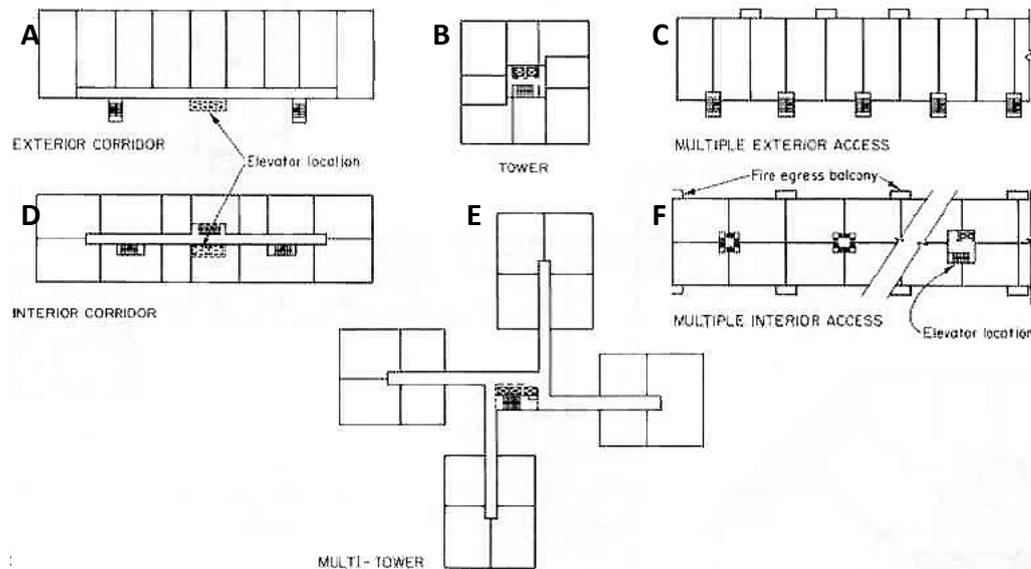
Tipe bangunan apartemen dapat dibagi berdasarkan letak koridornya secara vertikal (Chiara & Callender, 1983) yaitu:



Gambar 2.11 Tipe Apartemen Berdasarkan Letak Koridornya (A) Thru Flat Exterior Corridor (B) Thru Duplex Exterior Corridor (C) Thru Flat Skip Stop (D) *Double loaded* Interior Corridor (E) Interior Corridor Thru Duplex (F) Interior Corridor Split and Flat Combination (Chiara & Callender, 1983)

Tipe-tipe apartemen yang ada di Surabaya umumnya merupakan tipe *double-loaded interior corridor* yang memiliki koridor di tengah pada setiap lantai. Tipe ini sering dipilih karena strukturnya yang relatif lebih sederhana dan memudahkan untuk menyusun jalur sirkulasi dan sistem pendukung lainnya.

Selain itu tipe bangunan apartemen juga dapat dibedakan dari letak koridornya pada layout bangunan (Chiara & Callender, 1983) seperti ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 2.12 Tipe Apartemen Berdasarkan Letak Koridornya Secara Horizontal (A) Exterior Corridor (B) Interior Corridor (C) Tower (D) Multi Tower (E) Multiple Exterior Access (F) Multiple Interior Access (Chiara & Callender, 1983)

Apartemen dengan tipe *interior corridor double loaded* sering dijumpai di Surabaya karena memiliki layout yang kompak dan efisien. Unit-unit apartemen pada tipe tersebut terletak di kedua sisi koridor yang terletak di tengah. Hal tersebut menyebabkan sebagian besar unit apartemen hanya memiliki satu sisi dinding yang menghadap keluar dan dapat dijadikan bukaan atau jendela.

Berdasarkan jumlah ruang yang dimiliki, unit apartemen dapat dikategorikan sebagai berikut (Akmal, 2007):

- Studio

Unit apartemen ini hanya memiliki satu ruang yang bersifat multifungsi antara lain sebagai ruang duduk, kamar tidur dan dapur yang semuanya terbuka tanpa partisi. Satu-satunya ruang yang terpisah hanya kamar mandi. Tipe ini sesuai dihuni oleh satu orang atau pasangan yang belum memiliki anak. Luas minimum unit ini berkisar antara 20-35 m².

- Apartemen 1,2,3 kamar/apartemen keluarga

Pembagian ruang apartemen ini mirip dengan rumah biasa. Tipe ini memiliki kamar tidur terpisah serta ruang duduk, ruang makan, dapur yang bias terbuka dalam satu ruang atau terpisah. Luas apartemen tipe ini sangat beragam tergantung ruang yang dimiliki serta jumlah kamarnya. Luas minimal untuk satu kamar tidur yaitu 25 m², 2 kamar tidur sebesar 30 m², 3 kamar tidur sebesar 85², dan 4 kamar tidur mencapai 140 m².

- *Loft*

Loft adalah bangunan bekas gudang atau pabrik yang kemudian dialihfungsikan sebagai apartemen. Caranya adalah dengan menyekat-nyekat bangunan besar ini menjadi beberapa unit hunian. Keunikan *loft apartment* adalah biasanya memiliki ruang yang tinggi serta *mezzanine* atau dua lantai dalam satu unit. Bentuk bangunannya pun cenderung berpenampilan industrial. Meski demikian beberapa pengembang kini menggunakan istilah *loft* untuk apartemen dengan *mezzanine* atau dua lantai walaupun dalam bangunan yang baru.

- *Penthouse*

Unit hunian ini berada di lantai paling atas sebuah bangunan apartemen. Luasnya lebih besar daripada unit-unit dibawahnya. Bahkan, kadang-kadang satu lantai hanya ada satu atau dua unit saja. Selain lebih mewah, *penthouse* juga lebih privat karena memiliki lift khusus untuk penghuninya. Tipe ini memiliki luas minimum mencapai 300 m².

Tipe unit apartemen yang paling umum ditemukan pada gedung-gedung apartemen yang ada di Surabaya adalah tipe *multiroom* dengan 2 atau 3 kamar serta tipe studio. Jenis *Penthouse* lebih jarang ditemukan karena umumnya hanya terdapat pada gedung apartemen yang kelasnya lebih mewah. Sementara itu, jenis *loft* tidak ditemukan di Surabaya karena umumnya gedung apartemen di Surabaya merupakan bangunan baru.

Selain itu jenis apartemen juga dapat dibedakan berdasarkan ketinggian bangunan atau jumlah lantai yang dimiliki. Berdasarkan Akmal (2007) kategori bangunan apartemen tersebut adalah sebagai berikut:

- *High-rise Apartment*

Bangunan apartemen ini memiliki lebih dari sepuluh lantai dan dilengkapi area parkir bawah tanah, system keamanan dan servis penuh. Struktur apartemen lebih kompleks sehingga desain unit apartemen cenderung mirip satu sama lainnya. Jenis ini banyak di bangun di pusat kota.

- *Mid-Rise Apartment*

Bangunan apartemen yang terdiri dari tujuh sampai dengan sepuluh lantai. Jenis apartemen ini lebih sering dibangun di kota satelit.

- *Low-Rise Apartment*

Apartemen dengan ketinggian kurang dari tujuh lantai dan menggunakan tangga sebagai alat transportasi vertikal. Biasanya untuk golongan menengah kebawah.

- *Walked-up Apartment*

Bangunan apartemen yang terdiri atas tiga sampai dengan enam lantai. Apartemen ini kadang-kadang memiliki lift, namun ada juga yang tidak menggunakan. Jenis apartemen ini disukai oleh keluarga yang lebih besar (keluarga inti ditambah orang tua). Gedung apartemen ini hanya terdiri atas dua atau tiga unit apartemen.

Bangunan apartemen di Surabaya umumnya merupakan tipe bangunan *high-rise*. Apartemen-apartemen tersebut umumnya memiliki beberapa *tower* sekaligus yang masing-masing *tower*-nya memiliki lebih dari 10 lantai. Meski demikian ada pula apartemen yang bangunannya bertipe *mid-rise* atau *low-rise* namun populasinya jauh lebih sedikit daripada apartemen *high-rise*.

2.7 Sistem Ventilasi pada Bangunan Apartemen

Sebagian besar apartemen yang ada di Surabaya memiliki desain yang kompak dengan pertimbangan efisiensi lahan dan biaya konstruksi, terutama untuk apartemen kelas menengah ke atas. Hal ini dapat dilihat dari bentuk geometri bangunan yang memiliki banyak kemiripan antara satu apartemen dengan lainnya. Bangunan apartemen kelas menengah ini umumnya memiliki denah bangunan berbentuk persegi panjang, atau menyerupai huruf L atau U

dengan koridor yang terletak di tengah dan unit-unit apartemen berada di kedua sisi bangunan. Desain ini memiliki keunggulan dari segi efisiensi lahan dan konstruksi bangunan.

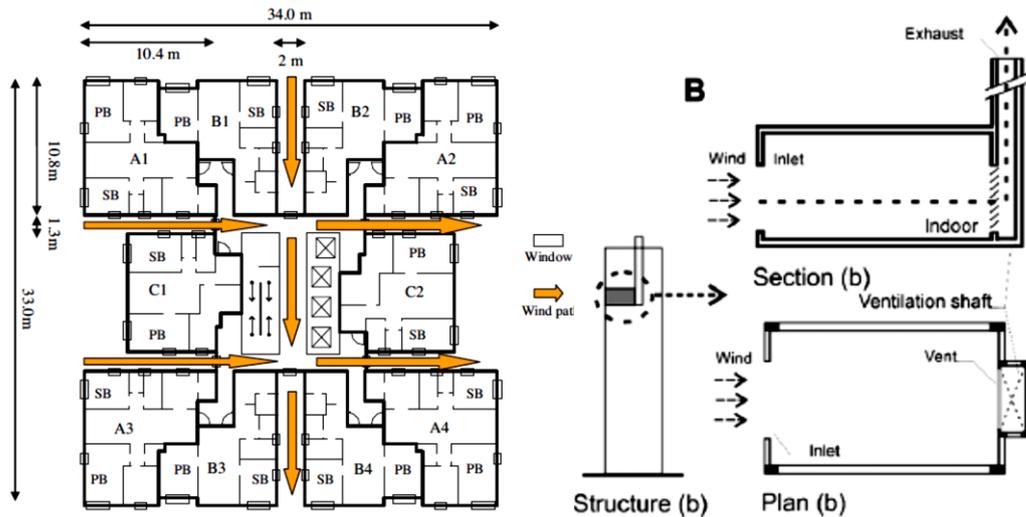
Meski demikian, desain yang kompak tersebut kurang efektif untuk menciptakan ventilasi alami pada sebagian besar unit apartemen yang ada di bangunan tersebut. Hal ini disebabkan oleh terbatasnya akses untuk menciptakan bukaan ke arah luar pada sebagian besar unit apartemen, terutama unit-unit yang terletak di bagian tengah bangunan. Unit-unit tersebut hanya memiliki satu sisi dinding yang dapat mengakses udara luar. Kondisi tersebut kurang ideal untuk menghasilkan ventilasi alami yang efektif seperti yang disebutkan oleh Allard (1998) bahwa unit apartemen setidaknya harus memiliki dinding yang pada sisi yang menghadap arah angin (*windward*) dan sisi yang membelakangi arah angin (*leeward*) untuk menciptakan ventilasi silang yang efektif. Oleh karena itu, sebagian besar unit apartemen ini mengandalkan ventilasi satu sisi atau *one sided ventilation* dan ventilasi buatan atau *air conditioner* untuk menyuplai kebutuhan udara dan menciptakan kenyamanan di dalam ruangan. Strategi *one-sided ventilation* ini dinilai masih kurang efektif apabila dibandingkan dengan ventilasi silang. Hal ini sesuai dengan yang disebutkan oleh Mumovic (2009) bahwa *one-sided ventilation* hanya efektif sampai 2,5 kali tinggi ruangan, sementara *cross ventilation* efektif sampai 5 kali tinggi ruangan. Berdasarkan hal tersebut dapat diidentifikasi bahwa jenis ventilasi alami yang ideal untuk bangunan apartemen adalah ventilasi silang yang dinilai dua kali lebih efektif dibanding ventilasi satu sisi.

2.7.1 Ventilasi Alami pada Bangunan Apartemen

Upaya untuk menemukan strategi penghawaan alami yang efektif pada bangunan apartemen telah dilakukan oleh beberapa peneliti terdahulu. Salah satu langkah yang ditempuh adalah dengan memodifikasi unit apartemen yang awalnya hanya memiliki ventilasi satu sisi sehingga dapat memperoleh ventilasi silang. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Zhou dkk (2014) dan Prajongsan dkk (2011) yang berupaya menciptakan ventilasi silang pada bangunan apartemen berkategori *high-rise* namun dengan cara yang berbeda.

Masing-masing penelitian ini dilakukan di Chongqing, Cina (Zhou dkk, 2014) dan di Bangkok, Thailand (Prajongsan dkk, 2011).

Strategi yang diterapkan pada penelitian yang dilakukan oleh Zhou dkk (2014) adalah dengan menciptakan jalur angin dengan memanfaatkan koridor sirkulasi yang ada di antara unit-unit apartemen. Modifikasi pada unit apartemen dilakukan dengan menambahkan bukaan yang mengarah ke jalur angin sehingga unit tersebut memiliki dua akses terhadap angin yaitu dari bukaan ke arah luar dan bukaan ke arah koridor yang dapat dilewati oleh angin. Strategi lain yang diusulkan oleh Prajongsan dkk (2011) adalah dengan menambahkan *ventilation shaft* yang memiliki fungsi yang mirip dengan jalur angin pada penelitian Zhou dkk (2014) namun arahnya vertikal.



Gambar 2.13 A) Jalur Angin Yang Memanfaatkan Area Koridor (Zhou dkk, 2014) dan B) *Ventilation Shaft* (Prajongsan dkk, 2011)

Kedua strategi tersebut diklaim cukup efektif untuk menyediakan ventilasi alami yang efektif. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Prajongsan dkk (2011) penggunaan *ventilation shaft* ini dapat meningkatkan kedalaman penetrasi angin apabila dibandingkan dengan ruangan yang tidak menggunakan *ventilation shaft*. Selain itu, *ventilation shaft* juga diklaim mampu meningkatkan aliran udara. Pada ruangan yang menggunakan *ventilation shaft*, kecepatan angin *indoor* rata-ratanya adalah sebesar 20% - 36% dari kecepatan angin luar referensi, dan kecepatan maksimumnya mampu mencapai 60% - 67%. Sementara itu, ruangan yang tidak menggunakan *ventilation shaft* akan memperoleh aliran udara yang

konstan dan tidak banyak terpengaruh oleh kecepatan angin dari luar. Aliran udara di dalam ruang cukup kecil dengan kecepatan rata-rata 1% - 5% dari kecepatan angin luar yang menjadi referensi. Sementara itu, pada penelitian yang dilakukan oleh Zhou dkk (2014) desain yang menggunakan jalur angin horizontal diklaim mampu mengurangi *age of air* pada 90% ruangan yaitu kurang dari 6 menit dibandingkan dengan *age of air* pada desain konvensional yang dapat mencapai lebih dari 30 menit.

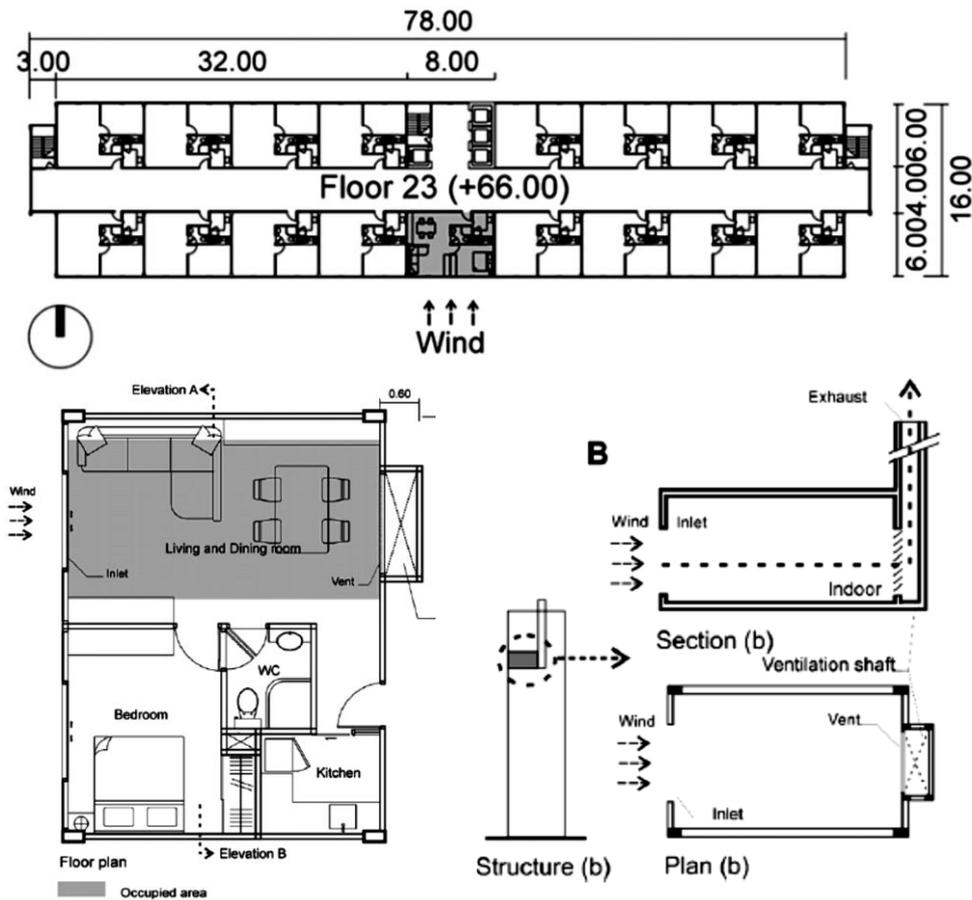
2.8 Ventilation Shaft

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, *ventilation shaft* merupakan suatu upaya untuk menciptakan ventilasi silang pada unit residensial yang awalnya hanya memiliki ventilasi satu sisi. Elemen-elemen yang mendasari strategi penggunaan *ventilation shaft* pada bangunan apartemen antara lain:

- Jendela pada tiap unit apartemen. Fungsi dari jendela ini adalah sebagai lubang masuk untuk angin yang berasal dari luar. Luasan jendela ini dinyatakan sebagai ukuran lebar kali tingginya.
- *Ventilation shaft* merupakan saluran vertikal yang berfungsi untuk mengalirkan udara ke atas. Luas penampang dari *ventilation shaft* ini juga menjadi ukuran lubang *outlet* yang terletak di ujung *shaft* pada atap bangunan.
- Lubang penghubung antara *shaft* dengan ruang unit apartemen merupakan lubang yang menghubungkan rongga vertikal *ventilation shaft* dengan ruang yang ada pada unit apartemen.
- Posisi saluran terletak di sisi dinding yang berlawanan dengan jendela pada tiap unit apartemen seperti pada gambar 2.6 bawah kiri.

Detail dari *ventilation shaft* adalah seperti gambar 2.6. Berdasarkan gambar tersebut, dapat dilihat bahwa *ventilation shaft* ini merupakan saluran vertikal berukuran 1,5m x 0,6m yang terletak pada dinding di sisi seberang dari bukaan ke arah luar. Ujung dari saluran vertikal ini berada di bagian atap bangunan dan selalu dalam kondisi terbuka yang juga merupakan lubang *outlet* untuk aliran udara dari dalam bangunan. *Ventilation shaft* ini terhubung ke dalam

ruangan melalui suatu lubang berukuran 1,5m x 1,2m yang memiliki *grill* atau kisi-kisi yang dapat dibuka atau ditutup.

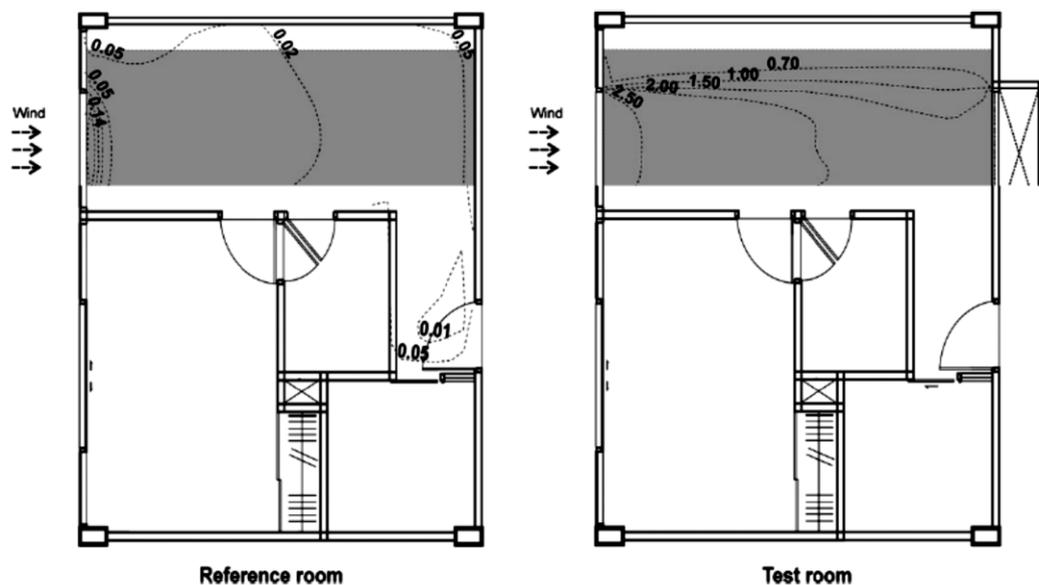


Gambar 2.14 Layout bangunan *hypothetical* yang digunakan (Atas), Posisi Penempatan *Ventilation Shaft* Pada Unit apartemen (Kiri) dan Gambar Potongan Unit Apartemen Dengan *Ventilation Shaft* (Kanan) (Prajongsan dkk, 2011)

Berdasarkan gambar di atas dapat dilihat bahwa area yang dilewati aliran udara adalah daerah ruang keluarga dan ruang makan pada gambar 2.6 sebelah kiri. Angin masuk dari luar melalui jendela dan mengalir di dalam ruangan lurus menuju ke *ventilation shaft* yang berada pada sisi yang berseberangan dari jendela. *Wind forced ventilation* akan bekerja karena adanya perbedaan tekanan yang bernilai positif pada permukaan fasad bangunan di arah *windward* dengan tekanan bersifat negatif pada permukaan atas bangunan. Dengan demikian aliran udara tersebut akan terdorong melewati *ventilation shaft* menuju ke ujung *shaft* di

bagian atap bangunan. Ujung dari *ventilation shaft* yang berada di atap bangunan tersebut akan selalu terbuka sehingga aliran udara dapat keluar ke atas.

Strategi ini memiliki potensi untuk dapat diterapkan pada bangunan apartemen berkategori *high-rise* karena adanya peningkatan kecepatan udara seiring dengan bertambahnya ketinggian bangunan dan adanya tekanan negatif yang besar pada atap datar bangunan *high-rise* sehingga dapat menciptakan perbedaan koefisien tekanan atau C_p yang cukup untuk menciptakan *wind driven ventilation* (Prajongsan dkk, 2011). Strategi ini juga diklaim mampu meningkatkan penetrasi angin ke dalam ruangan seperti ditunjukkan pada gambar 2.10 di bawah.



Gambar 2.15 Perbandingan Tingkat Penetrasi Angin pada Ruang Tanpa *Ventilation Shaft* (kiri) dan Ruang Dengan *Ventilation Shaft* (kanan) (Prajongsan dkk, 2011)

Berdasarkan gambar di atas, dapat dilihat bahwa pada gambar kiri ruangan yang tidak memiliki *ventilation shaft* hanya mengalami pergerakan udara yang kecil dan lebih terpusat di dekat area jendela, sementara pada ruangan yang menggunakan *ventilation shaft*, terjadi aliran udara dengan kecepatan yang cukup tinggi antara 0,7 m/s hingga 2 m/s. Hal tersebut menunjukkan bahwa angin dapat

masuk lebih jauh ke dalam ruangan bila dibandingkan dengan ruangan tanpa *ventilation shaft*.

Meski demikian sistem *shaft* yang diteliti oleh Prajongsan dkk (2011) masih terbatas hanya terhubung dengan satu unit residensial, sedangkan pada kondisi sebenarnya *shaft* tersebut seharusnya terhubung dengan unit-unit residensial sebanyak jumlah lantai yang ada pada bangunan tersebut.

2.9 Percabangan pada Ventilation Shaft

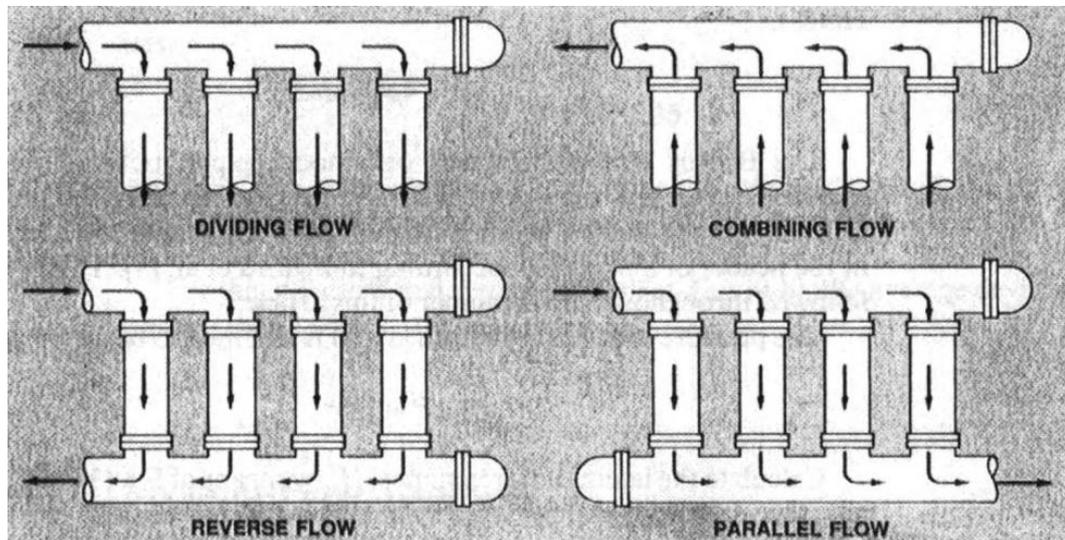
Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, *ventilation shaft* dapat digunakan untuk menciptakan ventilasi silang pada ruangan yang hanya memiliki akses keluar pada salah satu dindingnya. *Ventilation shaft* ini berfungsi sebagai saluran yang mengalirkan udara ke lubang keluar di bagian atap bangunan. Apabila *ventilation shaft* ini terhubung dengan ruangan-ruangan pada beberapa lantai sekaligus, maka *shaft* tersebut akan berfungsi sebagai saluran penampung aliran udara dari beberapa *inlet* sekaligus kemudian meneruskannya ke lubang keluar atau *outlet* di bagian atap bangunan.

Permasalahan mengenai percabangan dengan multi-*inlet* dan *outlet* tunggal yang melibatkan banyak zona seperti pada sistem *ventilation shaft* ini masih jarang dibahas di dalam teori-teori ventilasi silang secara umum maupun teori mengenai ventilasi silang pada multi-zona. Hal ini dapat dipahami karena kasus yang demikian masih jarang ditemui dan termasuk permasalahan yang cukup kompleks. Oleh karena itu diperlukan teori tambahan mengenai masalah percabangan tersebut. Teori mengenai percabangan ini dapat ditemukan pada ilmu perpipaan yang membahas mengenai percabangan pipa atau disebut dengan *manifolds*.

2.9.1 Manifolds

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, *manifolds* merupakan suatu pipa yang memiliki percabangan ke beberapa pipa lain. Percabangan ini dapat berfungsi sebagai pembagi aliran dari pipa induk (*header*) ke pipa cabang (*lateral*) atau sebagai pengumpul aliran yang berasal dari pipa cabang. *Manifolds* ini memiliki beberapa tipe berdasarkan arah aliran dan konfigurasinya (McKetta,

1992) yaitu *dividing flow*, *combining flow*, *reverse flow* dan *parallel flow* (gambar 2.13).



Gambar 2.16 Tipe-tipe *manifolds* (atas) (McKetta, 1992)

Berdasarkan deskripsi mengenai jenis-jenis *manifold* di atas, dapat diidentifikasi bahwa sistem *ventilation shaft* dengan banyak cabang memiliki kesamaan dengan jenis *combining flow manifold*. *Combining flow manifold* terdiri dari beberapa saluran *inlet*, yang juga disebut sebagai saluran *lateral*, kemudian aliran dari beberapa *inlet* itu disatukan di dalam satu saluran penampung yang menuju ke *outlet*, atau disebut dengan *header*. Hal tersebut identik dengan cara kerja sistem *ventilation shaft* yang memiliki banyak saluran *inlet* berupa ruangan-ruangan pada beberapa lantai yang mendapatkan aliran udara dari luar, kemudian aliran-aliran tersebut disatukan di dalam *ventilation shaft* dan dikeluarkan melalui *outlet* di atap bangunan. Pada sistem *ventilation shaft*, teori-teori mengenai ventilasi alami seperti teori mengenai *wind forced ventilation* digunakan sebagai teori dasar untuk menjelaskan mekanisme penyebab terjadinya aliran udara. Sementara itu, teori mengenai *manifolds* lebih ditujukan untuk menjelaskan fenomena yang terjadi di dalam sistem *ventilation shaft* yang berkaitan dengan adanya percabangan. Dengan demikian, teori dari bidang-bidang yang berbeda tersebut dapat digunakan untuk melengkapi satu sama lain.

Permasalahan utama yang sering ditemui di dalam *manifolds* ini adalah tidak meratanya kecepatan aliran fluida yang terjadi, baik di dalam pipa cabang atau disebut dengan *lateral* maupun pipa induk atau *header*. Oleh karena itu, *manifolds* ini perlu didesain sedemikian rupa agar distribusi aliran fluida yang terjadi dapat lebih merata. Berdasarkan Bajura & Jones (1976), beberapa faktor yang berhubungan dengan desain yang mempengaruhi distribusi aliran di dalam *manifold* antara lain:

- *Area ratio – Porosity of the header*: *Area ratio* atau porositas dari *header* merupakan perbandingan antara jumlah total diameter pipa *lateral* (diameter *lateral* x n banyaknya pipa *lateral*) dengan diameter pipa *header*. Semakin besar *area ratio*, maka aliran yang seragam akan semakin sulit terjadi.
- *Lateral Resistance*: Yaitu besarnya resistansi atau hambatan yang dihasilkan oleh pipa *lateral*. Pada umumnya, semakin besar resistansi dari pipa *lateral*, maka kemungkinan distribusi aliran akan semakin baik
- *Lenght/diameter ratio of header*. Yaitu perbandingan antara panjang pipa *header* dengan diameternya. Perbandingan ini berhubungan dengan *friction* atau kekasaran permukaan dalam pipa. Efek dari *friction* ini akan sangat berpengaruh terutama pada pipa-pipa yang panjang atau memiliki rasio panjang/diameter yang besar.

Penjelasan di atas merupakan faktor-faktor yang mempengaruhi distribusi aliran pada *manifolds* secara umum. Sementara itu, masalah distribusi pada *combining flow manifold* secara lebih spesifik juga dijelaskan oleh Chen dkk (2003) bahwa aliran yang masuk ke *lateral* yang jauh dari lubang *outlet* akan mengalami *junction losses*, atau hilangnya energi aliran fluida akibat adanya percabangan, yang lebih besar daripada aliran yang masuk ke *lateral* yang dekat dengan *outlet*. Apabila semua *lateral* memiliki diameter yang sama, maka semakin jauh dari *outlet*, *lateral discharge* (debit) yang dihasilkan oleh *lateral* akan semakin berkurang (terjadi ketidakseragaman). Chen dkk juga menambahkan bahwa hal ini dapat diatasi dengan cara membuat diameter *lateral* semakin besar dari yang dekat dengan *outlet* hingga ke yang paling jauh, sehingga *lateral* yang paling jauh akan memiliki *outlet* paling besar sementara *lateral* yang dekat dengan *outlet* diameternya adalah yang paling kecil. Cara lain untuk

membuat distribusi aliran lebih seragam adalah memperbesar diameter pipa *header* (McKetta, 1992).

Teori mengenai *manifolds* tersebut dapat digunakan untuk menentukan faktor-faktor yang berhubungan dengan desain *ventilation shaft*. Meski demikian, penerapan teori-teori tersebut perlu disesuaikan dengan kondisi pada sistem *ventilation shaft*. Pada sistem *ventilation shaft*, fungsi pipa *header* ini dapat disamakan dengan fungsi dari *ventilation shaft*, sementara saluran *lateral*nya merupakan ruangan-ruangan yang terhubung dengan *shaft* tersebut, yang juga berfungsi sebagai saluran *inlet*. Perbedaan antara sistem *ventilation shaft* dengan *manifolds* adalah salurannya yang berupa ruangan-ruangan unit apartemen dan *shaft* dengan penampang berbentuk persegi panjang dibandingkan dengan saluran pada *manifolds* yang berupa pipa dengan penampang berbentuk lingkaran. Oleh karena itu, pada sistem *ventilation shaft*, fungsi dari diameter pipa pada saluran *lateral* dapat disamakan dengan fungsi luas bukaan masuk (*inlet*) dan bukaan internal yang menghubungkan ruangan dengan *shaft*. Sementara itu, fungsi dari diameter pipa *header* dapat disamakan dengan fungsi dari penampang *ventilation shaft*.

Faktor desain lain yang berpengaruh pada *manifolds* antara lain *area ratio*, *lateral resistance* serta rasio dari panjang/diameter pipa *header* (Bajura dkk, 1967). *Area ratio* atau porositas dari *header* merupakan perbandingan antara jumlah total diameter pipa *lateral* dengan diameter pipa *header*. Semakin besar *area ratio*, maka aliran yang seragam akan semakin sulit terjadi. Pada sistem *ventilation shaft*, faktor *area ratio* ini berkaitan erat dengan variabel jumlah ruangan yang terhubung dengan *ventilation shaft* serta variabel *inlet* dan bukaan internal yang mengatur seberapa besar aliran udara yang dapat melewati ruangan-ruangan tersebut. Apabila *inlet* dan bukaan internal pada tiap ruangan yang terhubung dengan *shaft* dan luas penampang *ventilation shaft* dibuat tetap, maka variabel jumlah ruangan yang terhubung dengan *shaft* akan menjadi faktor penentu besarnya *area ratio*. Dengan kata lain, semakin banyak jumlah ruangan yang terhubung dengan *shaft*, maka semakin sulit untuk mendapatkan kecepatan aliran yang seragam. Hal tersebut menunjukkan bahwa variabel jumlah ruangan

yang terhubung dengan *ventilation shaft* memiliki pengaruh yang penting untuk menghasilkan aliran udara yang lebih seragam di dalam sistem *ventilation shaft*.

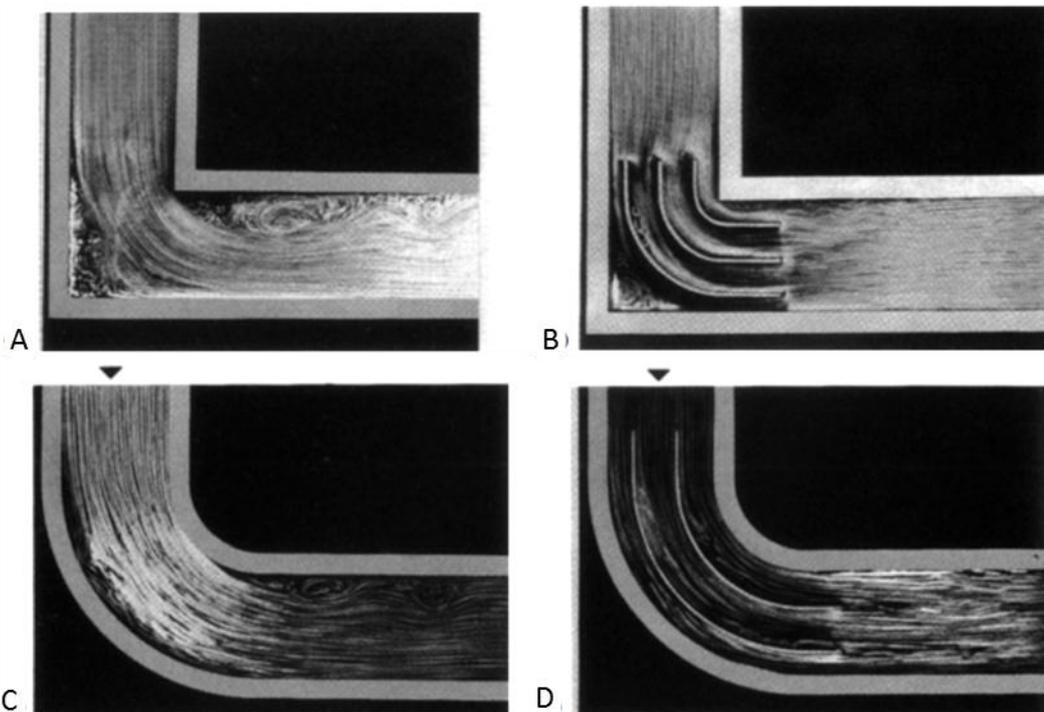
Faktor selanjutnya, *lateral resistance*, merupakan besarnya resistansi yang dihasilkan oleh saluran *lateral*. Pada sistem *ventilation shaft*, fungsi *lateral resistance* ini dapat disamakan dengan fungsi resistansi ruang dalam mengalirkan udara atau disebut juga dengan *internal discharge* (Cdi). Berdasarkan Chu dkk (2010) nilai dari *internal discharge* ini bergantung pada luasan bukaan internal serta tidak dipengaruhi oleh besarnya bukaan eksternal. Pada penelitiannya yang lain, Chu dkk (2010) juga menyebutkan apabila luas bukaan eksternal (*inlet* dan *outlet*) >5% dari luas dinding, maka besarnya bukaan internal memiliki pengaruh yang lebih dominan di dalam proses ventilasi silang. Hal ini menunjukkan bahwa pada sistem *ventilation shaft*, variabel luas bukaan internal dapat memberikan pengaruh yang lebih dominan di dalam mengatur aliran udara yang melewati ruangan dibandingkan dengan variabel luas *inlet*.

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, faktor ketinggian serta faktor kedekatan saluran *lateral* dengan *outlet* (yang dipengaruhi oleh *junction losses*) akan menyebabkan terjadinya ketidakseragaman aliran udara pada sistem *ventilation shaft*. Pada *manifold* bertipe *combining flow*, pengaruh dari *junction losses* dapat diatasi dengan cara memperbesar diameter pipa *lateral* dari yang dekat dengan *outlet* ke yang paling jauh dari *outlet*, sehingga *lateral* yang paling jauh akan memiliki diameter yang paling besar. Dengan demikian, debit yang dikeluarkan oleh tiap *lateral* adalah sama. Pada sistem *ventilation shaft*, keseragaman yang diharapkan adalah pada variabel kecepatan aliran udara di dalam ruangan. Hal ini dapat dicapai dengan mengatur besarnya resistansi ruangan (*internal discharge*) yang dipengaruhi oleh variabel bukaan internal, serta mengatur luas *inlet*. Pengaturan tersebut dapat disesuaikan dengan strategi yang disebutkan oleh Chen dkk (2003) di atas, yaitu membuat luas *inlet* dan bukaan internal semakin besar dari lantai atas ke lantai bawah.

Bentuk bukaan internal juga dapat mempengaruhi pembelokan aliran udara yang terjadi saat aliran udara tersebut keluar dari lubang internal dan menuju ke dalam *shaft*. Pembelokan aliran tersebut menyebabkan terjadinya *turning loss*. Proses terjadinya *turning loss* tersebut telah dijelaskan oleh Shaughnessy dkk

(2005) yang menyebutkan bahwa pembelokan aliran fluida yang terjadi secara tiba-tiba dapat menyebabkan terjadinya eddy atau aliran berputar di area sudut setelah pembelokan. Adanya pembentukan formasi dari eddy tersebut disebut dengan istilah *flow separation*. Adanya eddy atau *flow separation* ini dapat menyebabkan pengurangan luas penampang efektif dari pipa atau saluran tersebut serta mengakibatkan hilangnya sebagian dari energi mekanik aliran fluida (*turning loss*). Luas penampang efektif dari saluran dapat berkurang karena tidak ada aliran downstream (aliran yang menuju ke arah *outlet*) yang melewati area yang terdapat eddy.

Bajura & Jones (1971) menyebutkan bahwa resistansi saluran *lateral* terdiri atas beberapa faktor yaitu *head velocity* yang dihasilkan *lateral* tersebut, *turning loss*, serta *friction* yang dihasilkan oleh *lateral* tersebut. Sementara itu, berdasarkan penjelasan sebelumnya, Bajura & Jones (1976) juga menyebutkan bahwa resistansi dari *lateral* juga dapat mempengaruhi distribusi aliran di dalam suatu *manifolds*. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa *turning loss* secara juga dapat mempengaruhi resistansi *lateral* yang selanjutnya dapat mempengaruhi distribusi aliran di dalam *manifolds*.



Gambar 2.17 Aliran fluida pada pembelokan pipa atau *bend* (A) tanpa elemen pengarah, (B) dengan elemen pengarah, (C) pada gradual *bend* tanpa elemen pengarah, (D) pada gradual *bend* dengan elemen pengarah (Shaughnessy dkk, 2005)

Gambar di atas menunjukkan proses terjadinya *turning loss* yang disebabkan oleh adanya eddy di area sudut setelah terjadinya pembelokan. Shaughnessy dkk (2005) juga menyebutkan bahwa efek *turning loss* tersebut dapat dikurangi dengan cara menambahkan elemen pengarah. Dari gambar di atas dapat diidentifikasi pula bahwa *gradual bend* (gambar 2.14 C) dapat menghasilkan eddy yang lebih sedikit dibandingkan dengan belokan dengan sudut yang tajam (gambar 2.14 A). Apabila diaplikasikan pada sistem *ventilation shaft*, efek *turning loss* tersebut dapat dikurangi dengan cara memodifikasi bukaan internal dari yang tegak lurus terhadap *shaft*, menjadi menyudut, serta menambahkan elemen pengarah berupa grill yang dipasang pada bukaan internal tersebut.

Tingkat distribusi dari aliran fluida di dalam suatu *manifolds* dapat diukur berdasarkan perbedaan debit yang dihasilkan oleh masing-masing *lateral*. Bajura & Jones (1971) menyebutkan bahwa *flow unbalance* pada combining manifold (U_c) dapat didefinisikan sebagai rasio dari debit maksimum yang dibagi dengan debit minimum yang dihasilkan oleh pipa-pipa *lateral*. Dengan demikian, nilai *flow unbalance* tersebut juga dapat digunakan sebagai indikator dari distribusi aliran udara yang dihasilkan oleh tiap-tiap lantai di dalam suatu sistem *ventilation shaft*.

2.10 Sintesa Kajian Pustaka

Wind forced ventilation atau ventilasi alami berdasarkan tekanan angin merupakan salah satu mekanisme di dalam terjadinya penghawaan alami. Aynsley (1977) menyebutkan bahwa mekanisme *wind forced ventilation* disebabkan oleh adanya perbedaan tekanan angin pada bukaan *inlet* dan bukaan *outlet*. Pada bangunan apartemen yang memiliki koridor bertipe *double loaded inner corridor*, yaitu bangunan apartemen dengan konfigurasi unit-unit apartemen di kedua sisi bangunan serta koridor yang memanjang berada di tengah ruangan (Chiara & Callender, 1983), terdapat unit-unit apartemen yang hanya memiliki satu sisi yang terhubung dengan lingkungan luar bangunan. Untuk menghasilkan ventilasi alami

pada unit-unit tersebut, dapat dibuat bukaan *outlet* yang terletak di atap, kemudian dihubungkan ke unit apartemen tersebut melalui sebuah *shaft* sehingga dapat terjadi perbedaan tekanan antara bukaan *inlet* pada unit apartemen dengan *outlet* di area atap. Strategi ini memiliki potensi untuk dapat diterapkan pada bangunan apartemen berkategori *high-rise* karena adanya peningkatan kecepatan udara seiring dengan bertambahnya ketinggian bangunan dan adanya tekanan negatif yang besar pada atap datar bangunan *high-rise* sehingga dapat menciptakan perbedaan koefisien tekanan atau C_p yang cukup untuk menciptakan *wind driven ventilation* (Prajongsan dkk, 2011).

Apabila terdapat lebih dari satu lantai yang terhubung dengan *ventilation shaft*, maka sistem tersebut dapat dianggap sebagai sistem *ventilation shaft* bercapabng. Pada *combining flow manifold*, yang memiliki kesamaan cara kerja dengan sistem *ventilation shaft*, dapat terjadi ketidakseragaman aliran diakibatkan oleh adanya *junction losses* atau hilangnya energi aliran fluida akibat adanya percabangan. Chen dkk (2003) menyebutkan bahwa aliran dari pipa *lateral* yang jauh dari *outlet* akan mengalami *junction losses* yang lebih besar daripada aliran dari pipa *lateral* yang dekat dengan *outlet*. Hal ini mengakibatkan *lateral discharge*, atau debit keluar dari pipa *lateral* menuju pipa *header*, pada *lateral* yang jauh dari *outlet* akan lebih kecil daripada *lateral* yang dekat dengan *inlet*, apabila semua *lateral* memiliki diameter yang sama. Apabila dikaitkan dengan sistem *ventilation shaft*, saluran *lateral* yang paling dekat dengan *outlet* adalah ruangan yang berada paling atas, sementara ruangan di bagian bawah akan semakin jauh dari *outlet*, sehingga ruangan paling atas akan mendapatkan aliran yang lebih besar daripada ruangan di bagian bawah. Berdasarkan Chen dkk (2003), pada *manifolds* hal ini dapat diatasi dengan cara memperbesar diameter pipa *lateral* dari yang dekat *outlet* hingga yang paling jauh akan memiliki diameter *lateral* yang paling besar. Aplikasi teori ini pada sistem *ventilation shaft* adalah mengkonfigurasi bukaan-bukaan pada ruangan menjadi semakin besar dari yang lantai yang dekat dengan *outlet* ke yang paling jauh. Aplikasi tersebut diharapkan dapat meningkatkan pemerataan distribusi aliran udara di dalam sistem *ventilation shaft*. Berdasarkan Shaughnessy dkk (2005), proses pembelokan aliran udara juga dapat mengakibatkan berkurangnya energi aliran

atau disebut dengan *turning loss*. Efek *turning loss* tersebut dapat dikurangi dengan cara menggunakan *gradual bend* serta menambahkan elemen pengarah. Pada sistem *ventilation shaft*, hal tersebut dapat diterapkan dengan cara membuat bukaan internal menjadi menyudut (*miring*) dan menambahkan elemen pengarah pada bukaan tersebut.

Di dalam *manifolds*, memperbesar diameter *header* akan membuat aliran fluida yang dihasilkan lebih seragam (McKetta, 1992). Pada sistem *ventilation shaft*, diameter *header* pada teori di atas dapat diwakili oleh fungsi luas penampang dari *ventilation shaft*. Dengan demikian dapat diidentifikasi bahwa variabel luas penampang *ventilation shaft* akan memiliki pengaruh signifikan terhadap aliran udara yang dihasilkan. Bajura & Jones (1976) juga menyebutkan bahwa perbandingan antara panjang dengan diameter *header* juga dapat mempengaruhi aliran yang terjadi di dalam *manifolds*. Hal ini dipengaruhi oleh adanya *friction* yang terjadi antara permukaan dalam saluran *header* dengan aliran fluida. Semakin panjang saluran *header*, maka pengaruh *friction* tersebut akan semakin besar. Oleh karena itu, panjang dari saluran *header*, atau pada sistem *ventilation shaft* diwakili oleh panjang *shaft* itu sendiri, perlu menjadi pertimbangan.

Aynsley (1977) menyebutkan bahwa adanya gradien C_p pada permukaan sisi *windward* yang meningkat seiring bertambahnya ketinggian ini dipengaruhi oleh adanya gradien kecepatan angin lokal yang juga meningkat seiring dengan ketinggian. Gradien tekanan yang terjadi di permukaan sisi *windward* tersebut dapat menyebabkan besarnya C_p yang tersedia untuk masing-masing *inlet* pada sistem *ventilation shaft* menjadi berbeda-beda antara satu sama lain. Dengan demikian, dapat diduga bahwa letak ketinggian sistem *ventilation shaft* pada bangunan dapat mempengaruhi besarnya aliran udara yang dihasilkan tiap lantai pada sistem *ventilation shaft*.

Bajura & Jones (1976) telah menyebutkan bahwa nilai *area ratio*, atau perbandingan antara diameter *header* dengan total diameter *lateral*, dapat mempengaruhi tingkat distribusi aliran pada suatu *manifolds*. Semakin kecil nilai *area ratio*, maka distribusi aliran pada *manifolds* tersebut akan semakin merata. Pada sistem *ventilation shaft*, nilai *area ratio* dapat dikurangi dengan 2 cara, yaitu

memperbesar ukuran *shaft* atau dengan cara mengurangi jumlah lantai yang terhubung dengan sistem *ventilation shaft*. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa semakin besar ukuran *shaft* atau semakin sedikit jumlah lantai yang terhubung dengan *shaft*, maka distribusi aliran udara yang dihasilkan akan semakin merata.

Tingkat distribusi dari aliran fluida di dalam suatu *manifolds* dapat diukur berdasarkan perbedaan debit yang dihasilkan oleh masing-masing *lateral*. Bajura & Jones (1971) menyebutkan bahwa *flow unbalance* pada combining *manifold* (Uc) dapat didefinisikan sebagai rasio dari debit maksimum yang dibagi dengan debit minimum yang dihasilkan oleh pipa-pipa *lateral*. Dengan demikian, tingkat pemerataan distribusi aliran udara pada sistem *ventilation shaft* dapat diukur dengan cara membagi antara debit maksimum dengan debit minimum aliran udara yang dihasilkan oleh tiap lantai di dalam sistem *ventilation shaft* tersebut.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Paradigma dan Metode Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menghasilkan konsep *ventilation shaft* serta merumuskan pemahaman tentang pengaruh ketinggian dan elemen-elemen desain pada sistem *ventilation shaft* untuk diterapkan pada bangunan apartemen *high-rise*. Agar pengaruh dari variabel-variabel yang diteliti dapat diamati dengan jelas, maka penelitian harus dilakukan secara objektif. Hal ini sesuai dengan paradigma *positivism* karena paradigma tersebut memiliki asumsi bahwa realita dapat diamati sepenuhnya dan sifatnya yang mementingkan objektivitas sehingga peneliti dapat memanipulasi dan melakukan pengamatan secara objektif. Berdasarkan Groat & Wang (2002), kriteria mengenai paradigma *positivism* dapat dijelaskan sebagai berikut:

- Data yang digunakan di dalam penelitian harus sesuai dengan fenomena yang direpresentasikan. Penelitian ini menggunakan data dari BMKG sebagai sumber data, khususnya mengenai kecepatan angin di kota Surabaya. Agar dapat merepresentasikan kawasan objek penelitian dan ketinggian objek yang diamati, maka diperlukan penyesuaian data tersebut dengan menggunakan *power law*.
- Penelitian harus bersifat umum.
- Instrumen penelitian harus dapat menghasilkan hasil yang konsisten. Untuk memperoleh hasil yang konsisten, penelitian ini menggunakan *software* yang sudah banyak digunakan pada penelitian lainnya (Ansys Fluent) serta mengikuti prosedur yang direkomendasikan serta teruji hasilnya (Franke dkk, 2004, Revuz dkk, 2012).
- Penelitian harus bersifat objektif serta memiliki metode yang jelas dan hasilnya dapat diuji kembali dengan hasil yang konsisten.

Pemilihan metode penelitian ini harus disesuaikan juga dengan kebutuhan penelitian. Untuk mengetahui pengaruh ketinggian dan elemen-elemen desain yang berpengaruh terhadap kinerja *ventilation shaft* bercabang, maka diperlukan

metode penelitian yang memiliki fokus untuk melihat pengaruh dari variabel serta dapat melakukan manipulasi terhadap variabel-variabelnya. Berdasarkan kebutuhan tersebut, maka metode penelitian eksperimental dipilih sebagai metode di dalam penelitian ini. Berdasarkan Groat & Wang (2002)

- Penggunaan *treatment* dalam penelitian atau variabel independen. Variabel independen ini dapat berupa variabel bebas yang dapat dimanipulasi oleh peneliti maupun variabel kontrol yang dibuat tetap selama penelitian. Penggunaan *treatment* tersebut dapat dilihat pada sub bab 3.6 tentang rancangan eksperimen.
- Penggunaan grup kontrol sebagai pembanding untuk mengamati variabel-variabel yang diuji. Penelitian ini menggunakan satu grup kontrol atau disebut juga dengan model *base case*. Penjelasan mengenai detail penentuan grup kontrol dapat dilihat pada sub bab 3.6.2 mengenai penetapan grup kontrol.
- Adanya pemilihan *unit of assignment*, yaitu objek penelitian tersebut yang dapat dipilih secara acak maupun menggunakan kriteria tertentu. *Unit of assignment* dalam penelitian ini dipilih dengan menggunakan kriteria tertentu dan dijelaskan lebih detail pada sub bab 3.3 mengenai populasi dan sampel penelitian.
- Dapat dilakukannya pengukuran pada satu atau lebih variabel terikat yang merupakan dampak dari *treatment* yang dilakukan pada objek penelitian. Penelitian ini memiliki lebih dari satu variabel terikat yang telah dijelaskan lebih detail pada sub bab 3.7.
- Metode ini memberikan fokus yang besar terhadap pengaruh yang disebabkan oleh variabel-variabelnya. Penjelasan mengenai pengaruh-pengaruh yang dihasilkan oleh variabel independen dapat dilihat pada bab 4 mengenai hasil simulasi dan pembahasan.

Beberapa penelitian sejenis yang telah dilakukan antara lain oleh Prajongsan dkk (2011) yang mengukur kinerja *ventilation shaft* yang terhubung pada satu unit apartemen. Penelitian tersebut memiliki beberapa karakter penelitian eksperimental seperti yang disebutkan di atas namun dilakukan dengan

bantuan simulasi digital. Pada penelitian lainnya, Gao dkk (2011) melakukan simulasi CFD untuk mengevaluasi pengaruh konfigurasi bukaan pada bangunan residensial berlantai banyak. Zhou dkk (2014) melakukan optimasi desain ventilasi alami pada bangunan residensial berlantai banyak dengan menggunakan bantuan simulasi CFD dan perbandingan dengan hasil pengukuran langsung pada objek penelitian yang tidak mendapat *treatment*. Yang dkk (2014) juga melakukan pengukuran langsung pada objek penelitian yang tidak di-*treatment* serta membandingkannya dengan hasil simulasi objek penelitian yang mendapatkan *treatment* untuk mengetahui bagaimana pengaruh penggunaan *central ventilation shaft* dalam meningkatkan aerasi pada bangunan publik.

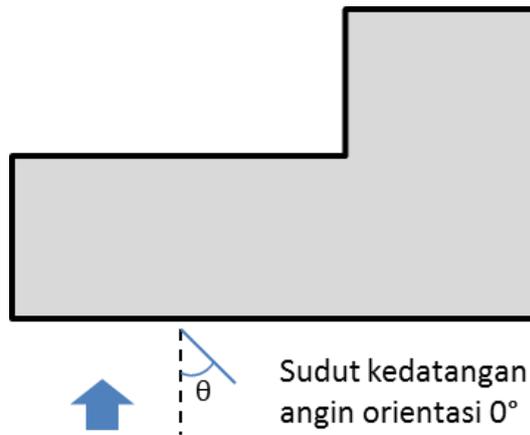
Berdasarkan Groat dan Wang (2002), penelitian eksperimen juga dapat menggunakan bantuan komputer atau pemodelan sebagai taktik untuk mencapai tujuan di dalam penelitian. Pada penelitian ini simulasi digital dipilih sebagai taktik utama karena tingginya tingkat kesulitan untuk melakukan modifikasi pada bangunan sebenarnya, yaitu kesulitan secara teknis, serta membutuhkan waktu yang lama dan biaya yang besar. Kesulitan tersebut dapat diatasi dengan menggunakan simulasi digital. Program simulasi yang digunakan adalah *Computational Fluid Dynamics* (CFD) yang dapat menghasilkan *output* berupa pola pergerakan aliran udara beserta kecepatannya.

3.2 Variabel Penelitian

Berdasarkan Groat & Wang (2002), di dalam penelitian eksperimental terdapat 5 karakteristik utama yaitu penggunaan *treatment* atau variabel bebas, adanya variabel terikat, adanya *unit of assignment* yang jelas, adanya grup kontrol serta fokus terhadap causality atau faktor sebab-akibat. Berikut ini merupakan penjelasan mengenai variabel bebas, terikat serta grup kontrol.

1. Variabel Bebas. Variabel ini adalah variabel yang akan mempengaruhi variabel terikat. Variabel ini yang nantinya akan dimanipulasi untuk mengetahui efek yang terjadi pada variabel terikat. Variabel bebas yang digunakan di dalam penelitian ini antara lain:

- Variabel ketinggian. Indikatornya adalah jarak yang diukur dari model penelitian ke permukaan tanah. Parameter ketinggian dapat diukur berdasarkan nomor lantai. Setiap lantai diasumsikan memiliki ketinggian 3 meter sehingga ketinggian model dapat diukur dengan mengalikan jumlah lantai dengan 3 meter. Variabel ini didasarkan pada teori pergerakan angin di sekitar bangunan (Aynsley, 1977), persebaran tekanan angin atau C_p pada bangunan *high-rise* (Elshaer dkk, 2016) dan *wind gradient* (Szokolay, 2004).
- Variabel area ratio. Indikatornya adalah perbandingan antara luas total seluruh bukaan internal dengan luas penampang *ventilation shaft*. Parameter yang dapat diukur adalah luas bukaan internal x n jumlah lantai yang terhubung dengan *shaft* kemudian dibagi dengan luas penampang *ventilation shaft*. Variabel ini didasarkan pada teori mengenai ventilasi silang (Aynsley, 1977), *ventilation shaft* (Prajongsan, 2011), dan manifolds (Bajura & Jones, 1967 dan McKetta, 1992).
 - Sub variabel jumlah lantai yang terhubung dengan *shaft*.
 - Sub variabel luas penampang *ventilation shaft*. Parameter yang dapat diukur adalah ukuran kedalaman *shaft* dikalikan dengan ukuran lebar *shaft*.
- Konfigurasi luas *inlet* dan bukaan internal. Indikatornya adalah pola penyusunan luas *inlet* dan bukaan internal pada masing-masing lantai. Parameter yang dapat diukur adalah luas (lebar x tinggi) *inlet* dan bukaan internal pada tiap lantai secara berurutan dari lantai paling atas hingga lantai paling bawah. Variabel ini didasarkan pada teori mengenai manifolds (Bajura & Jones, 1967 dan Chen dkk, 2003), serta pengaruh bukaan internal (Chu dkk, 2010).
- Orientasi angin. Indikatornya adalah arah kedatangan angin yang menuju ke bangunan. Parameter yang dapat diukur adalah besarnya sudut yang diukur dari sumbu bangunan terhadap arah kedatangan angin.



Gambar 3.1 Ilustrasi orientasi bangunan terhadap arah kedatangan angin

- Kemiringan lubang internal. Indikatornya adalah sudut kemiringan dari lubang atau bukaan yang menghubungkan ruangan dengan *shaft*. Parameter yang dapat diukur adalah sudut kemiringan lubang internal terhadap garis horizontal.
2. Variabel Terikat. Variabel ini merupakan pengukuran terhadap pengaruh yang ditimbulkan oleh variabel bebas. Variabel terikat yang digunakan di dalam penelitian ini antara lain:
- Efek pendinginan fisiologis. Indikatornya adalah efek pendinginan atau penyejukan yang dihasilkan oleh aliran udara di dalam ruangan. Parameter yang diukur adalah kecepatan aliran udara di dalam ruangan yang ditinjau dari batas-batas kenyamanan yang ditetapkan serta pemerataannya pada setiap lantai.
 - Keseragaman distribusi aliran udara. Indikatornya adalah kemampuan sistem *ventilation shaft* bercabang dalam menghasilkan aliran udara yang seragam pada tiap-tiap ruangan yang terhubung. Parameter yang diukur adalah nilai *flow unbalance* (U_c) yaitu perbandingan antara debit maksimum dibagi dengan debit minimum yang dihasilkan masing-masing lantai dalam sistem *ventilation shaft*.
3. Grup Kontrol. Grup kontrol ini merupakan model eksperimen yang tidak mendapatkan *treatment*. Grup kontrol ini berfungsi sebagai pembandingan

terhadap hasil dari perlakuan atau *treatment*. Grup kontrol tersebut merupakan model *base case* dengan detail sebagai berikut:

- Terdiri atas 6 lantai dan memiliki orientasi angin 0° (gambar 3.1).
- *Ventilation shaft* berukuran 2 x 1 m.
- Bukaannya internal tegak lurus terhadap *shaft* serta memiliki konfigurasi yang seragam di semua lantai.

3.3 Populasi dan Sampel Penelitian

Populasi apartemen di Surabaya tersebar di berbagai penjuru kota dengan berbagai macam tipe fasad dan jumlah lantai. Populasi apartemen yang digunakan adalah apartemen berkategori *high-rise* dengan jumlah lantai antara 14 sampai dengan 33 lantai dan terletak di wilayah kota Surabaya.

1. Apartemen Puncak Kertajaya



Gambar 3.2 Foto bangunan (atas) dan denah bangunan apartemen Puncak Kertajaya

Apartemen Puncak Kertajaya ini merupakan bangunan apartemen dengan *tower* ganda yang memiliki ketinggian sekitar 19 lantai. Berdasarkan gambar di atas, dapat diamati bahwa apartemen tersebut memiliki tipe koridor *double loaded* interior atau koridor yang terletak memanjang di tengah-tengah bangunan. Tipe

koridor ini mengindikasikan bahwa banyak unit apartemen (terutama yang terletak di tengah) yang hanya memiliki satu akses ke luar bangunan. Tipe bangunan seperti inilah yang dapat ditambahkan *ventilation shaft* sebagai strategi untuk menciptakan ventilasi silang. Meski demikian, tatanan massa bangunan yang membentuk perimeter menyebabkan unit-unit di sisi dalam perimeter bangunan menjadi terbayangi dari angin, sehingga *ventilation shaft* hanya cocok digunakan pada unit-unit yang ada di sisi yang menghadap ke luar kompleks bangunan.

2. Apartemen Gunawangsa Manyar



Gambar 3.3 Foto bangunan (kiri) dan ilustrasi bentuk bangunan dari atas apartemen Gunawangsa Manyar

Apartemen Gunawangsa Manyar merupakan bangunan apartemen dengan ketinggian sekitar 20 lantai. Berdasarkan bentuk dan tampak bangunan, dapat diasumsikan bahwa apartemen tersebut memiliki tipe koridor *double loaded interior*. Tatanan massa pada apartemen Gunawangsa ini juga menyebabkan adanya area yang terbayangi dari angin, sehingga *ventilation shaft* kurang cocok digunakan pada unit apartemen di sisi yang terbayangi dari angin.

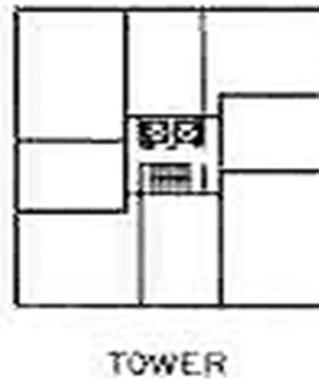
3. Apartemen East Coast



Gambar 3.4 Foto bangunan (kiri) dan denah bangunan apartemen East Coast

Apartemen East Coast ini memiliki ketinggian antara 10 hingga 16 lantai. Bangunan ini juga memiliki tipe koridor *double loaded* interior sehingga masih memungkinkan untuk ditambahkan *ventilation shaft*. Tatanan massa bangunan yang membentuk huruf U menyebabkan area di sisi dalam menjadi sedikit terlindung dari angin, namun masih memungkinkan mendapat angin dari sisi yang terbuka.

4. Apartemen Puncak Marina



Gambar 3.5 Foto bangunan apartemen Puncak Marina (kiri) dan ilustrasi jenis koridor *tower*

Apartemen Puncak Marina merupakan bangunan apartemen dengan *tower* ganda yang memiliki ketinggian sekitar 18 lantai. Apartemen ini memiliki bentuk bangunan seperti tanda plus sehingga dapat diasumsikan bahwa jalur sirkulasinya berada tepat di tengah bangunan namun tidak memanjang, atau disebut dengan tipe koridor *tower*. Bentuk bangunan tersebut juga memungkinkan tiap unit apartemen untuk mendapatkan 2 sisi dinding yang memiliki akses ke luar bangunan sehingga relatif tidak memerlukan *ventilation shaft* untuk menghasilkan ventilasi silang.

5. Apartemen Metropolis



Gambar 3.6 Foto bangunan (kiri atas) dan denah bangunan apartemen Metropolis

Apartemen Metropolis merupakan bangunan apartemen dengan 2 *tower* (*tower* A dan B terhubung menjadi satu massa bangunan) dengan ketinggian sekitar 18 hingga 23 lantai. Apartemen ini memiliki tipe koridor *double loaded* interior yang sesuai dengan kriteria penggunaan *ventilation shaft*. Meski demikian adanya *tower* kedua menyebabkan ada sedikit area di bagian kanan atas pada gambar menjadi sedikit terlingkupi. Hal ini menyebabkan sistem *ventilation shaft*

kurang efektif untuk diterapkan pada unit apartemen di sisi dalam dari area yang terlingkupi tersebut.

6. Apartemen Dian Regency



Gambar 3.7 Foto bangunan (kiri) dan denah bangunan apartemen Dian Regency

7. Apartemen Purimas



Gambar 3.8 Foto bangunan (atas) dan denah bangunan apartemen Purimas

Apartemen Dian Regency dan apartemen Purimas merupakan dua bangunan apartemen yang cukup ideal untuk ditambahkan sistem *ventilation*

shaft. Kedua bangunan tersebut sama-sama memiliki tipe koridor *double loaded interior* serta seluruh sisi panjang bangunan yang bebas atau tidak terhalang oleh bangunan lain sehingga *ventilation shaft* dapat diterapkan pada unit-unit apartemen di semua sisi panjang bangunan. Apartemen Dian Regency memiliki ketinggian hingga sekitar 21 lantai sementara apartemen Purimas hanya memiliki 14 lantai.

8. Apartemen Trillium

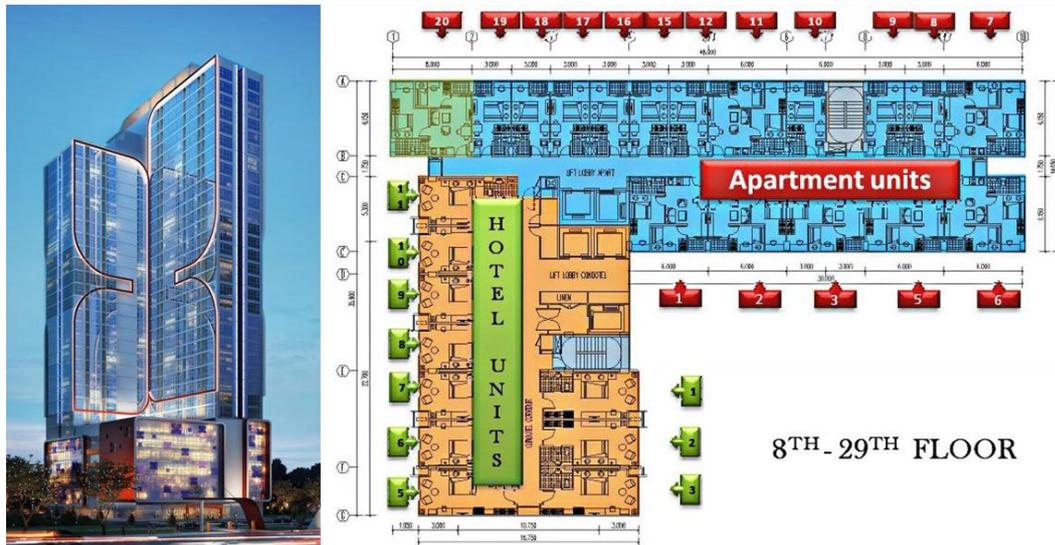


Gambar 3.9 Foto bangunan (kiri) dan potongan bangunan apartemen Trillium

Apartemen Trillium merupakan bangunan mix use dengan ketinggian total sekitar 31 lantai, yang berfungsi sebagai kantor pada bagian podium bangunan serta sebagai apartemen pada *tower* bangunan. Berdasarkan gambar potongan di atas, dapat diidentifikasi bahwa jalur sirkulasinya terletak memanjang di tengah bangunan atau disebut *double loaded interior* yang sesuai dengan kriteria untuk penambahan *ventilation shaft*. Meski demikian, apabila diamati lebih lanjut, beberapa lantai di bagian paling atas *tower* bangunan tidak sama dengan lantai-lantai di bawahnya, sehingga *ventilation shaft* kemungkinan tidak dapat sampai ke

atap bangunan sehingga bangunan apartemen ini menjadi kurang sesuai untuk ditambahkan sistem *ventilation shaft*.

9. Apartemen DePapilio Tamansari



Gambar 3.10 Foto bangunan (kiri) dan denah bangunan apartemen DePapilio

Apartemen DePapilio Tamansari merupakan suatu bangunan yang terbagi ke dalam beberapa fungsi yaitu sebagai apartemen dan hotel seperti tampak pada gambar denah bangunan di atas (gambar 3.10), serta sebagai bangunan retail pada area podiumnya. Bagian bangunan yang berfungsi sebagai apartemen memiliki koridor bertipe *double loaded interior* yang sesuai dengan kriteria untuk ditambahkan sistem *ventilation shaft*. Bangunan ini juga tidak terhalang oleh bangunan tinggi lain di sekitarnya, sehingga *ventilation shaft* dapat diterapkan pada kedua sisi bangunan yang berfungsi sebagai apartemen. Bangunan ini memiliki ketinggian 33 lantai.

Sampel dipilih dari populasi apartemen *high-rise* di atas dengan menggunakan metode *purposive sampling*. Metode tersebut digunakan untuk memperoleh sampel yang sesuai dengan tujuan penelitian. Penentuan sampel tersebut didasarkan pada kriteria yaitu bangunan yang lebih tinggi mendapatkan prioritas lebih. Kriteria ini didasarkan pada kemampuan bangunan tinggi untuk menciptakan nilai C_p pada permukaan bangunannya. Berdasarkan Aynsley (1977)

semakin tinggi bangunan, maka semakin negatif nilai C_p pada area wake flow. Dengan demikian nilai C_p yang lebih negatif tersebut dapat menghasilkan perbedaan tekanan yang lebih besar pada sistem *ventilation shaft*. Sesuai dengan *Power law*, kecepatan angin lokal akan meningkat seiring dengan ketinggian. Hal tersebut menyebabkan potensi kecepatan aliran udara yang dihasilkan oleh sistem *ventilation shaft* pada bangunan yang lebih tinggi juga semakin besar.

Berdasarkan analisa sederhana di atas, terdapat 3 bangunan apartemen yang ideal untuk ditambahkan sistem *ventilation shaft*, yaitu apartemen Dian Regency, apartemen Purimas dan apartemen DePapilio Tamansari. Dari ketiga bangunan apartemen tersebut, apartemen DePapilio Tamansari merupakan bangunan yang paling ideal karena memiliki jumlah lantai paling banyak (diasumsikan sebagai yang paling tinggi) yaitu 33 lantai. Dengan demikian apartemen DePapilio akan digunakan sebagai dasar dalam pembuatan model untuk disimulasikan.

3.4 Pengumpulan Data

Pengumpulan data dalam penelitian ini merupakan proses untuk mendapatkan berbagai macam informasi yang diperlukan untuk menyusun analisis dan mendapatkan hasil yang diharapkan. Data-data yang diperoleh haruslah seakurat dan seaktual mungkin untuk mendapatkan hasil penelitian yang maksimal.

3.4.1 Jenis Data

Terdapat dua jenis data yang diperlukan di dalam penelitian, yaitu:

1. Data Primer, yaitu data yang dihasilkan oleh peneliti secara langsung. Di dalam penelitian ini yang termasuk data primer adalah data dari hasil simulasi. Data dari hasil simulasi yang digunakan adalah berupa data kecepatan aliran udara untuk mengukur efek pendinginan yang dihasilkan serta debit aliran udara untuk mengukur keseragaman distribusi aliran udara.
2. Data Sekunder, yaitu data yang telah dikumpulkan dan disusun oleh pihak lain, yaitu:

- a) Data untuk pemodelan bangunan, yaitu data berupa denah serta foto atau gambar bangunan untuk menentukan bentuk bangunan, jumlah lantai bangunan serta ketinggian bangunan. Data tersebut dapat diperoleh dari brosur atau dari internet.
- b) Data iklim untuk simulasi. Data utama yang diperlukan untuk simulasi CFD adalah data kecepatan angin untuk wilayah Surabaya. Data ini dapat diperoleh dari BMKG.
- c) Data iklim untuk analisis kenyamanan, yaitu data temperatur udara, kelembaban wilayah Surabaya. Data ini juga diperoleh dari BMKG.
- d) Data-data untuk kajian pustaka dapat diperoleh dari buku dan jurnal. Hasil dari kajian pustaka tersebut digunakan sebagai dasar untuk menentukan variabel penelitian serta untuk menganalisa hasil eksperimen.

3.4.2 Teknik Pengumpulan Data

a. Kajian Pustaka

Kajian pustaka diperlukan untuk menyusun dasar-dasar teori yang dapat digunakan di dalam penelitian. Selain itu kajian pustaka juga dapat berfungsi sebagai sumber pengetahuan awal untuk memahami permasalahan di dalam penelitian. Pada penelitian ini kajian pustaka difokuskan pada teori mengenai pergerakan angin di dalam dan di luar bangunan, khususnya bangunan apartemen *high-rise*, mekanisme ventilasi, teknik perhitungan ventilasi dan kecepatan angin di luar, serta mengenai *ventilation shaft*.

b. Pengumpulan Data dari BMKG

Data iklim yang diperlukan untuk melakukan simulasi dapat diperoleh dari Badan Meteorologi dan Geofisika wilayah Surabaya yang ada di Pelabuhan Tanjung Perak dan Bandara Juanda. Untuk mendapatkan data tersebut diperlukan proses administratif tertentu seperti menggunakan surat permohonan resmi atas nama institusi. Data yang diperlukan untuk penelitian utamanya adalah data mengenai kecepatan, arah angin, temperatur udara dan kelembaban udara.

c. Dokumentasi Data

Kegiatan dokumentasi ini dapat berupa pengamatan langsung dan pengukuran, serta pencarian data sekunder yang dapat berguna untuk tahap pemodelan dan simulasi bangunan. Data-data yang dapat diperoleh dari kegiatan ini antara lain denah bangunan atau foto bangunan.

d. Simulasi

Simulasi merupakan cara untuk meniru proses alami yang terjadi di dunia nyata dengan menggunakan bantuan komputer atau alat simulasi lainnya. Dalam penelitian ini, simulasi dapat dilakukan dengan cara membuat model bangunan secara digital lalu diuji menggunakan program CFD untuk mengetahui bagaimana kinerja dari model tersebut. Data yang diperlukan dari proses simulasi ini adalah data mengenai angin yang terjadi di dalam dan di luar bangunan.

3.5 Tahapan Penelitian

3.5.1 Tahap Perumusan Masalah

Tahap perumusan masalah merupakan langkah awal di dalam penelitian untuk memberikan gambaran yang jelas mengenai apa saja yang akan diteliti. Di dalam tahap perumusan masalah, dapat diidentifikasi bahwa *ventilation shaft* merupakan salah satu strategi yang dapat diterapkan untuk menghasilkan mekanisme ventilasi silang di bangunan apartemen *high-rise* dengan tatanan koridor bertipe *double loaded*. Sistem *ventilation shaft* yang terdiri dari beberapa lantai memiliki masalah berupa distribusi aliran udara yang tidak seragam. Elemen-elemen desain seperti ketinggian, konfigurasi bukaan, jumlah lantai yang terhubung dengan *shaft*, ukuran *shaft*, serta kemiringan lubang internal diduga dapat mempengaruhi distribusi aliran udara di dalam sistem *ventilation shaft*.

3.5.2 Tahap Kajian Pustaka

Pada tahap ini dilakukan studi mengenai literatur-literatur yang berhubungan dengan penelitian. Secara garis besar, studi yang dilakukan mencakup bahasan-bahasan berikut:

- Definisi dan peran ventilasi alami
- Mekanisme ventilasi alami

- Aliran angin di daerah perkotaan
- Aliran udara di sekeliling bangunan tinggi
- Aliran udara di dalam bangunan
- Bangunan apartemen
- Sistem ventilasi pada bangunan apartemen
- *Ventilation shaft*
- Percabangan pada *ventilation shaft*

Berdasarkan hasil kajian pustaka ini, dapat ditentukan variabel-variabel penelitian dan data-data apa saja yang dibutuhkan. Hal ini akan mempermudah proses dokumentasi dan pengumpulan data yang akan dilakukan pada tahap selanjutnya.

3.5.3 Tahap Dokumentasi Data

Tahap dokumentasi data lapangan dilakukan untuk memperoleh data-data primer maupun sekunder mengenai fisik dan performa bangunan yang berkaitan dengan penelitian. Data-data yang diperoleh dari tahap ini antara lain: denah/layout, potongan dan tampak bangunan yang dapat berasal dari brosur, hasil pemotretan bangunan, ataupun data dari pihak pengelola bangunan.

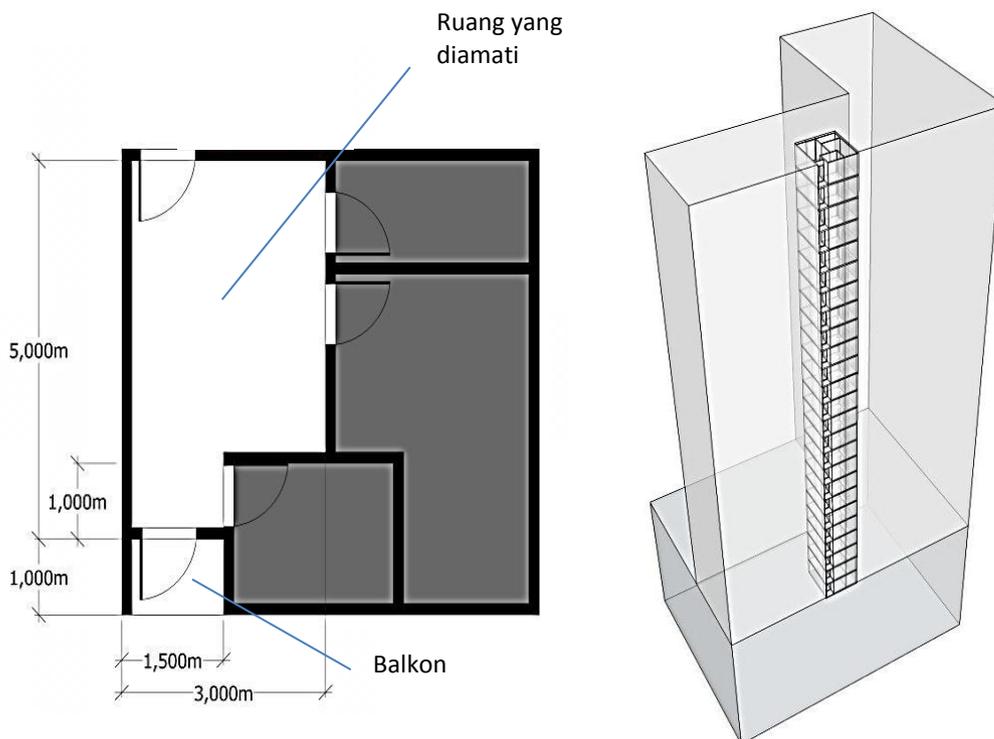
3.5.4 Tahap Pengumpulan dan Pengolahan Data

Pada tahap ini seluruh data dikumpulkan dan diolah agar sesuai dengan kebutuhan penelitian. Data iklim yang diperoleh dari BMKG diproses lebih lanjut hingga siap digunakan untuk tahap simulasi. Selain itu data-data yang diperoleh dari tahap sebelumnya, yaitu mengenai data fisik bangunan akan diproses menjadi model digital yang selanjutnya dapat digunakan dalam tahap simulasi.

3.5.5 Tahap Simulasi

Di dalam tahap simulasi, model bangunan akan diuji menggunakan program CFD yang dikondisikan berdasarkan data-data iklim yang telah diperoleh. Modifikasi berdasarkan variabel bebas juga akan diujikan dalam tahap ini dan diamati bagaimana hasilnya.

Bangunan apartemen yang menjadi objek penelitian ini memiliki 33 lantai dengan rincian 8 lantai podium merupakan bangunan mix building, sementara 25 lantai lainnya apartemen dan hotel. Ketinggian setiap lantai ditetapkan sebesar 3m sehingga ketinggian total bangunan adalah 3x33 m atau 99 m. Model eksisting ini tidak memiliki *ventilation shaft* karena disesuaikan dengan kondisi eksisting objek tersebut.



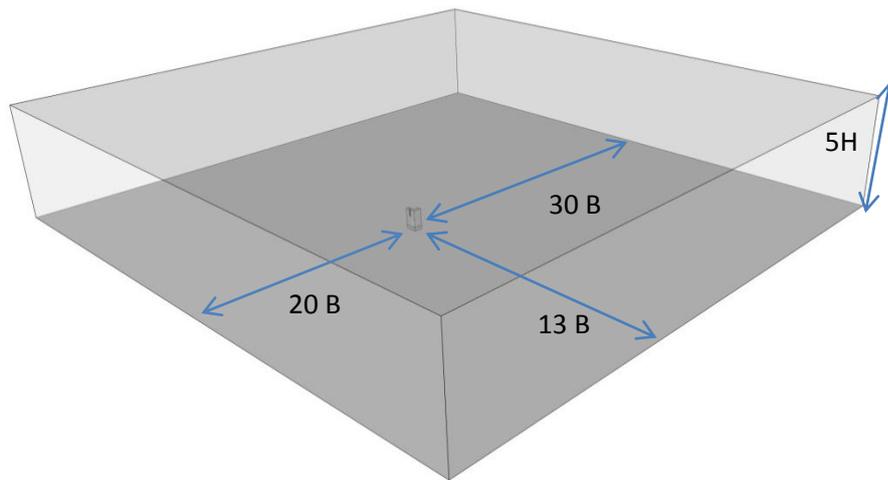
Gambar 3.12 Denah tipikal unit apartemen yang diuji (kiri) dan model eksisting bangunan apartemen (kanan)

Penyederhanaan model dilakukan terhadap bentuk bangunan secara umum. Bentuk bangunan dibuat sesederhana mungkin yaitu dengan menghilangkan detail lekukan pada eksterior bangunan seperti yang ada di ujung koridor (gambar 3.11). Denah tipikal bangunan dianggap menerus hingga ke lantai yang paling atas. Selain itu, atap bangunan dianggap datar tanpa ada tambahan apapun.

Selain itu, dalam proses pemodelan ini juga dilakukan penentuan ukuran *domain* yang akan digunakan di dalam simulasi. Ukuran *domain* ini adalah besarnya volume lingkungan yang digunakan di dalam simulasi CFD. Ukuran

domain yang digunakan adalah berdasarkan rekomendasi dari Revuz dkk (2012) yang telah melakukan penelitian mengenai *domain* CFD yang sesuai untuk bangunan *high-rise*. Rekomendasi tersebut yaitu:

- Jarak dari tepi bangunan ke batas *domain* arah *upwind* adalah minimal 20 kali lebar bangunan atau 2 kali tinggi bangunan, dengan memilih yang paling besar di antara keduanya.
- Jarak dari tepi bangunan ke batas *domain* arah *downwind* adalah minimal 30 kali lebar bangunan atau 3 kali tinggi bangunan, dengan memilih yang paling besar di antara keduanya.
- Jarak dari tepi atas bangunan ke batas *domain* bagian atas adalah minimal 4 kali tinggi bangunan.
- Jarak dari tepi bangunan ke batas samping *domain* adalah minimal 13 kali lebar bangunan.

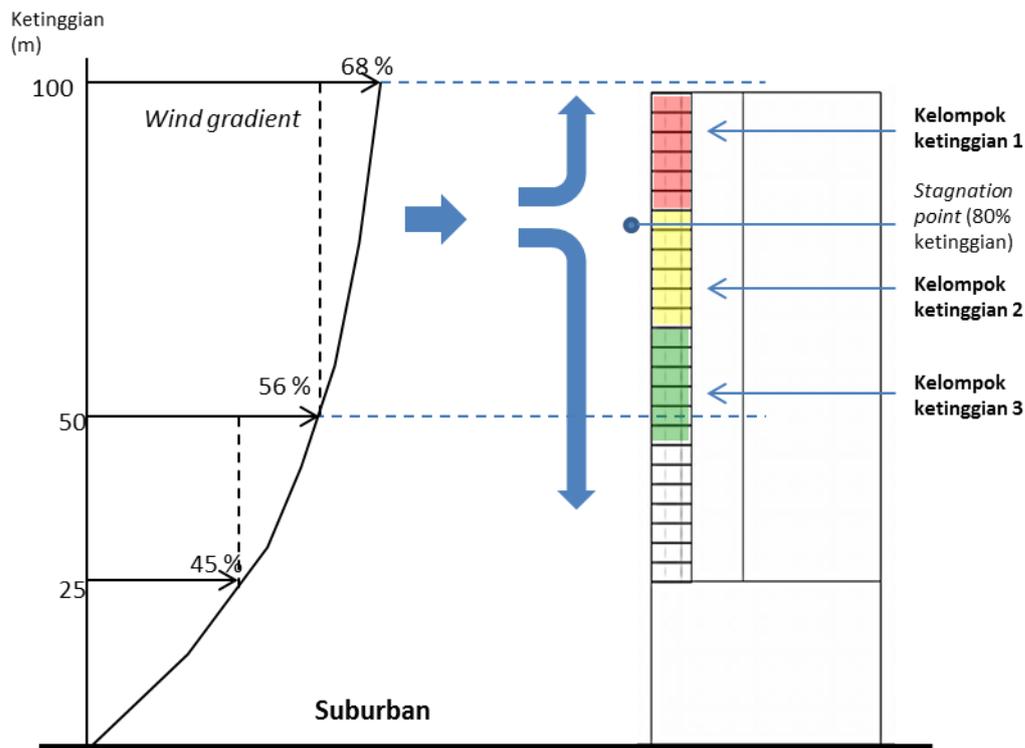


Gambar 3.13 Ilustrasi besaran *domain* atau lingkungan yang diperlukan untuk simulasi CFD berdasarkan lebar (B) dan ketinggian bangunan (H)

3.6.2 Pembagian Kelompok Eksperimen Berdasarkan Variabel Ketinggian

Variabel ketinggian ini merupakan salah satu variabel yang penting dalam menentukan rancangan eksperimen. Eksperimen yang akan dilakukan dapat dibagi menjadi 3 kelompok besar berdasarkan ketinggiannya. Pembagian ini juga menentukan seberapa banyak percabangan pada *shaft* atau dengan kata lain

jumlah lantai yang terhubung pada *shaft*. Pembagian ini didasarkan pada teori *wind gradient* (Aynsley, 1977, Szokolay, 2004 dan Godish dkk, 2015), pergerakan angin di sekitar bangunan (Aynsley, 1977) serta persebaran C_p pada bangunan *high-rise* (Elshaer, 2016).

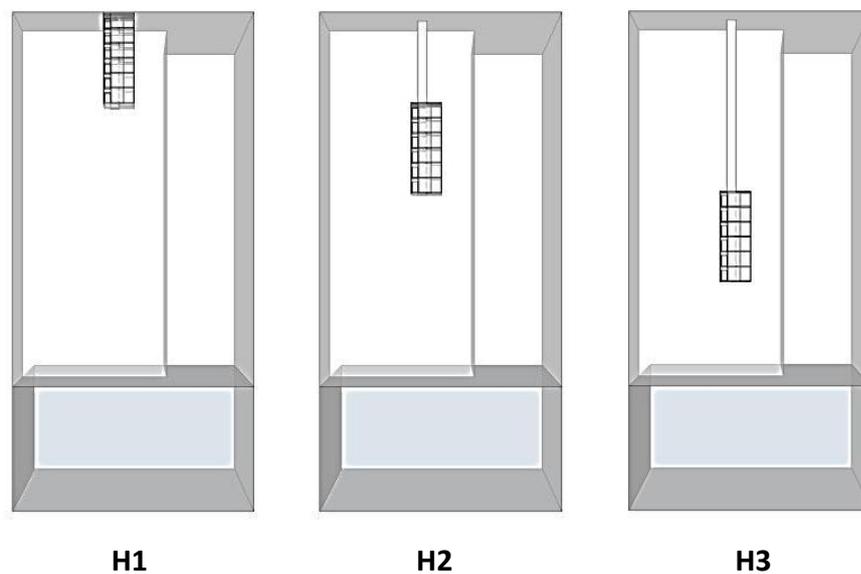


Keterangan: kecepatan angin dalam bentuk persentase dari kecepatan angin freestream

Gambar 3.14 Ilustrasi penentuan kelompok-kelompok ketinggian berdasarkan *wind gradient* dan teori tentang *stagnation point*

Ilustrasi di atas menunjukkan dasar pembagian kelompok eksperimen berdasarkan variabel ketinggian. Kelompok-kelompok tersebut ditetapkan berdasarkan teori mengenai pergerakan aliran udara (Aynsley, 1977) yang menyatakan bahwa di atas titik stagnan (berada pada sekitar 80% ketinggian bangunan) angin akan menuju ke atas, sementara di bawah titik stagnan, angin akan bergerak vertikal ke bawah. Berdasarkan ilustrasi di atas, dapat diidentifikasi bahwa terdapat 6 lantai yang berada di atas *stagnation point* (lantai 33-38). Lantai-lantai tersebut kemudian ditetapkan sebagai kelompok pertama.

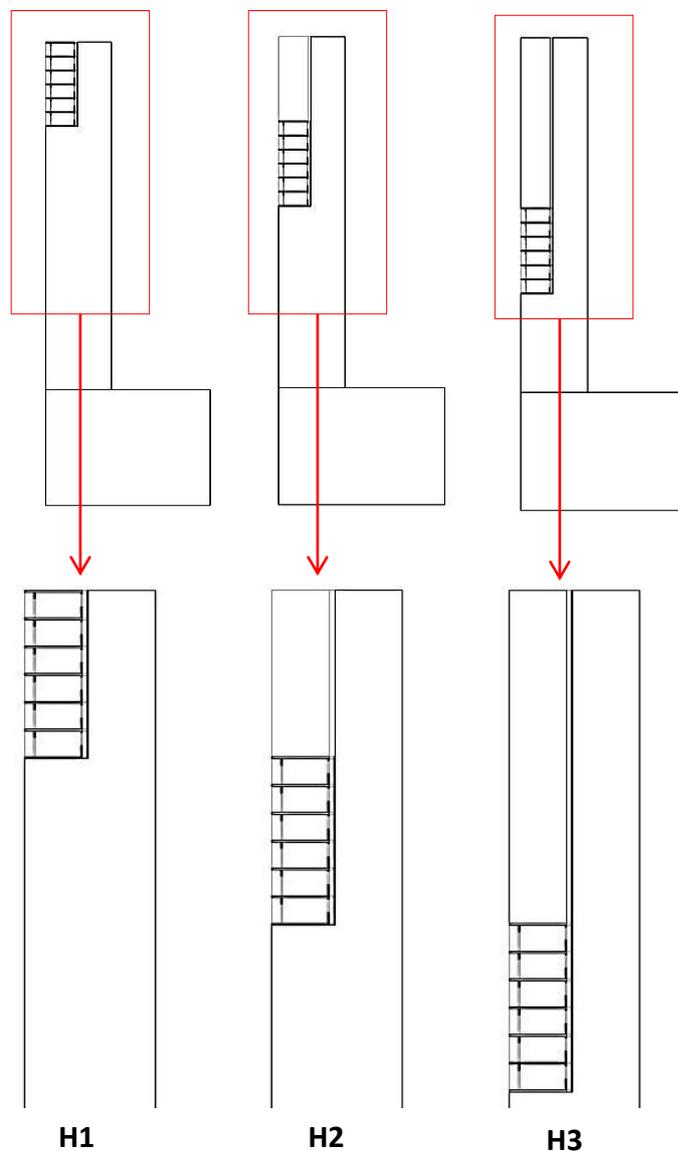
Untuk menentukan kelompok-kelompok selanjutnya, perlu diperhatikan bahwa jumlah lantai tersebut juga merupakan jumlah percabangan pada sistem *ventilation shaft*. Jumlah percabangan pada sistem *ventilation shaft* merupakan faktor yang dapat mempengaruhi distribusi aliran udara pada ruangan-ruangan yang terhubung pada *shaft*. Untuk menghindari bias yang diakibatkan perbedaan jumlah percabangan, maka jumlah lantai yang tergabung dalam setiap kelompok ketinggian harus dibuat tetap, yaitu berjumlah 6 lantai.



Gambar 3.15 Gambar tampak pada kelompok-kelompok ketinggian beserta kode yang digunakan

Dengan demikian dapat ditetapkan bahwa kelompok ketinggian selanjutnya dimulai dari lantai di mana titik stagnan berada yaitu pada lantai ke 27 hingga lantai ke 22 kemudian dari lantai 21 hingga lantai 16 (masing-masing berjumlah 6 lantai). Pembagian tersebut berhenti hingga mendapatkan 3 kelompok. Hal tersebut didasarkan pada pembagian zona *wind gradient* yaitu pada zona antara 50-100 meter, sehingga seluruh kelompok eksperimen berada pada zona *wind gradient* yang sama. Sementara itu, lantai-lantai di bawahnya yaitu lantai 15 hingga lantai 9 tidak termasuk dalam kelompok yang diuji. Hal ini dikarenakan lantai-lantai tersebut berada pada zona *wind gradient* yang berbeda dengan 3 kelompok ketinggian sebelumnya, serta pertimbangan berdasarkan teori

manifolds (Bajura & Jones, 1967) dan pengaruh *friction* terhadap aliran fluida (Cengel dkk, 2006), bahwa saluran *ventilation shaft* yang terlalu panjang akan menyebabkan *friction* yang dialami oleh aliran udara semakin besar yang selanjutnya mengakibatkan penurunan tekanan aliran udara dan hilangnya energi aliran udara di dalam saluran *ventilation shaft*. Berdasarkan hal tersebut, dapat diduga bahwa penggunaan *ventilation shaft* pada lantai-lantai yang paling bawah adalah kurang efektif.

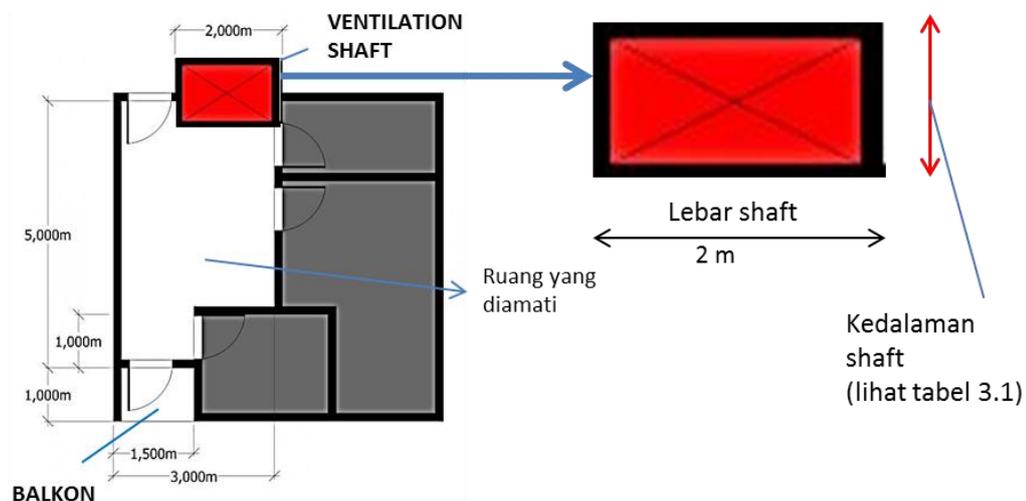


Gambar 3.16 Potongan bangunan pada masing-masing kelompok ketinggian yang menunjukkan adanya *ventilation shaft*

Dengan demikian, pembagian kelompok ketinggian dapat ditetapkan berdasarkan *wind gradient* serta teori mengenai *stagnation point* serta pergerakan angin di sisi *windward* bangunan seperti yang telah dijelaskan sebelumnya. Berdasarkan gambar 3.15 dan 3.16, nama kelompok ketinggian di dalam eksperimen ini diberi kode antara lain H1, yaitu kelompok ketinggian lantai 33-28, H2, kelompok ketinggian lantai 27-22, dan H3, kelompok ketinggian lantai 21-16.

3.6.3 Variasi Luas Penampang Shaft

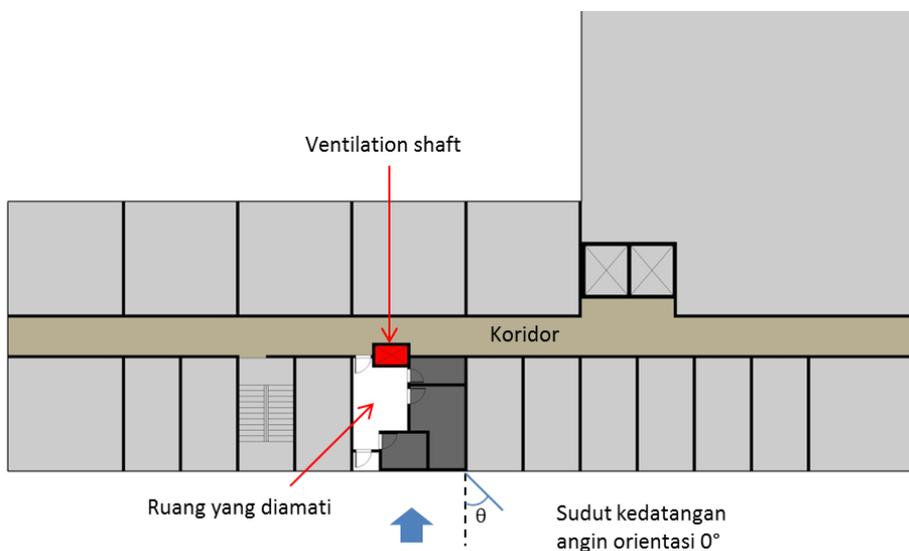
Variabel ini diujukan untuk mengetahui pengaruh ukuran *shaft* (luas penampang *shaft*) terhadap kinerja sistem *ventilation shaft* bercabang. Variabel ini ditetapkan berdasarkan pernyataan McKetta dkk (1992) bahwa salah satu cara untuk membuat distribusi aliran lebih seragam adalah memperbesar diameter pipa *header*, yang di dalam sistem *ventilation shaft* bercabang ini diwakili oleh ukuran panjang dan lebar atau luas penampang *ventilation shaft*. Pernyataan McKetta tersebut selaras dengan teori yang disebutkan oleh Bajura & Jones (1971) serta Wang dkk (2011) mengenai *area ratio* yang merupakan perbandingan antara jumlah total diameter pipa *lateral* (diameter *lateral* x n banyaknya pipa *lateral*) dengan diameter pipa *header*. Dengan demikian luas penampang *shaft* akan mempengaruhi nilai *area ratio* pada sistem *ventilation shaft* bercabang.



Gambar 3.17 Detail variasi untuk variabel luas penampang *shaft*

Tabel 3.1 Detail ukuran *shaft*

Variasi	Dimensi/ luas penampang (lebar x kedalaman)
S1 (Basecase)	2 x 1 m
S2	2 x 0,5 m



Gambar 3.18 Posisi *ventilation shaft* terhadap koridor bangunan

Berdasarkan gambar di atas, dapat diamati bahwa *ventilation shaft* separuh bagian terletak di koridor dan separuhnya lagi berada di dalam ruangan unit apartemen. Hal ini disebabkan oleh ukuran *ventilation shaft* yang cukup besar, yaitu mencapai 2 m panjang dan kedalaman 1 m. Pertimbangan untuk posisi peletakan *ventilation shaft* tersebut adalah lebar koridor yang terbatas (sekitar 2 m) sehingga *ventilation shaft* dengan kedalaman 1 meter tersebut tidak dapat diletakkan sepenuhnya di koridor. Oleh karena itu, *ventilation shaft* tersebut diposisikan di antara koridor dan ruangan.

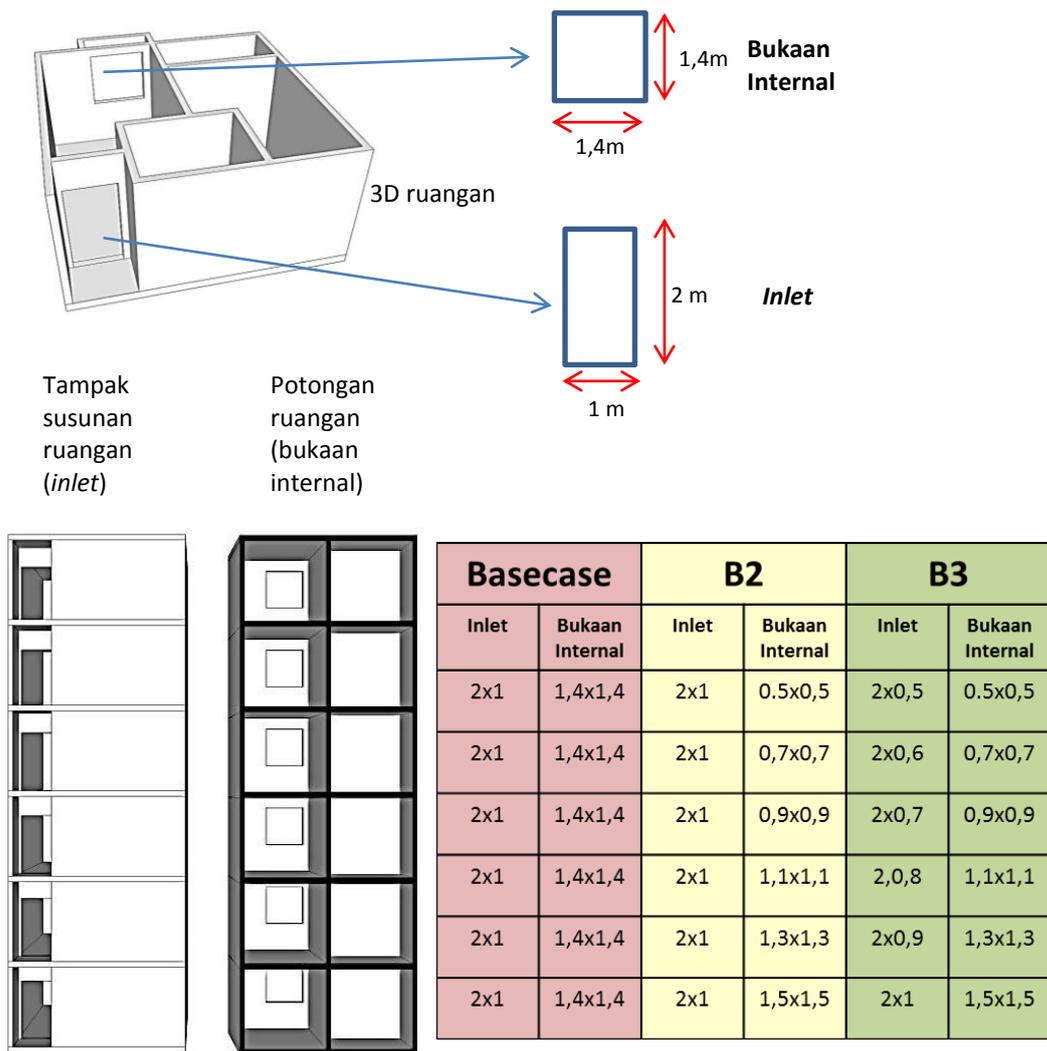
Apabila ditinjau dari segi nilai area ratio, ukuran *shaft* sebesar 2 m x 1 m merupakan ukuran yang ideal untuk sistem *ventilation shaft*. Ukuran tersebut dapat dianggap ideal berdasarkan pertimbangan agar nilai area ratio tidak terlalu

besar. Berdasarkan penjelasan mengenai area ratio sebelumnya, dapat dikatakan bahwa apabila ukuran *shaft* diperkecil maka nilai area ratio semakin besar. Nilai area ratio yang terlalu besar dikhawatirkan dapat menyebabkan distribusi aliran udara menjadi tidak seragam. Ukuran *shaft* yang terlalu kecil juga dikhawatirkan dapat menyebabkan debit aliran udara yang dihasilkan menjadi terlalu rendah. Meski demikian dari segi pemanfaatan ruang, ukuran *shaft* sebesar 2 m x 1 m sudah cukup memakan banyak ruang sehingga tidak dapat diperbesar lagi. Oleh karena itu ukuran *shaft* tersebut dapat dipandang sebagai ukuran yang ideal untuk digunakan sebagai *ventilation shaft*.

3.6.4 Variasi Konfigurasi Luas *Inlet* dan Bukaannya Internal

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, variabel ini mengatur tentang tatanan atau pola penyusunan luas bukaan *inlet* dan bukaan internal pada masing-masing ruangan yang terhubung dengan *ventilation shaft*. Variasi yang dilakukan adalah membuat bukaan-bukaan tersebut memiliki luasan yang seragam atau dengan susunan yaitu lantai paling atas mendapatkan luas bukaan terkecil kemudian semakin besar pada tiap lantai di bawahnya sehingga lantai terbawah memiliki luas bukaan paling besar.

Variasi tersebut didasarkan pada pernyataan Chen dkk (2003) bahwa aliran yang masuk ke *lateral* yang jauh dari lubang *outlet* akan mengalami *junction losses*, atau hilangnya energi aliran fluida akibat adanya percabangan, yang lebih besar daripada aliran yang masuk ke *lateral* yang dekat dengan *outlet*. Apabila semua *lateral* memiliki diameter yang sama, maka semakin jauh dari *outlet*, *lateral discharge* (debit) yang dihasilkan oleh *lateral* akan semakin berkurang (terjadi ketidakseragaman). Chen dkk juga menambahkan bahwa hal ini dapat diatasi dengan cara membuat diameter *lateral* semakin besar dari yang dekat dengan *outlet* hingga ke yang paling jauh, sehingga *lateral* yang paling jauh akan memiliki *outlet* paling besar sementara *lateral* yang dekat dengan *outlet* diameternya adalah yang paling kecil. Teori tersebut diaplikasikan pada sistem *ventilation shaft* dengan cara memvariasikan ukuran bukaan-bukaan yang menghubungkan ruangan dengan *shaft*.

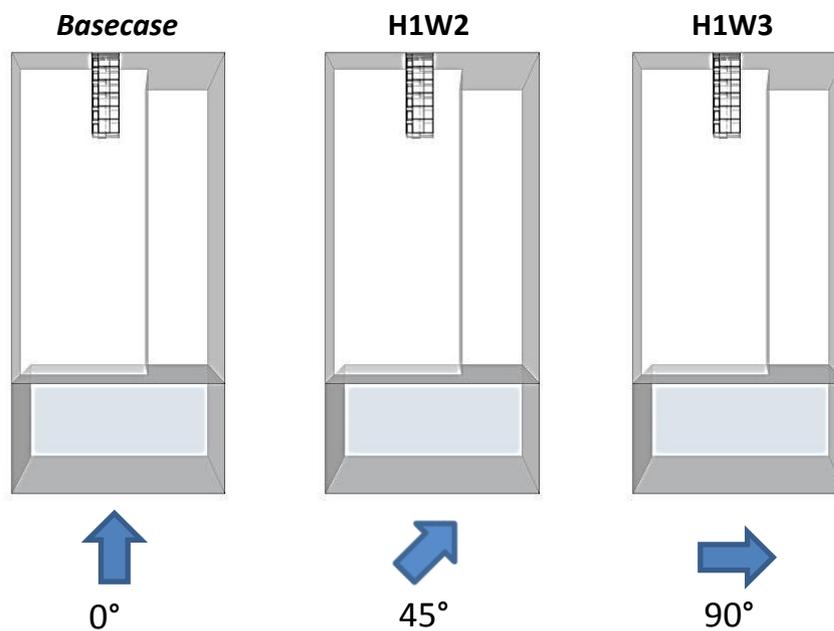


Gambar 3.19 Detail variasi untuk variabel bukaan-bukaan yang berhubungan dengan *shaft* (bukaan *inlet* serta bukaan internal)

Tabel di atas menunjukkan kode untuk variasi dan detail dimensi bukaan-bukaan yang divariasikan. Urutan dari variasi tersebut sesuai dengan urutan lantai dari atas ke bawah. *Base case* merupakan konfigurasi dasar yang seluruh bukaannya seragam. B2 mendapatkan perlakuan berupa variasi di bagian bukaan internal sementara B3 mendapatkan perlakuan berupa variasi pada *inlet* dan bukaan internalnya. Konfigurasi bukaan yang semakin membesar dari lantai paling atas hingga yang paling bawah tersebut diharapkan dapat membuat distribusi aliran udara yang dihasilkan menjadi lebih seragam.

3.6.5 Variasi Orientasi Angin

Orientasi angin divariasikan sebanyak 3 variasi yaitu pada kondisi tegak lurus (0°), menyudut (45°) dan dari arah samping (90°). Variasi ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh arah angin terhadap kinerja sistem *ventilation shaft* bercabang, sebagaimana telah diketahui bahwa arah angin yang berbeda akan menghasilkan nilai C_p yang berbeda pula pada permukaan bangunan sehingga tentunya akan berdampak pada kinerja *ventilation shaft* tersebut.

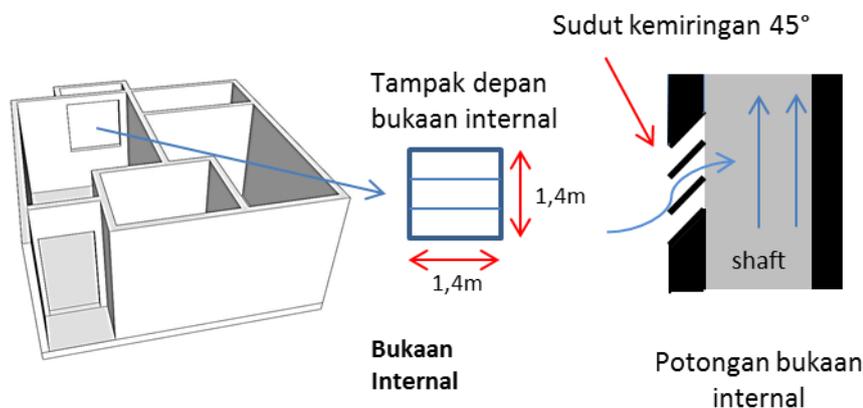


Gambar 3.20 Detail variasi untuk variabel orientasi angin

3.6.6 Variasi kemiringan lubang internal dan elemen pengarah

Bajura & Jones (1971) menyebutkan bahwa resistansi saluran *lateral* terdiri atas beberapa faktor yaitu head velocity yang dihasilkan *lateral* tersebut, *turning loss*, serta *friction* yang dihasilkan oleh *lateral* tersebut. Sementara itu, berdasarkan penjelasan sebelumnya, Bajura & Jones (1976) juga menyebutkan bahwa resistansi dari *lateral* juga dapat mempengaruhi distribusi aliran di dalam suatu *manifolds* atau percabangan dalam sistem perpipaan. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa *turning loss* secara juga dapat mempengaruhi resistansi *lateral* yang selanjutnya dapat mempengaruhi distribusi aliran di dalam *manifolds*.

Shaughnessy dkk (2005) menyebutkan bahwa efek *turning loss* tersebut dapat dikurangi dengan cara menambahkan elemen pengarah. Pengamatan terhadap pengaruh bentuk belokan juga mengindikasikan bahwa gradual bend memiliki dapat menghasilkan *turning loss* yang lebih rendah dibandingkan dengan belokan yang tajam. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa dengan memiringkan lubang internal serta menambahkan elemen pengarah dapat mempengaruhi efek *turning loss* yang dihasilkan yang selanjutnya juga mempengaruhi pemerataan distribusi aliran udara yang dihasilkan.



Gambar 3.21 Detail variasi untuk variabel kemiringan bukaan internal

Untuk mengurangi efek dari *turning loss* pada sistem *ventilation shaft*, strategi yang dilakukan adalah mengubah sudut lubang internal terhadap *shaft* menjadi miring 45° terhadap garis horizontal yang tegak lurus dengan *shaft*. Selain itu, bukaan internal tersebut juga ditambah dengan elemen pengarah atau grill yang juga dimiringkan sebesar 45° . Variasi pada lubang internal tersebut diharapkan dapat mengurangi *turning loss* dan juga dapat memperbaiki distribusi aliran udara di dalam sistem *ventilation shaft*.

3.6.7 Penetapan grup kontrol

Grup kontrol ini diperlukan sebagai pembandingan untuk melakukan analisa dan menarik kesimpulan. Variabel yang perlu ditetapkan sebagai dasar untuk grup kontrol antara lain luas penampang *shaft*, konfigurasi luas *inlet* dan bukaan internal, serta orientasi angin. Dasar penentuan dari dimensi *ventilation shaft*

adalah dari penelitian Prajongsan dkk (2011) yang menggunakan *shaft* berukuran lebar 2 m dan kedalaman *shaft* 0,5 m. Ukuran *shaft* tersebut digunakan sebagai dasar penentuan ukuran *shaft* pada model grup kontrol. Selain itu, konfigurasi luas *inlet* dan bukaan internal yang digunakan sebagai elemen dari grup kontrol adalah varian *basecase* yang merupakan varian dasar. Elemen terakhir adalah orientasi angin yaitu dari arah tegak lurus atau dari arah 0° (*basecase*) ditetapkan sebagai elemen dari grup kontrol. Grup kontrol ini ditetapkan pada ketinggian H1 karena kelompok ketinggian tersebut letaknya paling dekat dengan *outlet shaft* di atap bangunan sehingga dapat diasumsikan bahwa kelompok ketinggian tersebut memiliki kinerja yang paling baik. Dengan demikian grup kontrol tersebut memiliki variasi dasar yaitu H1, S1, B1 dan W1 atau dapat disebut model *basecase* atau disingkat menjadi model H1S1.

Model H1S1 sebagai model *basecase* berarti bahwa setiap variasi yang dilakukan akan dibandingkan hasilnya dengan model H1S1 untuk mengetahui seberapa besar pengaruh yang ditimbulkan dari variasi atau *treatment* tersebut.

3.6.8 Rancangan eksperimen model kombinasi 3 lantai dengan konfigurasi bukaan internal yang semakin besar dari lantai paling atas hingga lantai paling bawah

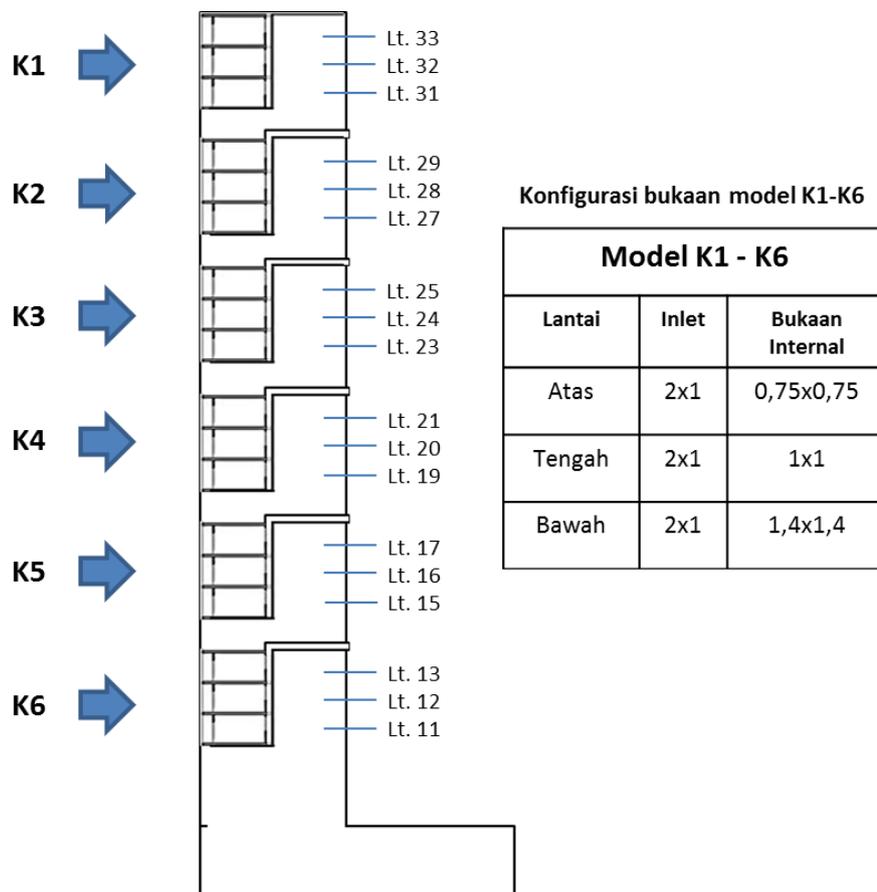
Penetapan eksperimen untuk model ini didasarkan pada pernyataan Wang dkk (2011) bahwa pertimbangan dalam mendesain manifolds tidak boleh hanya memperhatikan satu faktor saja dan melupakan faktor lainnya. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa untuk dapat menghasilkan distribusi aliran yang seragam maka perlu dilakukan pertimbangan dari berbagai faktor serta mengkombinasikan strategi-strategi yang telah disebutkan di atas.

Berdasarkan teori mengenai *area ratio* dan rekomendasi nilai *area ratio* dari Bajura & Jones (1976) serta pernyataan dari Wang dkk di atas, dapat diduga bahwa model-model pada eksperimen dasar tidak dapat menghasilkan aliran udara yang benar-benar seragam di tiap lantainya. Ukuran *shaft* seperti pada varian S1 adalah ukuran maksimal yang dapat diterapkan pada bangunan objek sehingga tidak dapat diperbesar lagi. Untuk mengurangi nilai *area ratio*, maka jumlah lantai yang terhubung pada *shaft* perlu dikurangi. Oleh karena itu pada model

kombinasi ini, jumlah lantai yang terhubung pada *shaft* adak dikurangi dari 6 lantai menjadi 3 lantai saja pada model.

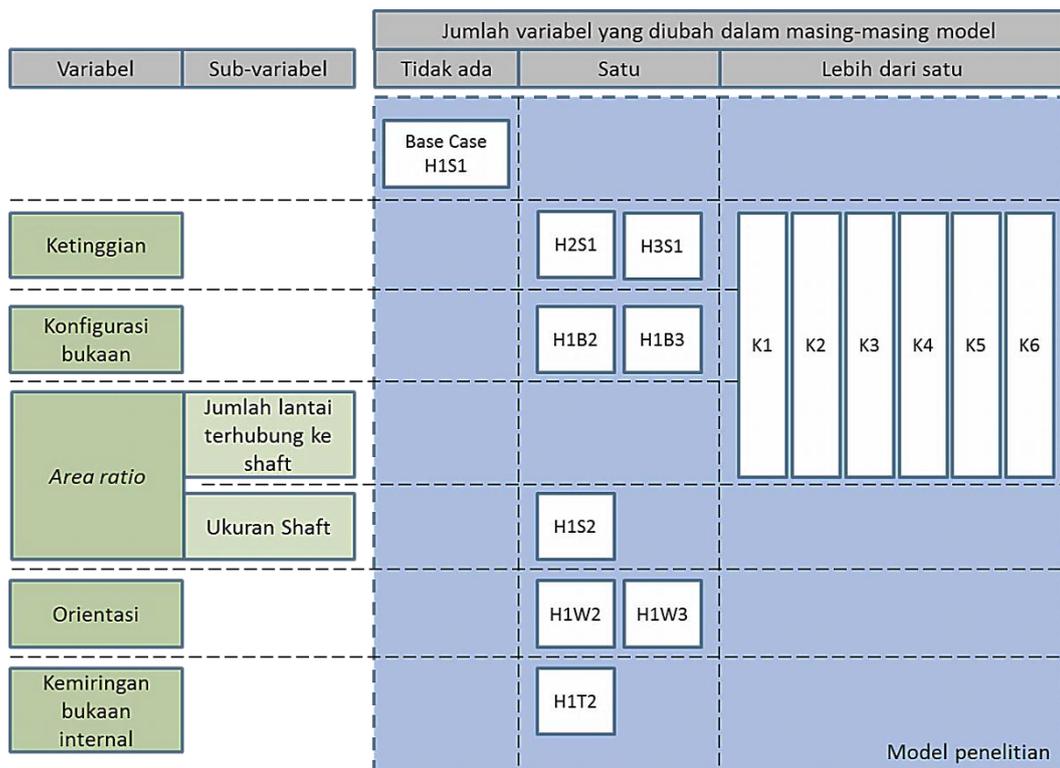
Kelompok *ventilation shaft* yang jauh dari atap seperti model H2S1 dan H3S1 memiliki kelemahan berupa *shaft* yang terlalu panjang yang dapat memperbesar pengaruh *friction* seperti yang dijelaskan oleh Bajura & Jones (1976). Panjang *shaft* pada model yang jauh dari *outlet* dapat dikurangi dengan cara membuat *outlet shaft* di sisi bangunan yang berlawanan dari sisi *inlet* (atau dapat disebut sisi *leeward*). Dengan demikian panjang *shaft* pada model yang letaknya jauh dari atap (model pada ketinggian rendah) akan menjadi lebih pendek apabila dibandingkan dengan *shaft* yang lubang *outletnya* ada di atap.

Strategi untuk membuat aliran lebih seragam dengan cara memperbesar ukuran lubang internal pada lantai-lantai yang lebih jauh dari *outlet* (yang diadaptasi dari teori yang disebutkan Chen dkk, (2003) juga dapat diterapkan pada model konsep agar distribusi aliran udara yang dihasilkan menjadi lebih seragam.



Gambar 3.22 Detail model K1-K6

Berdasarkan gambar 2.2, masing-masing model memiliki 3 lantai yang terhubung dengan *ventilation shaft*. Berdasarkan jumlah lantai yang ada pada apartemen tersebut, terdapat 6 model yang dapat diterapkan, yaitu dengan kode K1 hingga K6. Masing-masing model memiliki *shaft* sebesar 2x1 m, sama seperti model *basecase* H1S1 namun juga memiliki variasi bukaan (lihat tabel pada gambar di atas) seperti halnya pada model H1B2.



Gambar 3.23 Diagram keseluruhan model-model eksperimen

3.6.9 Meshing

Model 3D yang dibuat sebelumnya dengan *software* Gambit akan diimpor ke dalam Ansys Fluent 14.0 untuk dilanjutkan ke tahap meshing. Sebelum membuat *meshing*, bidang-bidang yang menjadi area *inlet*, *outlet*, bidang batas serta bidang objeknya ditetapkan dan diberi nama sesuai fungsinya. Kemudian dilakukan tahap *meshing* dengan setting sebagai berikut:

- Menggunakan metode *assembly meshing CutCell*.

- Pada bagian sizing, setting yang dilakukan antara lain fungsi *advanced sizing* pada kondisi *on: proximity and curvature*, menggunakan *relevance center* berkualitas *fine* serta menggunakan *smoothing* dengan kualitas *high*. Detail setting yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada gambar di bawah.

Details of "Mesh"	
[-] Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
<input type="checkbox"/> Relevance	0
[-] Sizing	
Use Advanced Size Function	On: Proximity and Curvature
Relevance Center	Fine
Smoothing	High
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default (18.0 °)
<input type="checkbox"/> Proximity Accuracy	0.5
<input type="checkbox"/> Num Cells Across Gap	Default (3)
Proximity Size Function Sources	Edges
<input type="checkbox"/> Min Size	8.1148e-006 m
<input type="checkbox"/> Proximity Min Size	8.1148e-006 m
<input type="checkbox"/> Max Size	6.6476e-002 m
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1.20)
Minimum Edge Length	1.e-004 m
[-] Inflation	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
<input type="checkbox"/> Transition Ratio	0.272
<input type="checkbox"/> Maximum Layers	5
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1.2
View Advanced Options	No
[-] Assembly Meshing	
Method	CutCell
Feature Capture	Program Controlled
Tessellation Refinement	Program Controlled
[-] Statistics	

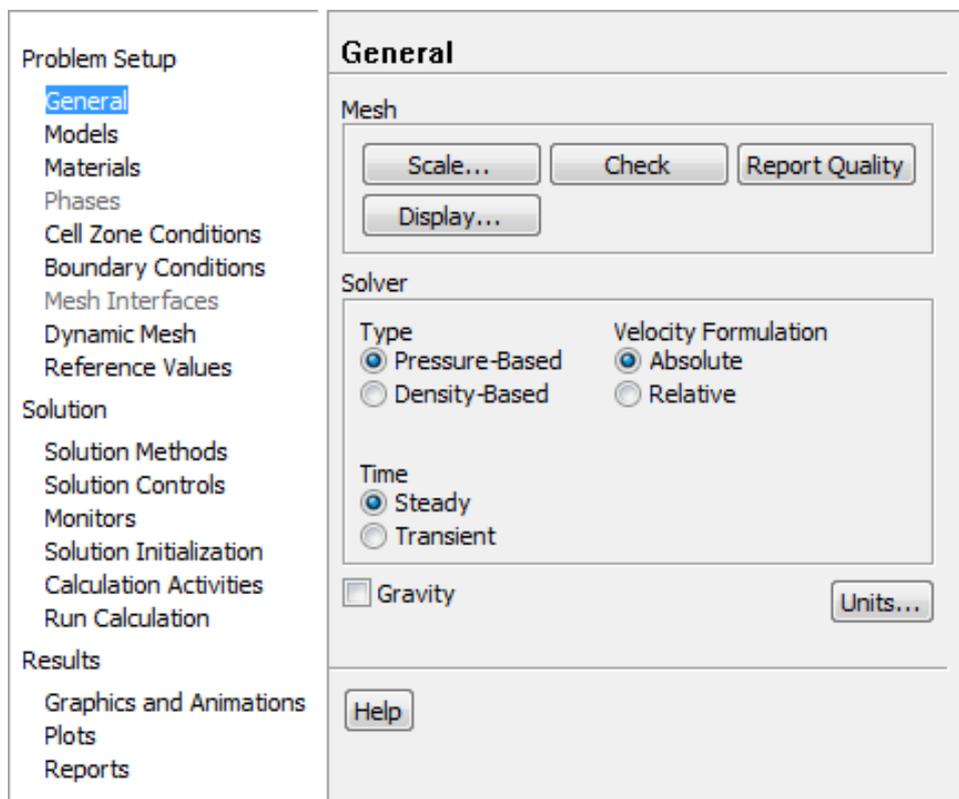
Gambar 3.24 Detail setting pada tahap *meshing*

Terakhir, dilakukan pengecekan kualitas *meshing* yaitu pengecekan kualitas *minimum area*, *orthogonal*, *aspect ratio* dan *skewness*. Nilai *minimum area* diharuskan bernilai besar dari 0, apabila terdapat nilai 0 maka terdapat bagian *meshing* yang *error* (*Ansys Fluent User's Guide*). Kualitas minimal *orthogonal* adalah besar 0.01, sedangkan nilai maksimum untuk *aspect ratio*

adalah 34.8 (Ansys Inc, 2010). Nilai *skewness* maksimal yang dapat ditoleransi adalah 0.95.

3.6.10 Solving

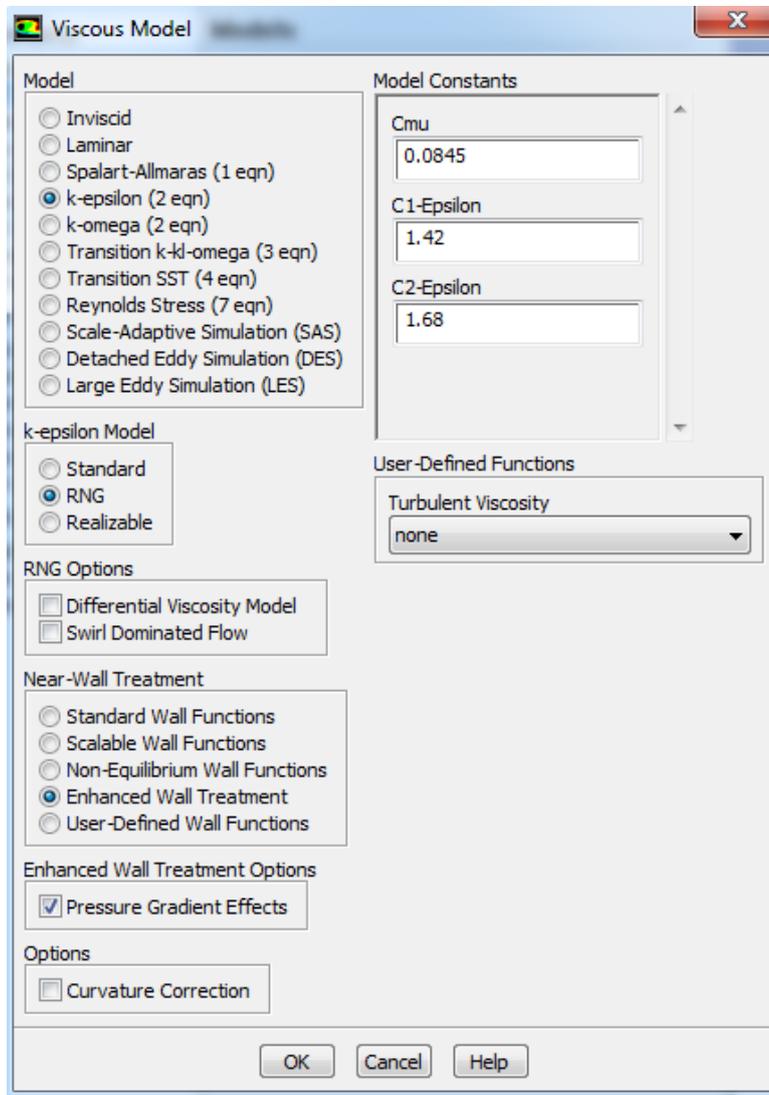
Pada tahapan ini, solver yang dipilih adalah analisis Fluent yang merupakan salah satu jenis analisis ansys. Pada menu awal, *pilihan double precision* dipilih terlebih dahulu sebelum melanjutkan ke tahap setting. Kemudian pada menu *problem setup*, *general setting* dibiarkan pada konfigurasi default seperti dapat dilihat di bawah:



Gambar 3.25 Detail *general setting* pada *problem setup*

Selanjutnya ditetapkan model perhitungan yang digunakan antara lain, menggunakan perhitungan viscosity dengan rumus energi dan k-epsilon model RNG untuk mensimulasikan turbulensi (Franke dkk, 2004), *near wall treatment* menggunakan *enhanced wall treatment* untuk mendapatkan hasil yang lebih

akurat di sekitar dinding model (*Ansys Fluent User's Guide*). Detail setting yang digunakan dapat dilihat pada gambar 3.24.



Gambar 3.26 Detail *setting* untuk model perhitungan

Setting *boundary layer* dilakukan dengan menentukan kecepatan angin pada bidang *inlet* dan menentukan setting bidang *outlet*. Kecepatan angin yang digunakan bersifat seragam yang besarnya ditentukan dari hasil analisis data pengukuran lapangan dan data iklim BMKG. Sementara itu setting bidang *outlet* yang digunakan adalah model *outflow*.

Solution methode yang digunakan adalah setting *default*. Selanjutnya ditetapkan jumlah iterasi yang dibutuhkan. Jumlah iterasi ini berdasarkan estimasi kerumitan model yaitu sebanyak 200 iterasi. Selanjutnya dapat dilakukan proses perhitungan atau *calculation* hingga didapatkan hasil yang *converged* atau nilai *residual error* dari perhitungan tersebut telah memenuhi nilai minimum yang dapat ditoleransi.

3.7 Analisis Penelitian

Analisis data di dalam penelitian ini dibagi menjadi beberapa tahap antara lain:

a. Tahap analisis data iklim

Analisis data iklim dilakukan untuk mengetahui karakter iklim dan standar kenyamanan di wilayah Surabaya. Dari analisis tersebut dapat ditentukan nilai rata-rata temperatur udara dan kelembaban udara per tahunnya. Selain itu, analisis data iklim juga diperlukan untuk mendapatkan nilai kecepatan angin yang sesuai dengan kebutuhan simulasi. Data kecepatan angin yang diperoleh dari BMKG perlu disesuaikan menggunakan rumus *Power law* agar sesuai dengan ketinggian dan kondisi lokasi penelitian.

b. Tahap analisis data simulasi

Hasil dari simulasi CFD adalah berupa data-data angka dan gambar simulasi. Data-data yang berupa angka perlu diinterpretasi terlebih dahulu menjadi bentuk grafik dan tabel agar lebih mudah dalam melakukan analisis.

c. Tahap analisis pengaruh *ventilation shaft* terhadap aliran udara di dalam bangunan antara lain:

- Untuk mengetahui seberapa baik kinerja sistem *ventilation shaft* dalam menghasilkan efek pendinginan fisiologis, maka kecepatan aliran udara yang terjadi di tiap titik ukur akan dibandingkan dengan kriteria pendinginan fisiologis oleh angin yang disebutkan oleh Szokolay (2004). Dengan demikian, dapat dilihat apakah titik tersebut memenuhi kriteria yang telah ditentukan. Tingkat pendinginan fisiologis yang dihasilkan oleh sistem *ventilation shaft* dapat diukur berdasarkan persentase jumlah titik

yang memenuhi kriteria dibandingkan dengan jumlah total titik ukur yang ada di lantai tersebut.

- Untuk mengetahui pengaruh ketinggian dan elemen desain terhadap distribusi aliran udara yang dihasilkan, ada beberapa langkah yang perlu dilakukan. Terlebih dahulu, perlu ditentukan nilai debit yang dihasilkan oleh masing-masing ruangan yang dihitung berdasarkan kecepatan aliran udara pada area bukaan internal kemudian dikalikan dengan luas area bukaan tersebut. Nilai debit tersebut selanjutnya dapat digunakan untuk mengukur distribusi aliran udara pada tiap lantai serta menentukan nilai *flow unbalance* atau tingkat ketidakseragaman distribusi aliran udara pada saluran cabang dengan cara membagi nilai debit terbesar dengan nilai terkecil dari debit yang dihasilkan saluran cabang atau saluran lateral (Bajura & Jones, 1971). Pada sistem *ventilation shaft*, debit dari saluran cabang tersebut dapat diinterpretasikan sebagai debit yang dihasilkan dari tiap lantai. Debit aliran udara, serta nilai *flow unbalance* dari masing-masing model (dari masing-masing variasi) akan dibandingkan dengan hasil dari grup kontrol untuk mengetahui pengaruh yang dihasilkan oleh masing-masing variasi.

BAB 4

HASIL SIMULASI DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Data Iklim Surabaya

Proses simulasi dengan menggunakan Ansys Fluent mengharuskan penggunaannya untuk memasukkan data lingkungannya sendiri, salah satunya adalah data mengenai kecepatan angin yang diperlukan dalam penelitian ini. Sumber data yang digunakan adalah data iklim bulanan pada tahun 2014 yang berasal dari Stasiun Meteorologi Perak I Surabaya. Data iklim tersebut perlu diolah terlebih dahulu sebelum dapat digunakan di dalam proses simulasi agar dapat disesuaikan dengan kondisi di sekitar lokasi obyek yang disimulasikan. Selain itu, data tersebut juga dapat digunakan untuk menentukan seberapa besar kecepatan angin yang dibutuhkan untuk menghasilkan kondisi yang nyaman di dalam bangunan.

Tabel 4.1 Data iklim tahun 2014 untuk wilayah Surabaya

B U L A N	Temperatur Udara (⁰ C).			Kelembaban Udara (%).			Arah dan Kecepatan Angin (m/s)			
	Rata-2	Max	Min	Rata-2	Max	Min	Arah terbanyak	Kec Rata2	Arah	Kec Max
JANUARI	27,4	34,4	23,6	81	97	54	B	3,09	310	12,86
PEBRUARI	27,5	34,3	23,0	83	97	54	B	3,60	310	15,95
MARET	28,6	34,6	23,0	79	100	49	B	3,09	150	15,43
APRIL	28,8	35,8	24,1	79	97	46	BL	3,09	040	15,95
M E I	29,6	35,3	23,8	75	97	41	T	3,60	160	11,32
J U N I	29,3	35,1	23,8	74	97	45	T	3,09	060	10,80
J U L I	28,6	34,0	22,0	70	93	43	T	3,09	080	10,80
AGUSTUS	28,4	34,2	21,8	67	90	37	T	4,12	060	13,89
SEPTEMBER	28,7	35,3	21,8	62	88	52	T	4,12	060	12,86
OKTOBER	30,1	37,3	22,9	61	91	48	T	4,63	050	12,86
NOPEMBER	30,0	37,6	24,8	69	93	26	T	3,09	050	12,86
DESEMBER	28,1	35,4	23,8	80	100	53	B	3,09	180	12,86
RATA-2	28,8	35,3	23,2	73	95	46		3,60		13,38
MAX	30,1	37,6	24,8	83	100	54		4,63		15,95
MIN	27,4	34,0	21,8	61	88	26		3,09		10,80

Sumber: BMKG Perak I Surabaya

Tabel di atas menampilkan data mengenai temperatur, kelembaban dan kecepatan angin. Hal tersebut ditujukan untuk mengetahui gambaran kondisi iklim di kota Surabaya secara umum. Dari data di atas dapat diketahui bahwa temperatur udara di Surabaya tahun 2014 memiliki rata-rata sekitar 28,8°C dan temperatur maksimum rata-rata sekitar 35,3°C dan kelembaban rata-rata sekitar 73%.

Dari data iklim di atas dapat pula diketahui bahwa kecepatan angin rata-rata di Surabaya adalah sekitar 3,6 m/s dengan asumsi bahwa data tersebut diambil pada ketinggian 10 m dan kondisi *terrain roughnes* lokasinya adalah setara dengan kondisi *open country*. Dengan demikian kecepatan angin *freestream* dapat dihitung dengan menggunakan rumus *power law*. Hasil perhitungan yang diperoleh menunjukkan bahwa kecepatan angin *freestream* adalah sekitar 5,99 m/s.

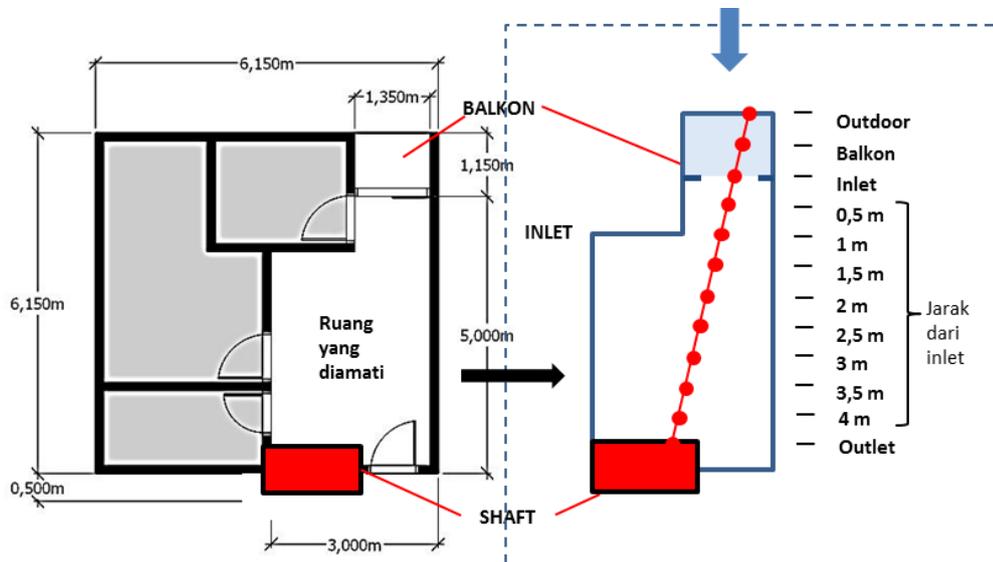
Dengan menggunakan rumus *power law*, kecepatan angin di lokasi obyek yang diuji juga dapat diketahui. Lokasi tersebut dapat dikategorikan sebagai daerah *suburban* dengan pertimbangan kondisi keberadaan bangunan tinggi lainnya yang masih cukup jarang di lokasi tersebut, sehingga kecepatan angin yang dihitung dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 4.2 Konversi kecepatan angin *freestream* menjadi kecepatan angin lokal berdasarkan ketinggian untuk daerah suburban

Kecepatan angin freestream (m/s)	Ketinggian (m)	Kecepatan angin lokal (m/s)
5,99	10	2,38
	20	2,83
	30	3,13
	40	3,37
	50	3,56
	60	3,73
	70	3,87
	80	4,00
	90	4,12
	100	4,24

Berdasarkan pembagian kelompok ketinggian pada bab sebelumnya, simulasi dilakukan pada ketinggian sekitar 50m – 100m yang memiliki gradien kecepatan angin yang hampir seragam. Oleh karena itu nilai kecepatan angin lokal yang digunakan sebagai *input* untuk simulasi merupakan nilai rata-rata dari nilai kecepatan angin lokal pada ketinggian 50m hingga 100m. Hasil dari rata-rata kecepatan angin lokal tersebut adalah sebesar 3,92 m/s.

4.2 Kinerja *ventilation shaft* dalam menghasilkan efek pendinginan fisiologis oleh angin dan pemerataan kecepatan aliran udara



Gambar 4.1 Denah titik pengukuran kecepatan angin

Untuk melakukan analisis terhadap kinerja *ventilation shaft* pada setiap model, diperlukan titik-titik referensi untuk mengukur kecepatan aliran udara di dalam ruangan. Titik-titik yang diukur terletak pada garis yang ditarik dari batas luar balkon hingga mencapai lubang internal yang menghubungkan ruangan dengan *ventilation shaft*. Titik-titik tersebut antara lain terletak pada area *outdoor* yaitu di ujung balkon dan di tengah balkon untuk mengetahui kecepatan angin dari luar, kemudian untuk pengukuran angin di area *indoor* dimulai dari *inlet* dan setiap jarak setengah meter dari *inlet* tersebut (gambar 4.2). Pengukuran pada titik-titik tersebut dilakukan pada ketinggian 1 m dari permukaan lantai di setiap

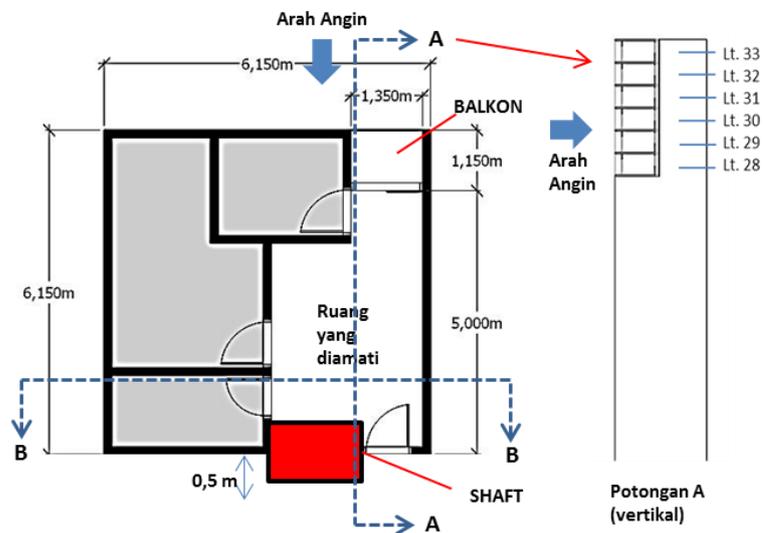
lantai yang diamati. Pengamatan pada ketinggian 1 m tersebut didasarkan pada ketinggian manusia saat sedang duduk.

Penelitian ini tidak menyertakan faktor temperatur udara dan kelembaban atau RH sebagai variabel yang diukur. Meski demikian diperlukan suatu standar untuk mengukur seberapa baik kinerja *ventilation shaft* dalam menghasilkan aliran udara yang dapat dianggap nyaman. Oleh karena itu, kinerja masing-masing model dalam menghasilkan efek pendinginan fisiologis oleh angin akan diukur berdasarkan kecepatan aliran udara yang dihasilkan kemudian dibandingkan dengan standar umum mengenai kecepatan aliran udara yang nyaman untuk mengetahui efek yang dihasilkan dari aliran udara tersebut. Szokolay (2004) menyebutkan bahwa respon subjektif terhadap aliran udara secara umum dapat dibagi menjadi beberapa kategori berdasarkan kecepatannya yaitu kurang dari 0,2 m/s aliran udara tidak dapat dirasakan, antara 0,2 m/s – 0,5 m/s dapat digolongkan ke dalam kondisi nyaman, antara 0,5 m/s – 1 m/s aliran udara dapat dirasakan keberadaannya, serta antara 1 m/s hingga 1,5 m/s secara umum dapat dianggap kurang nyaman. Meski demikian, Szokolay juga menambahkan bahwa pada kondisi yang panas, kecepatan dalam rentang tersebut masih dapat dianggap nyaman dan dapat ditoleransi, bahkan hingga kecepatan 2 m/s pun masih dapat dianggap nyaman. Pada kondisi panas kecepatan aliran udara dapat dianggap tidak nyaman apabila menimbulkan gangguan sekunder berupa kertas-kertas yang berterbangan dan lainnya, yaitu pada kecepatan di atas 1,5 m/s (Szokolay, 1997). Pernyataan tersebut juga diperkuat oleh Hardiman (1992, dalam Wouters dan Santamouris, 2006), yang menyebutkan bahwa untuk aktivitas ringan di dalam ruangan, kecepatan angin yang dianggap nyaman berkisar antara 0,2 - 1,5 m/s. Dengan demikian, kondisi nyaman untuk penelitian ini dapat ditentukan berdasarkan pengaruh fisik yang dapat ditimbulkan dari aliran udara yaitu antara 0,5 m/s yang berarti aliran udara dapat dirasakan keberadaannya, hingga maksimal sebesar 1,5 m/s karena di atas kecepatan tersebut aliran udara dapat menimbulkan gangguan sekunder berupa kertas berterbangan dan lainnya.

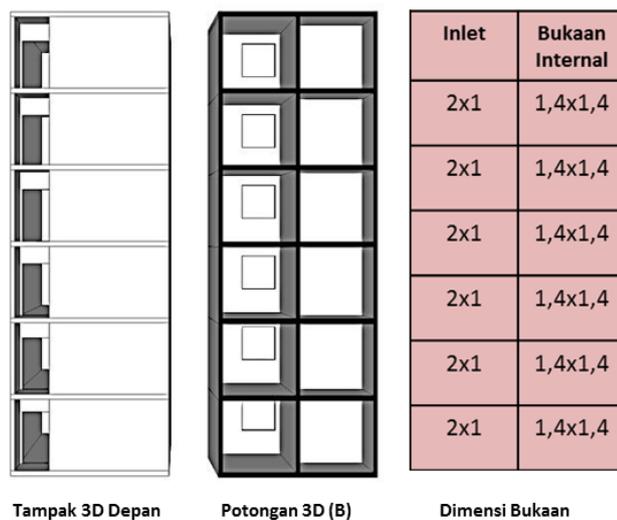
Setiap model pada penelitian ini memiliki beberapa lantai yang terhubung dengan *ventilation shaft* sehingga kinerja dari model tersebut juga perlu diukur berdasarkan pemerataan kecepatan aliran udara antara satu lantai dengan yang

lainnya. Untuk mengukur pemerataan kecepatan aliran udara, pada tiap lantai dapat diambil 3 titik yang mewakili masing-masing lantai yaitu di titik *inlet*, di tengah ruangan (titik 2,5 m) dan di *outlet* ruangan (di dekat lubang internal yang menghubungkan ruangan dengan *ventilation shaft*), kemudian dibandingkan dengan kecepatan aliran udara yang dihasilkan pada lantai paling atas tiap model untuk mengetahui seberapa besar perbedaannya.

4.2.1 Kinerja model *base case* (H1S1)

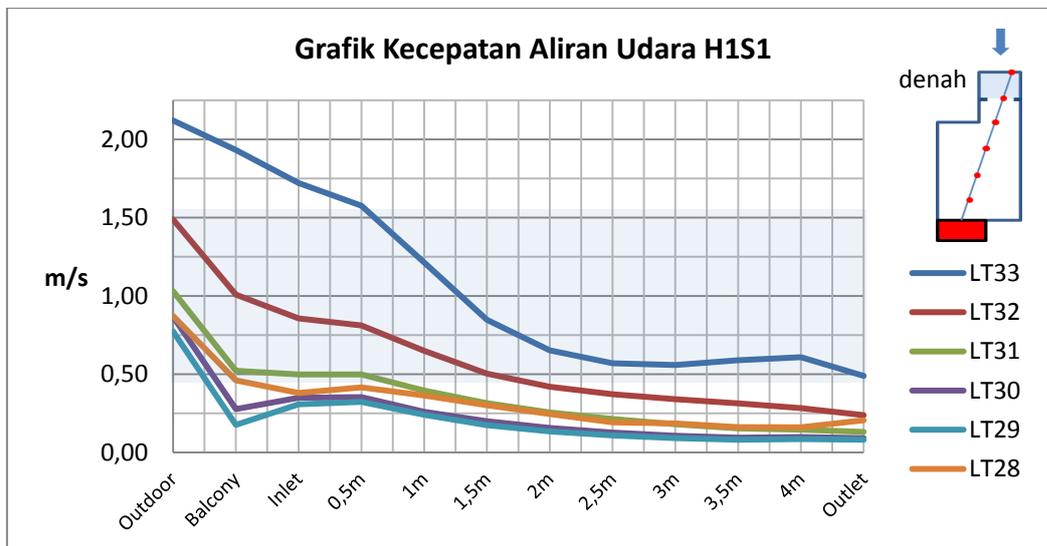


Gambar 4.2 Detail denah model H1S1



Gambar 4.3 Detail konfigurasi bukaan pada model H1S1

Model H1S1 merupakan model dasar yang digunakan untuk membuat perbandingan dengan model-model lainnya. Model ini memiliki lubang *inlet* sebesar 2x1 m (2 m²) dan lubang *outlet* ruangan (lubang internal penghubung antara ruangan dengan *shaft*) sebesar 1,4x1,4 m (1,96 m²) sehingga memiliki rasio yang mendekati 1:1 antara lubang *inlet* dengan *outlet* di tiap lantainya. Sementara itu, besar *shaft* yang digunakan (luas penampang *shaft*) pada model ini adalah 2x1 m (2 m²). Dengan demikian setiap lubang atau bukaan yang ada pada model ini, yaitu lubang *inlet*, lubang internal yang menghubungkan ruangan dengan *shaft*, serta lubang *outlet shaft* yang terletak di atap memiliki luasan yang hampir sama dengan rasio yang mendekati 1:1:1.



Gambar 4.4 Grafik kecepatan aliran udara model H1S1

Kecepatan aliran udara yang terjadi pada model H1S1 memiliki pola yang hampir serupa pada setiap lantainya, namun dengan nilai kecepatan yang berbeda-beda. Pada antara titik *inlet* hingga titik 0,5 m, kecepatan aliran udara tidak mengalami perbedaan yang cukup besar. Kecepatan aliran udara mengalami penurunan drastis mulai dari titik 1 m, yaitu titik di mana aliran udara mulai memasuki area ruangan yang lebih besar, hingga titik 2,5 m, yang berada hampir di tengah-tengah ruangan. Selanjutnya, kecepatan aliran udara relatif stabil yaitu dari titik 2,5 m hingga mencapai *outlet* ruangan (lubang internal).

Berdasarkan grafik di atas, dapat diidentifikasi pula bahwa tidak semua lantai pada model H1S1 mendapatkan aliran udara yang dapat menghasilkan efek pendinginan fisiologis oleh angin, yaitu antara 0,5 m/s hingga 1,5 m/s. Pada lantai teratas (lantai 33), hampir seluruh titik yang diukur memenuhi kriteria efek pendinginan fisiologis oleh angin kecuali 2 titik yaitu titik *inlet* dan titik 0,5 m sehingga total titik yang memenuhi kriteria efek pendinginan fisiologis oleh angin pada lantai 33 adalah mencapai 80%. Pada lantai 32, jumlah titik yang memenuhi kriteria efek pendinginan fisiologis oleh angin adalah sebesar 40%, yaitu di area *inlet* hingga titik 1,5 m. Pada lantai 31, kecepatan aliran udara semakin menurun sehingga hanya titik *inlet* dan titik 0,5 m yang memenuhi kriteria efek pendinginan fisiologis oleh angin, atau hanya sekitar 20% dari semua titik ukur pada lantai tersebut. Sementara itu pada 3 lantai paling bawah yaitu lantai 30 hingga 28, kecepatan aliran udara sangat rendah yaitu di bawah 0,5 m/s sehingga tidak dapat dirasakan keberadaannya. Hal tersebut menunjukkan bahwa model H1S1 atau *base case* hanya mampu menghasilkan efek pendinginan fisiologis oleh angin di sebagian area lantai 33, 32 dan 31, namun tidak mampu menghasilkan efek pendinginan fisiologis oleh angin di lantai 30, 29 dan 28.

Tabel 4.3 Perbandingan kecepatan aliran udara di tiap lantai model H1S1

	Inlet	ΔV	2,5m	ΔV	Outlet	ΔV
LT33	1,72	-	0,57	-	0,49	-
LT32	0,86	-50%	0,37	-35%	0,24	-51%
LT31	0,50	-71%	0,21	-62%	0,13	-73%
LT30	0,35	-80%	0,13	-78%	0,09	-81%
LT29	0,31	-82%	0,11	-81%	0,08	-83%
LT28	0,38	-78%	0,19	-66%	0,21	-58%

Keterangan:

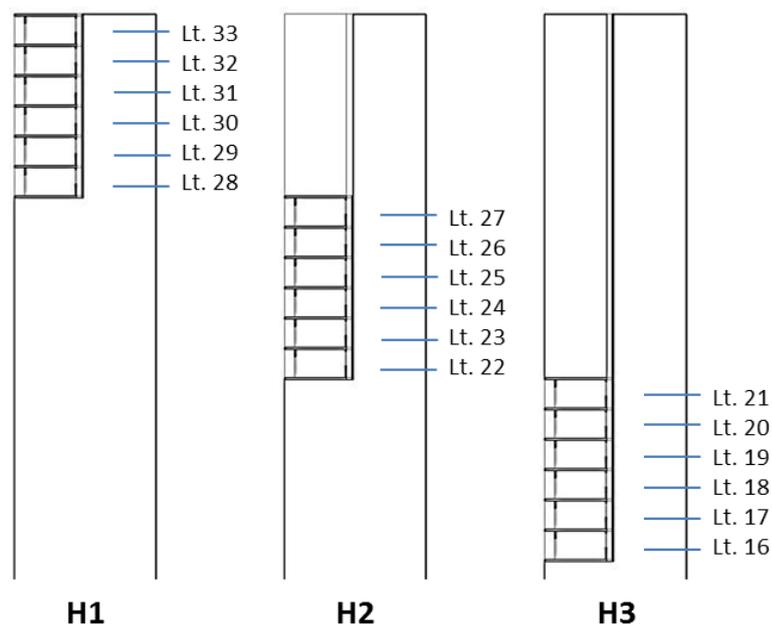
ΔV : persentase selisih kecepatan aliran udara di titik tersebut dibandingkan dengan kecepatan aliran udara di titik yang sama pada lantai 33

2,5m : titik ukur yang berjarak 2,5m dari *inlet* sebagai perwakilan titik ukur di tengah ruangan

Berdasarkan grafik di atas (gambar 4.4), dapat diamati pula bahwa kecepatan aliran udara pada lantai 33 dan 32 memiliki perbedaan yang jauh dengan lantai-lantai lainnya. Perbandingan kecepatan aliran udara di tiap lantai

model H1S1 dapat dilihat pada tabel di atas. Kecepatan aliran udara pada tiap lantai diwakili oleh 3 titik utama yaitu titik *inlet*, titik 2,5 m yang mewakili area di tengah ruangan, serta titik *outlet* ruangan (titik di dekat lubang internal yang menghubungkan ruangan dengan *ventilation shaft*). Pada titik *inlet*, kecepatan aliran udara pada lantai 32 hingga 28 adalah lebih rendah antara 50% hingga 82% dibandingkan dengan lantai 33. Sementara itu, pada titik 2,5 m (tengah ruangan) dan titik *outlet* ruangan, perbedaan yang terjadi masing-masing adalah antara 35% hingga 81% serta 51% hingga 83% dibandingkan dengan lantai 33. Perbedaan kecepatan aliran udara antara tiap lantai tersebut cukup signifikan sehingga dapat dikatakan bahwa kecepatan aliran udara yang dihasilkan oleh tiap lantai pada model H1S1 sangat tidak merata.

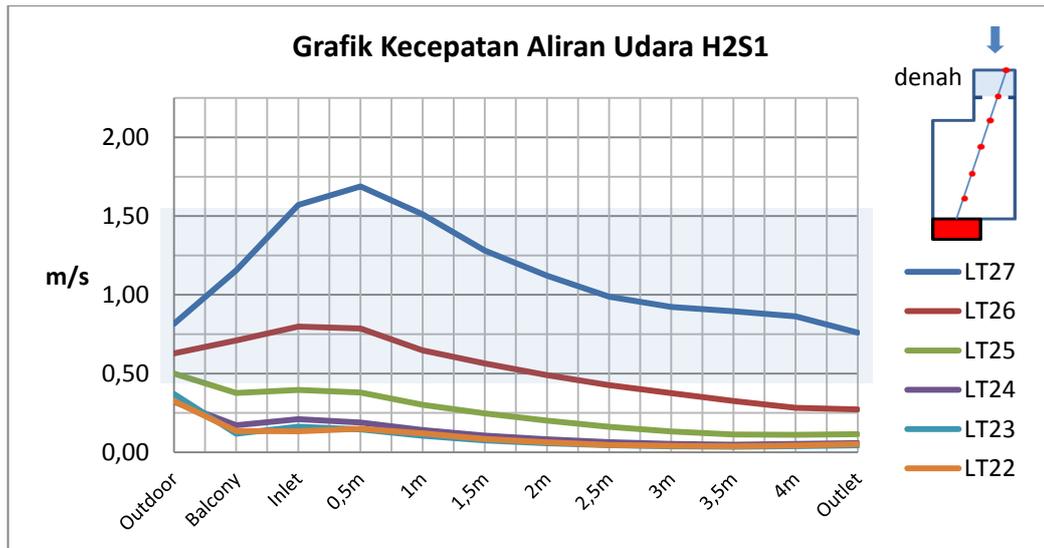
4.2.2 Kinerja ventilasi model H2S1 dan H3S1



Gambar 4.5 Lantai-lantai yang diamati pada tiap kelompok ketinggian

Model H2S1 dan H3S1 merupakan model dasar pada kelompok ketinggian H2 dan H3 seperti ditunjukkan pada gambar 4.3. Kedua model tersebut memiliki konfigurasi bukaan serta orientasi yang sama dengan model H1S1. Perbedaan

utama pada kedua model tersebut terletak pada ketinggian model tersebut pada bangunan serta konsekuensinya berupa *shaft* yang lebih panjang dari model H1S1. Secara vertikal, model H2S1 merupakan kelompok ketinggian yang berada di tengah (secara vertikal) sementara model H3S1 merupakan model yang berada pada ketinggian paling rendah (di bawah model H2S1).



Gambar 4.6 Grafik kecepatan aliran udara model H2S1

Tabel 4.4 Perbandingan kecepatan aliran udara di tiap lantai model H2S1

	Inlet	ΔV	2,5m	ΔV	Outlet	ΔV
LT27	1,57	-	0,99	-	0,76	-
LT26	0,80	-49%	0,43	-57%	0,27	-64%
LT25	0,40	-75%	0,16	-84%	0,11	-85%
LT24	0,21	-87%	0,06	-93%	0,06	-92%
LT23	0,16	-90%	0,05	-95%	0,04	-94%
LT22	0,13	-91%	0,05	-95%	0,05	-93%

Berdasarkan grafik di atas, dapat diamati bahwa pada lantai paling atas model H2S1 (lantai 27), terjadi percepatan aliran udara yaitu dari ujung balkon yang kecepatannya hanya mencapai 0,82 m/s kemudian mengalami percepatan saat memasuki *inlet* hingga mencapai kecepatan 1,53 m/s hingga 1,69 m/s di titik *inlet* dan titik 0,5 m. Kecepatan aliran udara mulai menurun saat memasuki area ruangan yang lebih besar, yaitu mulai dari titik 1 m hingga mencapai *outlet* ruangan. Pola kecepatan aliran udara yang serupa terjadi juga di lantai 26, namun

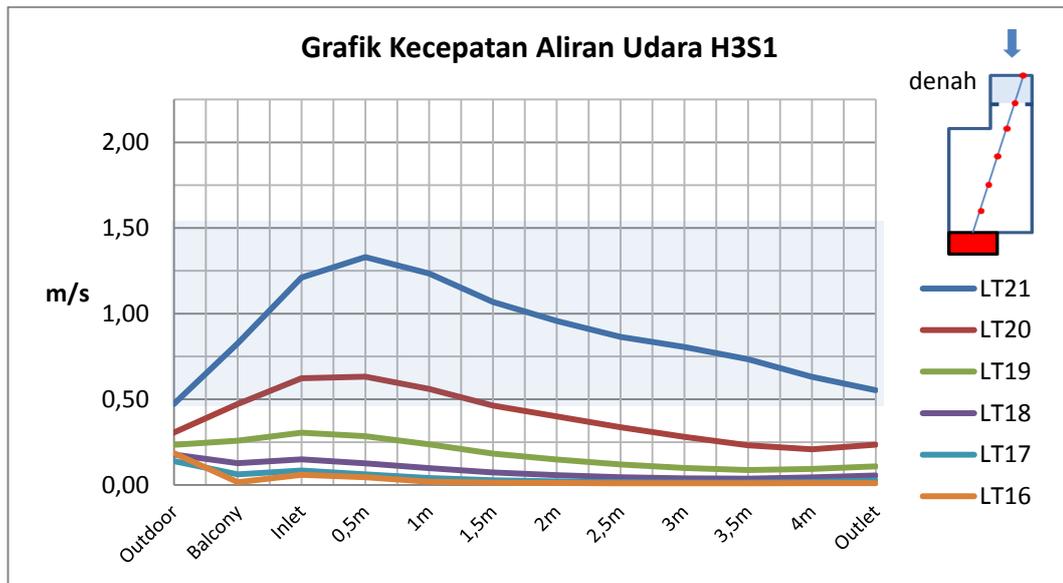
pada lantai-lantai di bawahnya, kecepatan aliran udara sangat rendah sehingga tidak terjadi kenaikan atau penurunan kecepatan yang signifikan.

Pada lantai 27, kecepatan aliran udara di dekat *inlet* (titik *inlet*, 0,5 m dan 1 m) melampaui batas 1,5 m/s yang ditetapkan sebagai batas maksimal kecepatan aliran udara yang dianggap nyaman. Dari 10 titik yang diukur pada lantai 27, terdapat 7 titik yang memenuhi kriteria efek pendinginan fisiologis oleh angin, yaitu antara titik 1,5 m hingga titik *outlet* ruangan, atau mencapai 70% dari total titik yang diukur pada lantai tersebut. Pada lantai 26, jumlah titik yang memenuhi kriteria efek pendinginan fisiologis oleh angin hanya mencapai 40% yaitu dari titik *inlet* hingga titik 1,5 m, atau hanya terjadi di area yang dekat dengan *inlet*. Sementara itu, 4 lantai di bawahnya, yaitu lantai 25 hingga 22, kecepatan aliran udara sangat rendah atau di bawah 0,5 m/s sehingga tidak dapat dirasakan keberadaannya. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa terjadi kesenjangan yang cukup besar dari segi kecepatan aliran udara pada lantai paling atas model H2S1 dengan lantai-lantai di bawahnya. Model H2S1 juga hanya mampu menghasilkan efek pendinginan fisiologis oleh angin di sebagian titik yang diukur pada lantai 27 dan 26 (yang merupakan 2 lantai paling atas pada model tersebut).

Kesenjangan atau ketidakmerataan kecepatan aliran udara tersebut dapat dilihat pada tabel 4.4 di atas. Di titik *inlet*, perbedaan kecepatan aliran udara yang terjadi antara lantai 27 (paling atas) dengan lantai-lantai di bawahnya sangat besar, yaitu antara 49% hingga 91%. Hal yang serupa juga terjadi di tengah ruangan (titik 2,5 m) dan di titik *outlet* ruangan yaitu perbedaan yang besar, masing-masing yaitu antara 57%-95% serta 64%-94%. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa model H2S1 yang berada pada ketinggian lantai 27 hingga 22 tidak dapat menghasilkan kecepatan aliran udara yang merata di tiap lantainya.

Tabel 4.5 Perbandingan kecepatan aliran udara di tiap lantai model H3S1

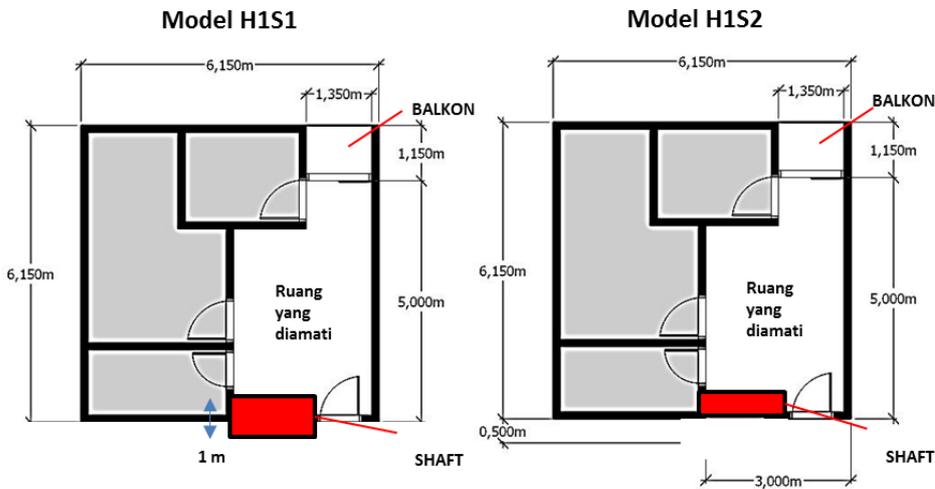
	Inlet	ΔV	2,5m	ΔV	Outlet	ΔV
LT21	1,21	-	0,86	-	0,55	-
LT20	0,62	-49%	0,34	-61%	0,24	-57%
LT19	0,31	-75%	0,12	-86%	0,11	-80%
LT18	0,15	-88%	0,05	-95%	0,06	-90%
LT17	0,08	-93%	0,02	-98%	0,03	-95%
LT16	0,06	-95%	0,01	-99%	0,01	-98%



Gambar 4.7 Grafik kecepatan aliran udara model H3S1

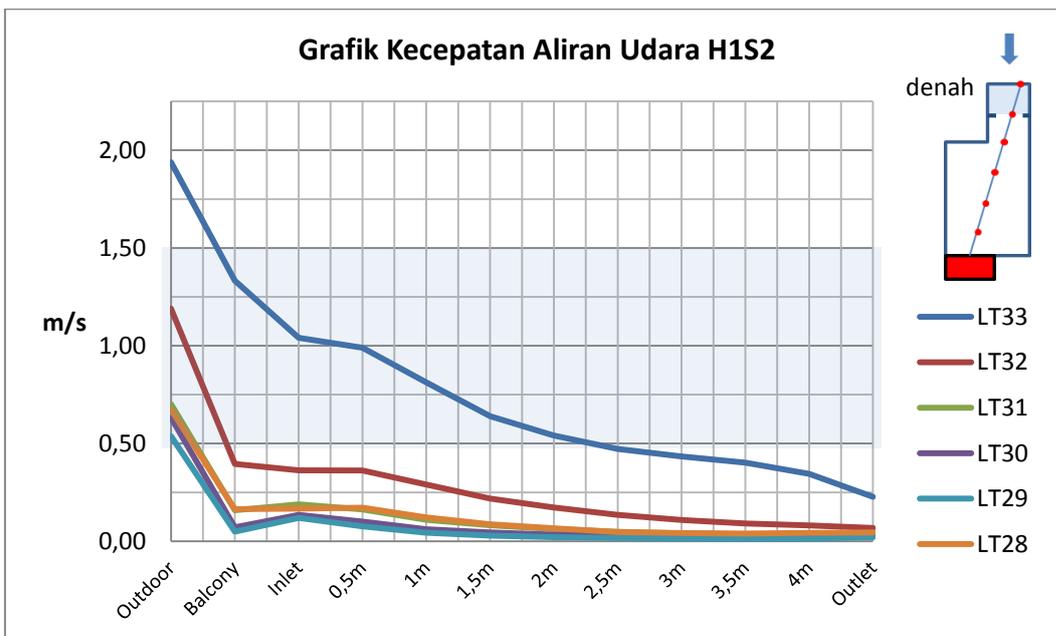
Kecepatan aliran udara yang dihasilkan model H3S1 memiliki kemiripan pola dengan model H2S1 namun dengan kecepatan yang lebih rendah. Hal tersebut dapat dilihat dari kecepatan aliran udara di lantai 21 (lantai paling atas model H3S1) yang seluruhnya berada di rentang kecepatan aliran udara yang mampu menghasilkan efek pendinginan fisiologis oleh angin antara 0,5 m/s hingga 1,5 m/s, sehingga titik ukur yang tergolong nyaman mencapai 100% dari total titik ukur pada lantai tersebut. Pada lantai 20, titik ukur yang tergolong nyaman hanya mencapai 30% dari total di lantai tersebut, yaitu pada titik *inlet* hingga titik 1 m sedangkan pada lantai 19 hingga 16, kecepatan aliran udara yang dihasilkan sangat rendah (di bawah 0,5 m/s) sehingga tidak ada titik ukur yang memenuhi kriteria agar tergolong nyaman. Persentase selisih kecepatan aliran udara yang dihasilkan pada lantai paling atas model H3S1 (lantai 21) dengan lantai-lantai dibawahnya dapat dilihat pada tabel 4.5. Perbedaan kecepatan aliran udara di titik *inlet*, tengah ruangan (titik 2,5 m) dan *outlet* ruangan masing-masing mencapai 49%-95%, 61%-99% serta 57% hingga 98%. Hal tersebut menunjukkan kurangnya kemampuan model H3S1, yang mendapat *treatment* pada letak ketinggian model di dalam bangunan (yaitu antara lantai 21 hingga 16), dalam menghasilkan efek pendinginan fisiologis oleh angin serta dalam menghasilkan kecepatan aliran udara yang merata di tiap lantainya.

4.2.3 Kinerja ventilasi model H1S2



Gambar 4.8 Perbedaan ukuran *shaft* antara model H1S1 dan H1S2

Model H1S2 merupakan model yang mendapatkan perlakuan atau *treatment* berupa variasi pada ukuran (luas penampang) *shaft* yang digunakan. Pada model H1S1 *shaft* yang digunakan memiliki ukuran sebesar 2x1 m sementara model H1S2 memiliki *shaft* yang berukuran lebih kecil yaitu 2x0,5 m (50% dari ukuran *shaft* H1S1).



Gambar 4.9 Grafik kecepatan aliran udara model H1S2

Tabel 4.6 Perbandingan kecepatan aliran udara di tiap lantai model H1S2

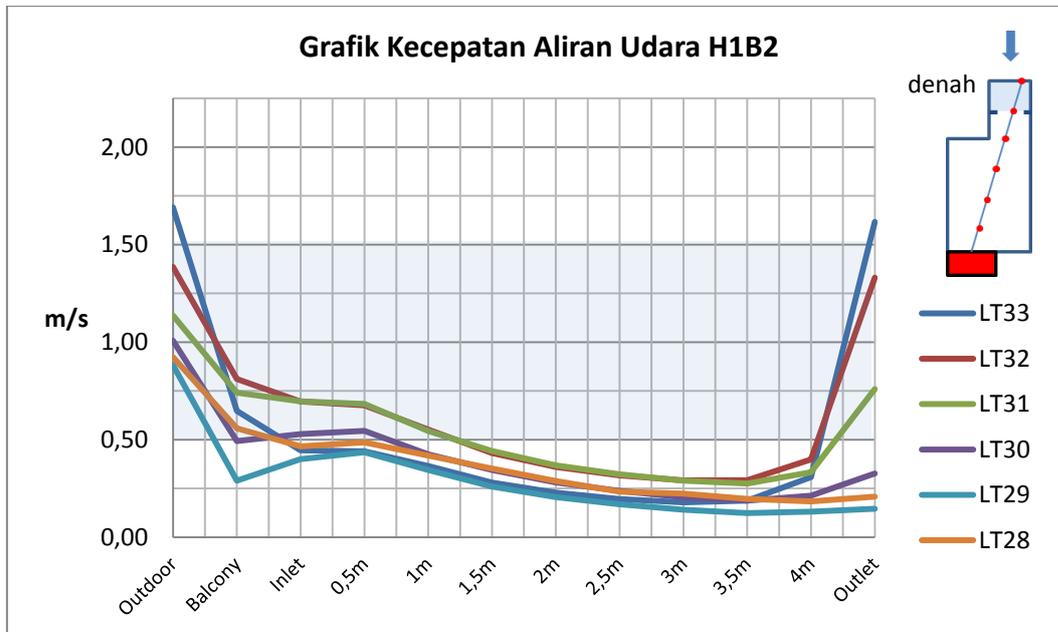
	Inlet	ΔV	2,5m	ΔV	Outlet	ΔV
LT33	1,04	-	0,47	-	0,23	-
LT32	0,36	-65%	0,14	-71%	0,07	-70%
LT31	0,19	-82%	0,05	-90%	0,04	-84%
LT30	0,14	-87%	0,03	-94%	0,03	-89%
LT29	0,12	-89%	0,02	-97%	0,02	-91%
LT28	0,17	-84%	0,05	-90%	0,05	-80%

Berdasarkan tabel dan grafik di atas dapat diidentifikasi bahwa aliran udara yang terjadi pada model H1S2 juga lebih banyak terpusat pada lantai paling atas yang dekat dengan *outlet*, sedangkan lantai-lantai di bawahnya tidak mendapatkan kecepatan aliran udara yang signifikan. Pada lantai 33, kecepatan aliran udara di titik *inlet* adalah sebesar 1,04 m/s, kemudian berkurang hingga 0,47 ms di titik 2,5 m atau di tengah ruangan, hingga nilai terendah terjadi di titik *outlet* ruangan yaitu sebesar 0,23 m/s. kecepatan aliran udara di lantai 32 berkurang sangat drastis apabila dibandingkan dengan kecepatan aliran udara di lantai 33. Pada lantai 32, kecepatan aliran udara di *inlet*, titik 2,5 m dan *outlet* masing-masing adalah 0,36 m/s, 0,14 m/s dan 0,7 m/s, yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan lantai di atasnya, yaitu masing-masing mengalami penurunan sebesar 65%, 71% dan 70%. Sementara itu, kecepatan aliran udara pada lantai 31 hingga 28 mengalami penurunan yang lebih besar lagi dibandingkan dengan lantai 33, yaitu antara 65% hingga 97%.

Efek pendinginan fisiologis oleh angin yang dihasilkan oleh model H1S2 juga tidak terlalu baik karena hanya sebagian titik ukur di lantai 33 yang memenuhi kriteria efek pendinginan fisiologis oleh angin, yaitu hanya sekitar 50% dari total titik ukur di lantai tersebut, sementara pada lantai lainnya, tidak ada satu pun titik ukur yang mampu memenuhi kriteria efek pendinginan fisiologis oleh angin. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa model H1S2 yang mendapat *treatment* berupa ukuran *ventilation shaft* yang lebih kecil memiliki kinerja yang sangat buruk dalam menghasilkan efek pendinginan fisiologis oleh angin dan pemerataan kecepatan aliran udara di tiap lantainya.

4.2.4 Kinerja ventilasi model H1B2 dan H1B3

Model H1B2 dan H1B3 adalah model yang mendapat perlakuan pada konfigurasi lubang *inlet* dan lubang internal yang menghubungkan masing-masing lantai dengan *shaft*. Pada model H1B2, lubang *inlet* nya dibuat seragam dengan luasan sebesar 2x1 m sementara lubang internalnya bervariasi dengan ukuran mulai dari 0,5m x 0,5m pada lantai paling atas (lantai 33) semakin membesar pada tiap lantai di bawahnya hingga lubang internal paling besar berukuran 1,5m x 1,5m pada lantai 28 (lantai terbawah). Sementara itu model H1B3 mendapatkan perlakuan berupa variasi seperti model H1B2 namun tidak hanya pada lubang internalnya melainkan juga pada lubang *inlet* nya.



Gambar 4.10 Grafik kecepatan aliran udara model H1B2

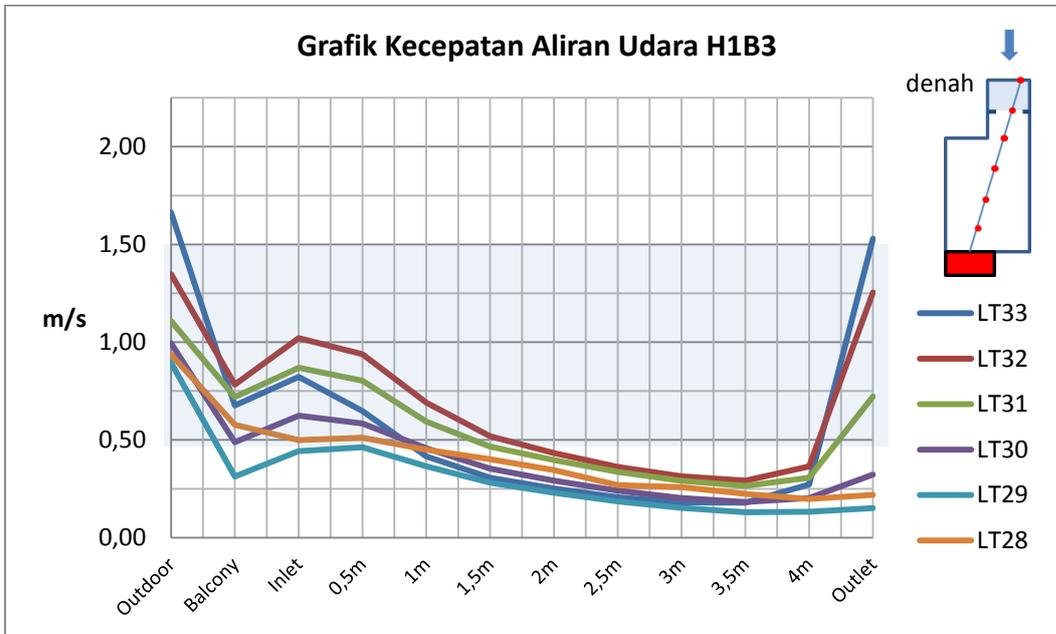
Tabel 4.7 Perbandingan kecepatan aliran udara di tiap lantai model H1B2

	Inlet	ΔV	2,5m	ΔV	Outlet	ΔV
LT33	0,45	-	0,20	-	1,62	-
LT32	0,70	56%	0,32	62%	1,33	-18%
LT31	0,70	56%	0,32	65%	0,76	-53%
LT30	0,53	19%	0,24	22%	0,33	-80%
LT29	0,40	-10%	0,17	-14%	0,15	-91%
LT28	0,47	5%	0,23	19%	0,21	-87%

Berdasarkan grafik di atas, dapat diamati bahwa model H1B2 memiliki kinerja yang kurang memuaskan apabila ditinjau dari segi efek pendinginan fisiologis oleh angin yang dihasilkan. Lantai 33 yang merupakan lantai teratas pada model H1B2, yang memiliki lubang internal paling kecil, hanya menghasilkan kecepatan aliran udara di bawah nilai minimum yaitu 0,5 m/s di hampir semua titik ukurnya, kecuali pada titik *outlet* yang mengalami peningkatan kecepatan cukup drastis hingga melampaui batas 1,5 m/s sehingga tidak ada titik ukur yang memenuhi kriteria efek pendinginan fisiologis oleh angin di lantai 33. Aliran udara yang memenuhi kriteria efek pendinginan fisiologis oleh angin baru terjadi pada lantai 32, 31 dan 30, yaitu masing-masing menghasilkan efek pendinginan fisiologis oleh angin pada 40%, 40% dan 20% dari total titik ukur di tiap lantai tersebut. Titik ukur yang memenuhi kriteria efek pendinginan fisiologis oleh angin tersebut hanya terjadi di area di dekat *inlet*, sementara area di tengah ruangan seluruhnya hanya menghasilkan kecepatan aliran udara di bawah 0,5 m/s.

Berdasarkan gambar 4.10, dapat diamati bahwa model H1b2 memiliki pemerataan kecepatan aliran udara yang cukup baik, yaitu dilihat dari garis-garis yang merepresentasikan kecepatan aliran udara di tiap lantai yang memiliki jarak yang cukup rapat antara satu dengan lainnya. Hal tersebut menunjukkan bahwa perbedaan kecepatan aliran udara yang dihasilkan tidak terlalu besar antara satu dengan lainnya. Persentase selisih kecepatan aliran udara dapat dilihat pada tabel 4.7. Pada titik *inlet* dan tengah ruangan (titik 2,5 m), perbedaan kecepatan aliran udara masing-masing berkisar antara -10% hingga 56% (angka minus menunjukkan terjadinya penurunan kecepatan aliran udara) serta -14% hingga 65%. Perbedaan kecepatan di titik *outlet* ruangan menunjukkan pola penurunan dari lantai paling atas hingga lantai paling bawah. Hal tersebut disebabkan oleh ukuran lubang internal pada lantai paling atas yang sangat kecil sehingga kecepatan aliran udara yang melewati lubang internal tersebut mengalami percepatan yang cukup signifikan yang diakibatkan oleh efek venturi. Moore (1993) menyebutkan bahwa *venturi effect* ini menyebabkan terjadinya percepatan aliran udara saat aliran tersebut mengalir dari area yang lebih luas ke area yang lebih sempit. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa model H1B2 yang mendapatkan *treatment* berupa ukuran lubang internal yang semakin membesar

pada lantai yang lebih rendah memiliki tingkat pemerataan kecepatan aliran udara yang cukup baik, namun kecepatannya masih kurang untuk memenuhi kriteria efek pendinginan fisiologis oleh angin.



Gambar 4.11 Grafik kecepatan aliran udara model H1B3

Tabel 4.8 Perbandingan kecepatan aliran udara di tiap lantai model H1B3

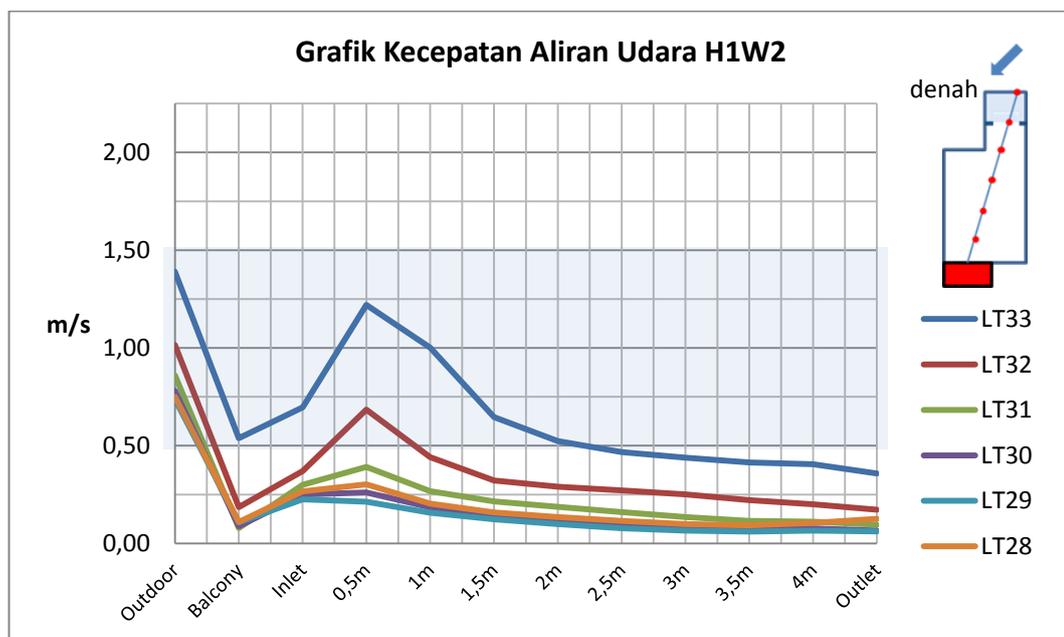
	Inlet	ΔV	2,5m	ΔV	Outlet	ΔV
LT33	0,82	-	0,21	-	1,53	-
LT32	1,02	24%	0,36	75%	1,25	-18%
LT31	0,87	6%	0,34	63%	0,72	-53%
LT30	0,62	-24%	0,24	16%	0,32	-79%
LT29	0,44	-46%	0,19	-10%	0,15	-90%
LT28	0,50	-39%	0,27	30%	0,22	-86%

Model H1B3 yang memiliki variasi pada lubang *inlet* dan lubang internal memiliki kinerja yang hampir serupa dengan model H1B2. Kecepatan aliran udara yang dihasilkan pada model H1B3 tidak memiliki perbedaan yang terlalu signifikan terutama di tengah ruangan. Perbedaan kecepatan yang besar hanya terjadi di titik *inlet* dan *outlet* karena adanya variasi ukuran lubang *inlet* dan *outlet* tersebut. Apabila ditinjau dari segi efek pendinginan fisiologis oleh angin yang dihasilkan, model H1B3 masih belum memiliki kinerja yang cukup baik. Titik-

titik ukur yang memenuhi kriteria efek pendinginan fisiologis oleh angin hanya terjadi di dekat area *inlet* atau *outlet*, sementara di tengah ruangan, tidak ada titik ukur yang dapat digolongkan ke dalam kategori nyaman karena kecepatan aliran udara yang rendah atau di bawah 0,5 m/s. Titik ukur yang tergolong nyaman pada lantai 33 hingga 28 secara berurutan adalah sebesar 20%, 50%, 40%, 20%, 0% dan 20% dari total titik ukur pada tiap lantai tersebut. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa kinerja model H1B3 masih sangat kurang apabila ditinjau dari segi efek pendinginan fisiologis oleh angin yang dihasilkan, namun cukup baik apabila ditinjau dari segi pemerataan kecepatan aliran udara, terutama di tengah ruangan.

4.2.5 Kinerja ventilasi model H1W2 dan H1W3

Model H1W2 dan H1W3 merupakan model yang sama dengan model H1S1 (*base case*) namun mendapat perlakuan atau *treatment* berupa arah kedatangan angin (orientasi terhadap angin) yang berbeda. Model H1W2 memiliki orientasi 45° terhadap arah kedatangan angin sedangkan model H1W3 memiliki orientasi 90° atau angin datang dari samping bangunan.

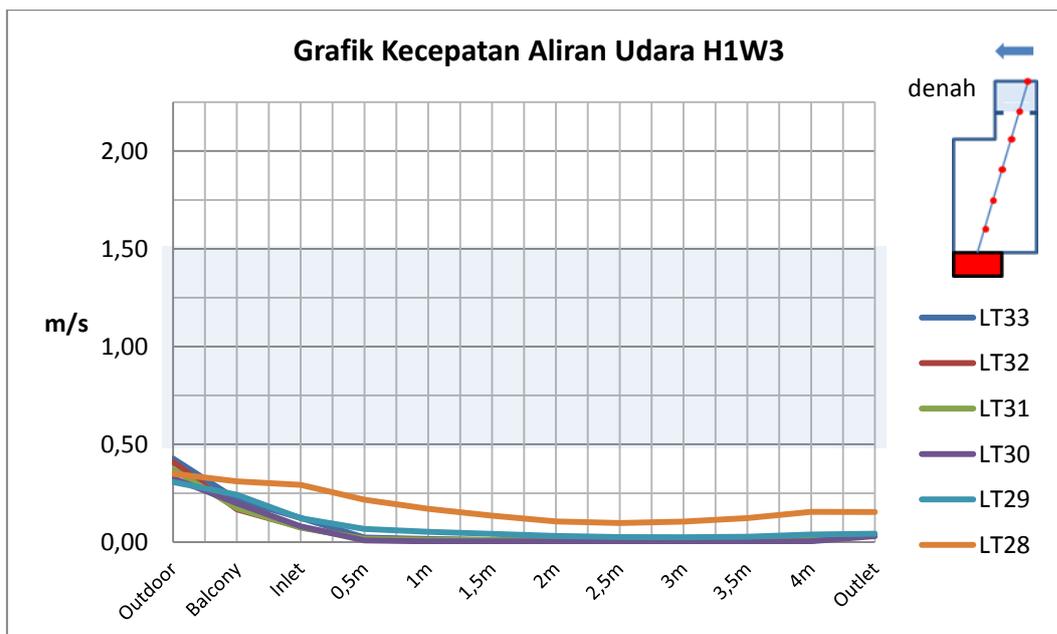


Gambar 4.12 Grafik kecepatan aliran udara model H1W2

Tabel 4.9 Perbandingan kecepatan aliran udara di tiap lantai model H1W2

	Inlet	ΔV	2,5m	ΔV	Outlet	ΔV
LT33	0,70	-	0,47	-	0,36	-
LT32	0,37	-47%	0,27	-42%	0,17	-52%
LT31	0,30	-57%	0,16	-66%	0,10	-73%
LT30	0,25	-64%	0,10	-79%	0,07	-82%
LT29	0,23	-68%	0,08	-83%	0,06	-83%
LT28	0,27	-62%	0,12	-75%	0,13	-65%

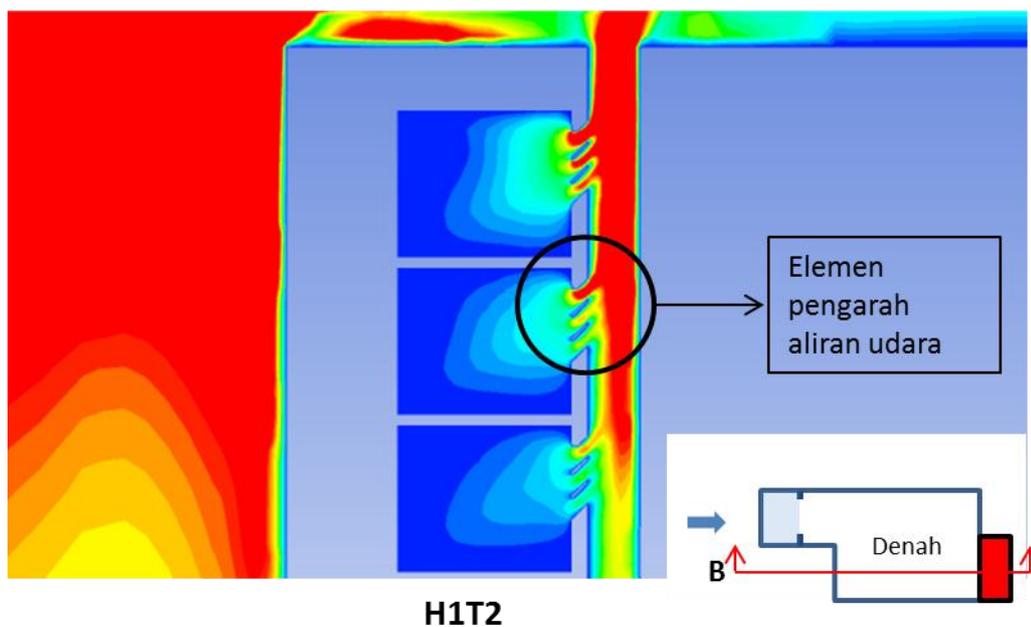
Berdasarkan grafik di atas, dapat diamati bahwa model H1W2 hanya memiliki kinerja yang baik pada 2 lantai teratas, yaitu lantai 33 dan 32. Kecepatan aliran udara pada sebagian titik yang diukur di kedua lantai tersebut dapat memenuhi kriteria efek pendinginan fisiologis oleh angin minimum yaitu sebesar 0,5 m/s. Titik ukur yang memenuhi efek pendinginan fisiologis oleh angin pada lantai 33 dan 32 adalah 50% dan 20% dari total titik pada tiap lantai tersebut. Pada lantai-lantai di bawahnya (lantai 31 hingga 28), kecepatan aliran udara yang dihasilkan sangat rendah, yaitu kurang dari 0,5 m/s sehingga aliran udara tersebut tidak dapat dirasakan keberadaannya.



Gambar 4.13 Grafik kecepatan aliran udara model H1W3

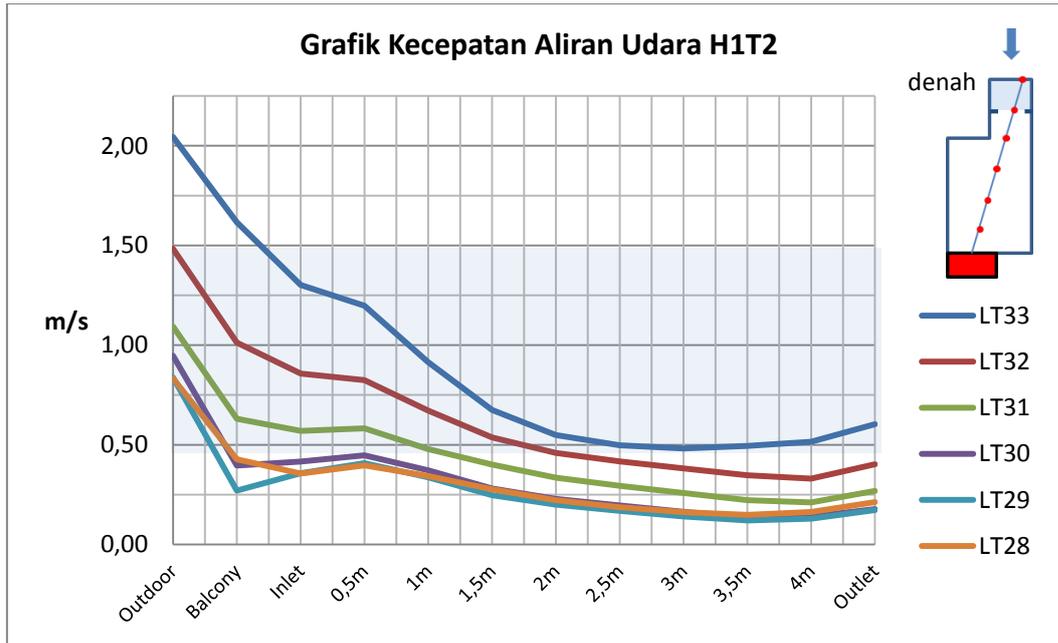
Model H1W3 yang memiliki orientasi 90° terhadap arah angin ternyata tidak dapat menghasilkan aliran udara dengan kecepatan cukup untuk menghasilkan efek pendinginan. Aliran udara yang sangat lemah terjadi di semua lantai model H1W3, terutama di tengah ruangan. Kecepatan aliran udara tertinggi yang dihasilkan di tengah ruangan hanya mencapai $0,1 \text{ m/s}$ yaitu di lantai 28 sedangkan nilai terendahnya adalah mendekati 0 m/s atau hampir tidak terjadi pergerakan aliran udara. Berdasarkan gambar 4.13 di atas, dapat diamati bahwa pada lantai 33 hingga 28 tidak ada satu pun titik ukur yang mendapatkan kecepatan aliran udara yang memenuhi kriteria efek pendinginan fisiologis oleh angin yaitu $0,5 \text{ m/s}$. berdasarkan grafik di atas, kinerja paling baik pada model H1W3 justru ada pada lantai paling bawah, yaitu lantai 28 yang berbanding terbalik dengan model-model lainnya yang cenderung memiliki kinerja lebih baik pada lantai-lantai yang paling atas, meskipun kecepatan yang dihasilkan masih sangat rendah. Secara keseluruhan, kinerja model H1W3 sangatlah buruk karena kecepatan aliran udara yang dihasilkan sangat rendah dan tidak mampu memenuhi kriteria efek pendinginan fisiologis oleh angin.

4.2.6 Kinerja ventilasi model H1T2



Gambar 4.14 *Treatment* pada model H1T2

Model H1T2 merupakan model yang mendapat *treatment* berupa penambahan elemen pengarah aliran udara pada lubang internalnya (gambar 4.x). Elemen pengarah tersebut merupakan lubang internal yang memiliki kemiringan vertikal sebesar 45° serta ditambah dengan sirip pengarah (*grill*) yang juga memiliki kemiringan 45°.



Gambar 4.15 Grafik kecepatan aliran udara model H1T2

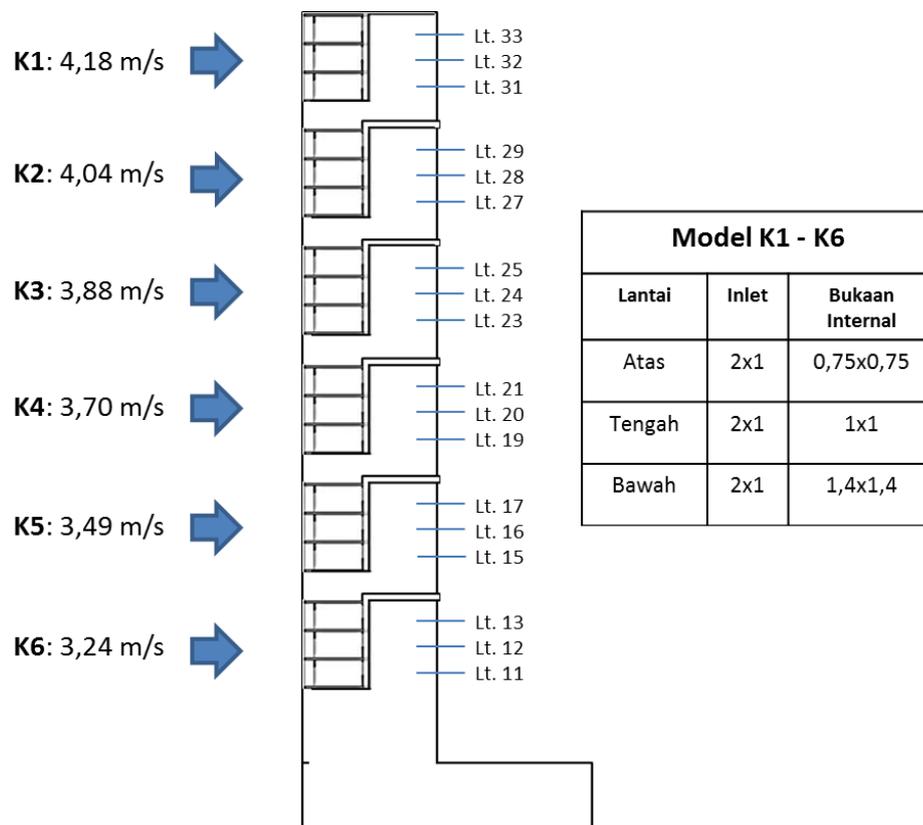
Tabel 4.10 Perbandingan kecepatan aliran udara di tiap lantai model H1T2

	Inlet	ΔV	2,5m	ΔV	Outlet	ΔV
LT33	1,30	-	0,50	-	0,60	-
LT32	0,86	-34%	0,42	-16%	0,40	-33%
LT31	0,57	-56%	0,29	-41%	0,27	-56%
LT30	0,42	-68%	0,20	-61%	0,18	-71%
LT29	0,36	-73%	0,17	-66%	0,17	-71%
LT28	0,36	-73%	0,19	-62%	0,21	-65%

Model H1T2 dengan lubang internal yang dimiringkan dapat menghasilkan kecepatan aliran udara yang memenuhi kriteria efek pendinginan fisiologis oleh angin pada sebagian titik yang diukur di 3 lantai paling atas. Sementara itu, pada 3 lantai paling bawah, kecepatan aliran udara yang terlalu rendah sehingga tidak dapat mencapai nilai minimum untuk menghasilkan efek

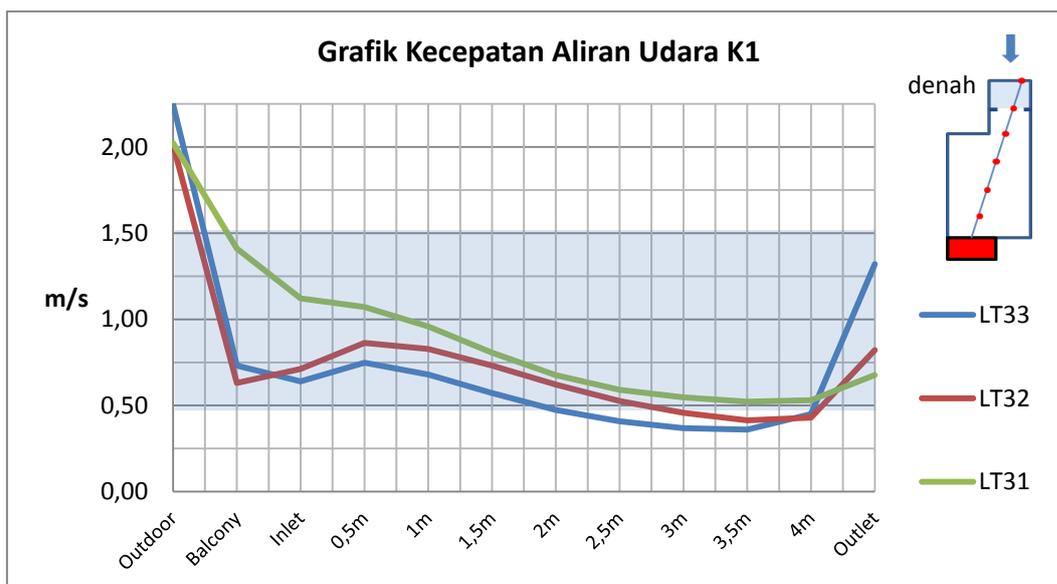
pendinginan fisiologis oleh angin. Titik-titik pengukuran yang memenuhi kriteria efek pendinginan fisiologis oleh angin pada ketiga lantai 33, 32 dan 31 masing-masing adalah sebesar 80%, 40% dan 20% dari total titik pada tiap lantai tersebut. Kecepatan aliran udara yang dihasilkan pada lantai paling atas masih cukup tinggi, namun tidak sampai menyebabkan gangguan sekunder (kertas berterbangan dan lainnya) karena masih di bawah 1,5 m/s. Kecepatan aliran udara rata-rata pada lantai 32 berkurang sebesar 16%-33% dibandingkan dengan kecepatan aliran udara di lantai paling atas (lantai 33), kemudian kembali menurun di lantai 31 hingga antara 41% hingga 56% lebih rendah dibandingkan dengan lantai 33. Tiga lantai paling bawah (lantai 30 hingga 28) menghasilkan kecepatan aliran udara yang relatif sama, dengan nilai rata-rata yang lebih rendah antara 61% hingga 73% dibandingkan dengan lantai paling atas.

4.2.7 Kinerja ventilasi model K1-K6



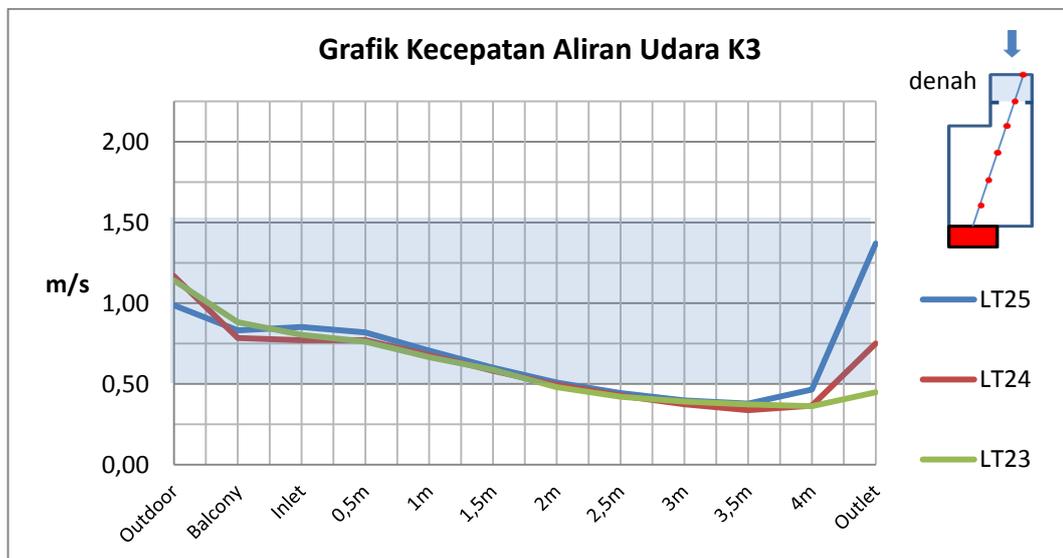
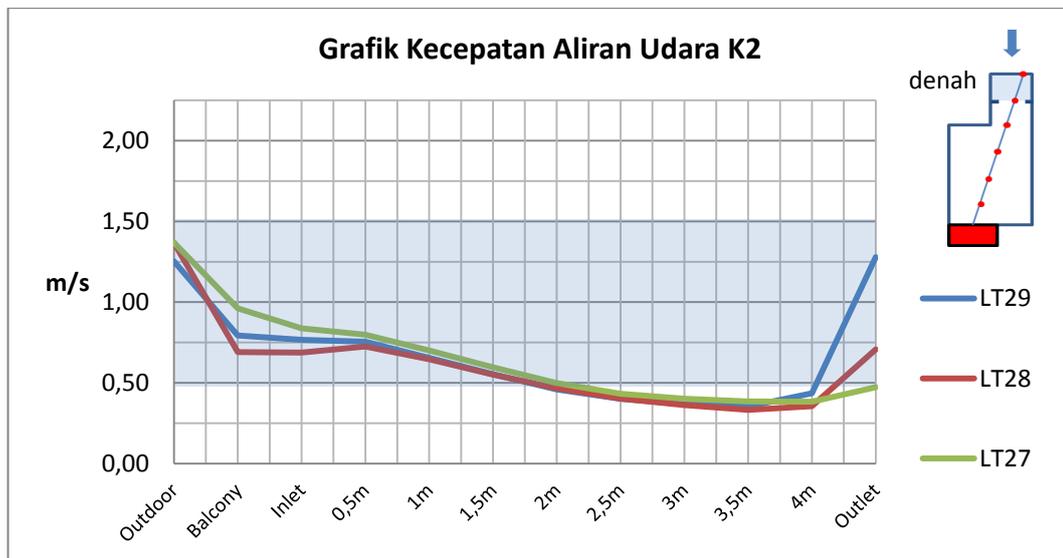
Gambar 4.16 Detail model K1-K6

Model K1 sampai dengan K6 merupakan model untuk sistem *ventilation shaft* pada bangunan apartemen. Model K1-K6 ini adalah hasil kombinasi yang dihasilkan dari hipotesis atau dugaan sementara bahwa model-model yang diuji sebelumnya tidak dapat menghasilkan kinerja yang efektif dan merata. Pada model K1-K6 ini, setiap *shaft* hanya terhubung pada 3 unit apartemen. Hal ini ditujukan untuk mengurangi besarnya *area ratio* apabila dibandingkan dengan model *base case* yang *shaft* nya terhubung dengan 6 unit apartemen, sehingga distribusi aliran udara pada tiap unit apartemen dapat lebih merata. *Outlet* dari *shaft* juga tidak selalu berada di bagian atap bangunan, melainkan juga terdapat pada sisi *leeward* atau sisi yang membelakangi arah angin. Hal ini ditujukan agar *shaft* tidak menjadi terlalu panjang sehingga dampak dari *friction loss* dapat dikurangi. Lubang *inlet* pada model K1-K6 tersebut dibuat seragam, namun memiliki variasi pada lubang internalnya seperti halnya pada varian B2. Lubang internal tersebut divariasikan semakin besar pada lantai yang lebih rendah (dalam satu model). Pada model K1 misalnya, lantai 33 yang merupakan lantai paling atas pada model tersebut mendapatkan lubang internal sebesar 0,75m x 0,75m, sementara lantai 32 memiliki lubang internal berukuran 1m x 1m serta lantai 31 memiliki lubang internal paling besar yaitu berukuran 1,4m x 1,4m (gambar 4.x)

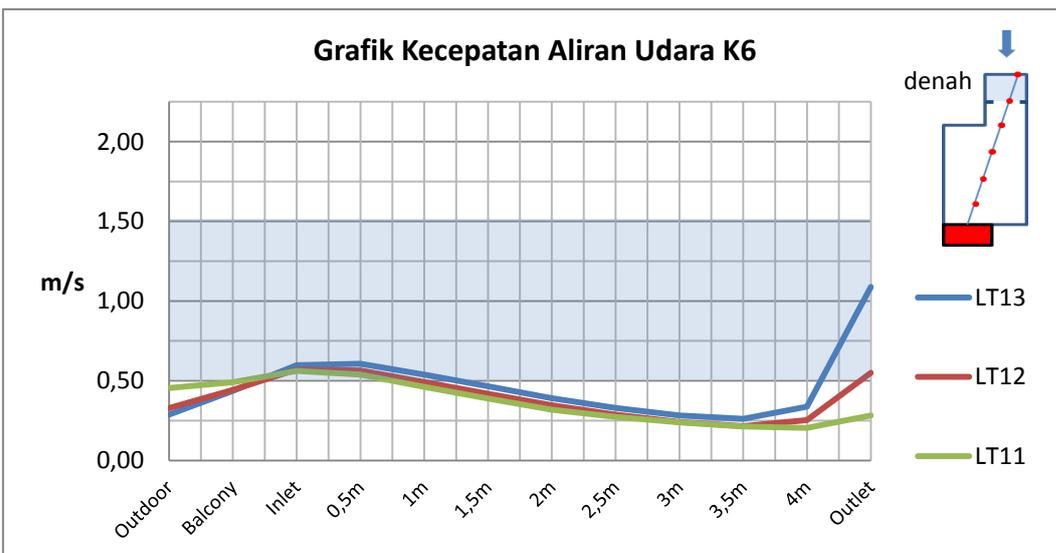
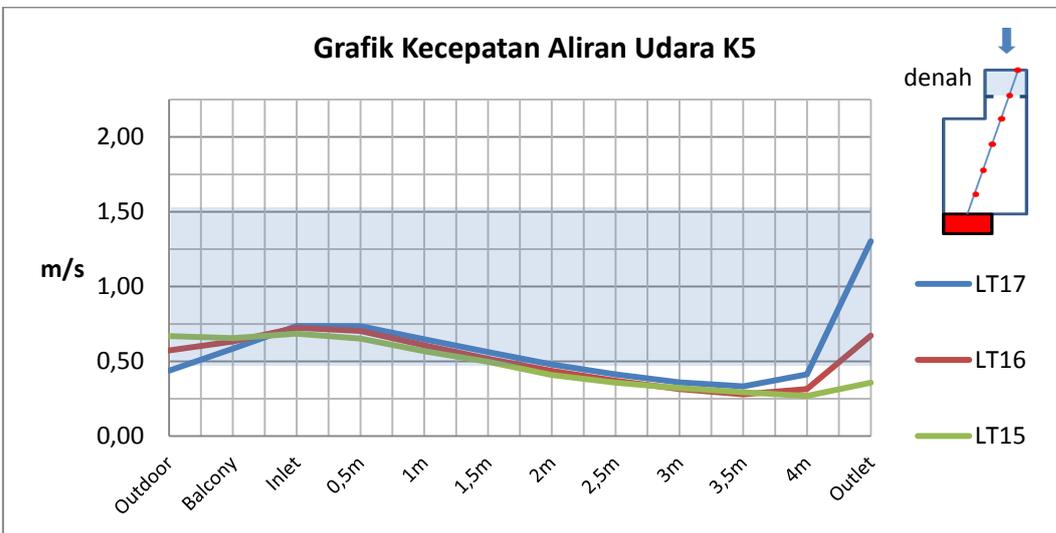
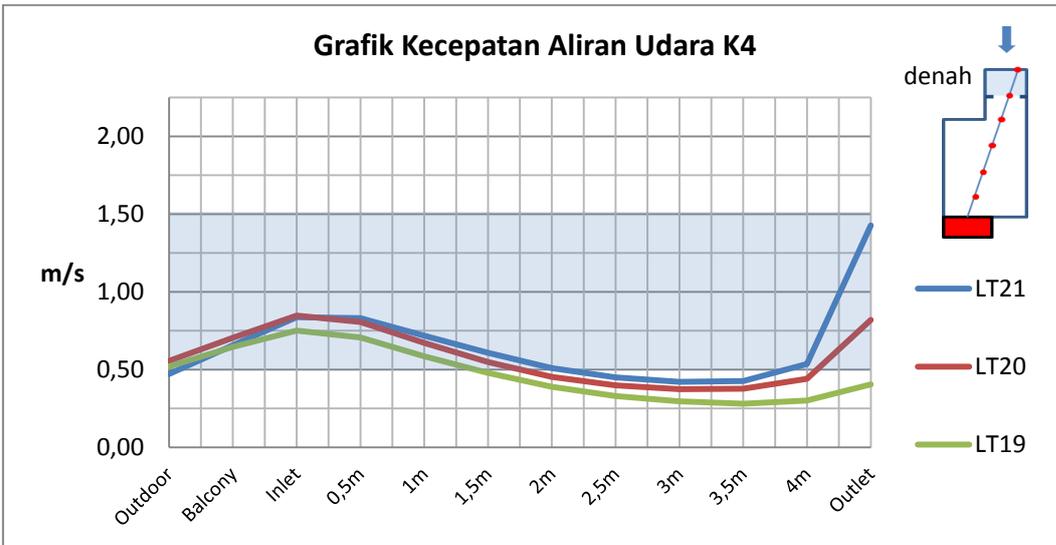


Gambar 4.17 Grafik kecepatan aliran udara model K1

Berdasarkan grafik di atas, dapat diamati bahwa model K1 memiliki kinerja yang cukup baik dalam menciptakan efek pendinginan karena seluruh lantainya memiliki kecepatan aliran udara di atas nilai minimum yang dapat dianggap nyaman yaitu sebesar 0,5 m/s. Titik pengukuran yang tergolong ke dalam kategori nyaman pada model ini mencapai 50% di lantai 33, serta 100% pada lantai 32 dan 31. Kecepatan aliran udara yang terjadi di ketiga lantai juga tidak terpaut jauh, yaitu hanya sekitar 0,2 m/s antara lantai dengan kecepatan aliran udara tertinggi (lantai 31) dengan yang terendah (lantai 33). Hal tersebut menunjukkan bahwa model K1 memiliki kinerja yang cukup baik dari segi efek pendinginan fisiologis oleh angin dan pemerataan kecepatan aliran udara.



Gambar 4.18 Grafik kecepatan aliran udara model K2 dan K3



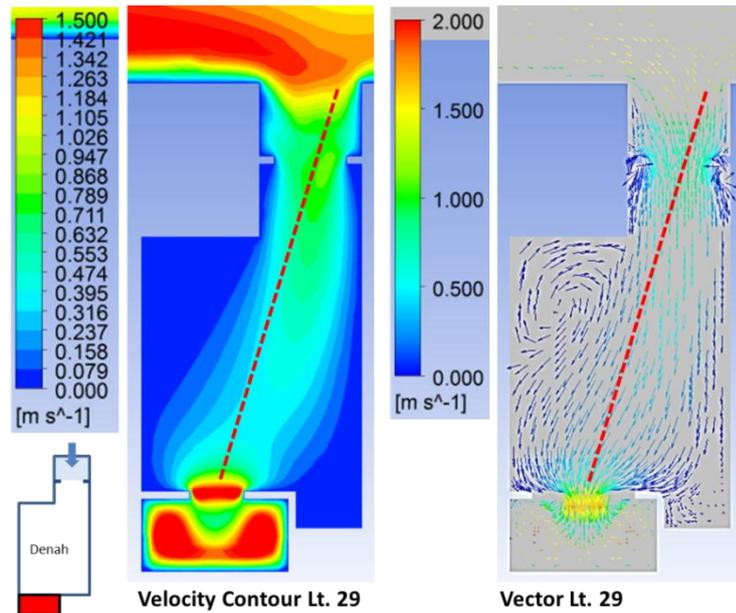
Gambar 4.19 Grafik kecepatan aliran udara pada model K4, K5 dan K6

Berdasarkan grafik-grafik di atas, (gambar 4.18 dan 4.19) dapat diamati bahwa seluruh model dari K1 hingga K6 memiliki pola aliran udara yang relatif sama yaitu memiliki kecepatan aliran udara yang cukup tinggi di area *inlet*, kemudian berangsur-angsur mengalami penurunan hingga kecepatan aliran udara paling rendah terjadi di titik 3,5 m atau 4 m, yaitu sekitar 0,4 m/s lebih rendah dari kecepatan di titik *inlet*. Kecepatan aliran udara kemudian mengalami peningkatan kembali di dekat area *outlet* ruangan (lubang internal yang menghubungkan ke *shaft*), terutama pada lantai paling atas dan lantai tengah pada tiap model yang memiliki ukuran lubang internal lebih kecil dibandingkan dengan lantai yang paling bawah.

Berdasarkan gambar 4.18 (grafik kecepatan aliran udara model K2 dan K3), model K2 dan K3 memiliki kinerja yang sangat mirip walaupun kecepatan *input* untuk simulasinya sedikit berbeda, yaitu 4,04 m/s untuk model K2 dan 3,88 m/s untuk model K3. Meski demikian kinerja yang dihasilkan kedua model tersebut relatif sama dari segi efek pendinginan fisiologis oleh angin maupun pemerataan kecepatan aliran udara. Pada model K2, titik ukur yang tergolong nyaman pada lantai 29, 28 dan 27 adalah sama yaitu sebesar 50% dari total titik pada tiap lantai. Sementara itu, pada model K3, titik ukur yang tergolong nyaman pada lantai 25, 24 dan 23 masing-masing adalah sebesar 60%, 60% dan 40% dari total titik pada tiap lantai tersebut. Hal tersebut menunjukkan bahwa dari segi efek pendinginan fisiologis oleh angin yang dihasilkan, kedua model tersebut tidak memiliki perbedaan yang signifikan. Garis-garis yang merepresentasikan kecepatan aliran udara pada tiap lantai yang ditunjukkan pada gambar 4.18 saling berhimpitan satu sama lain (pada kedua grafik K2 dan K3), yang berarti tidak ada perbedaan kecepatan aliran udara yang signifikan antara tiap lantai pada masing-masing model.

Gambar 4.19 yang mewakili grafik kecepatan aliran udara untuk lantai juga menunjukkan pola yang serupa namun dengan nilai kecepatan aliran udara yang semakin menurun, terutama pada model K6. Hal tersebut dapat dipahami karena kecepatan *input* untuk simulasi pada model K4 hingga K6 juga semakin menurun. Untuk model K4, titik ukur yang tergolong nyaman pada lantai 21, 20 dan 19 masing-masing adalah sebesar 70%, 50% dan 30% dari total titik pada tiap

lantai tersebut. Pada model K5, lantai 17, 16 dan 15 masing-masing menghasilkan efek pendinginan fisiologis oleh angin pada 50%, 50% dan 40% dari total area yang diukur. Sementara itu, model K6 memiliki nilai efek pendinginan fisiologis oleh angin yang paling rendah yaitu sebesar 40%, 30% dan 20% masing-masing untuk lantai 13, 12 dan 11.



Gambar 4.20 Kontur dan vektor kecepatan aliran udara lantai 29 (model K2)

Berdasarkan gambar di atas (gambar 4.20), terdapat area-area di dalam ruangan yang tidak mendapatkan kecepatan aliran udara yang mencukupi, terutama di sudut-sudut ruangan, namun tidak terlihat pada data yang ditunjukkan oleh grafik-grafik di atas karena titik-titik yang diukur hanya berada pada garis putus-putus berwarna merah yang juga disesuaikan dengan jalur aliran udara, sementara area di sudut-sudut ruangan tidak termasuk area yang diukur. Hal tersebut dapat dimaklumi karena aliran udara selalu bergerak dari lubang *inlet* menuju ke lubang *outlet* yang membentuk aliran utama atau *mainstream*. Bentuk ruangan dan posisi lubang *inlet* dan *outlet* yang tidak simetris menyebabkan adanya area-area di sudut ruangan yang tidak memungkinkan untuk dicapai oleh aliran *mainstream*. Dari gambar di atas, dapat diamati juga bahwa aliran *mainstream* bergerak secara tegak lurus dari *inlet* di sepanjang ruangan, kemudian

sedikit berbelok menuju lubang *outlet*, sementara sudut ruangan sebelah kiri atas pada gambar hanya memperoleh aliran *eddy* yang lemah. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa area yang nyaman untuk dihuni adalah area di tengah ruangan, sesuai dengan jalur yang dilewati oleh aliran udara.

4.3 Perbandingan kinerja ventilasi model-model eksperimen

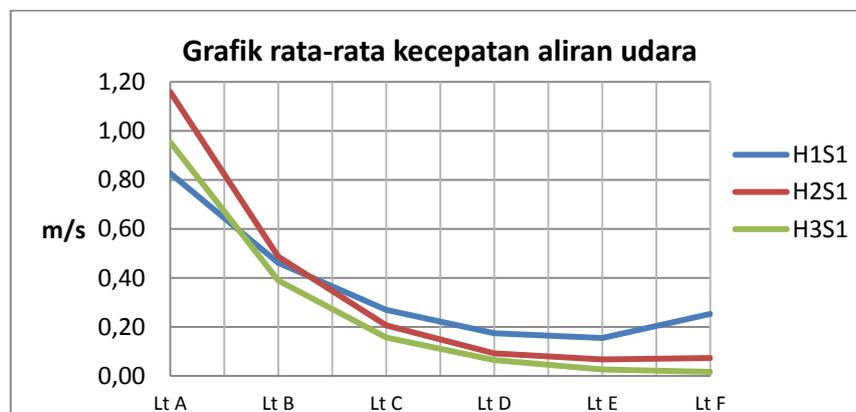
Setiap model eksperimen pada penelitian ini perlu dibandingkan kinerjanya untuk mengetahui seberapa besar penurunan dan kenaikan kinerja masing-masing model terhadap model *base case* atau H1S1.

4.3.1 Perbandingan kinerja ventilasi model H2S1 dan H3S1 dengan model H1S1

Tabel 4.11 Perbandingan kecepatan aliran udara model H1S1, H2S1 dan H3S1

	H1S1			H2S1					
	Inlet	2,5 m	Outlet	Inlet	Δ %	2,5 m	Δ %	Outlet	Δ %
LT A	1,72	0,57	0,49	1,57	-8,8%	0,99	73,4%	0,76	55,3%
LT B	0,86	0,37	0,24	0,80	-6,8%	0,43	14,4%	0,27	14,6%
LT C	0,50	0,21	0,13	0,40	-20,6%	0,16	-24,2%	0,11	-12,5%
LT D	0,35	0,13	0,09	0,21	-39,7%	0,06	-49,3%	0,06	-35,4%
LT E	0,31	0,11	0,08	0,16	-47,0%	0,05	-58,3%	0,04	-45,9%
LT F	0,38	0,19	0,21	0,13	-64,8%	0,05	-76,0%	0,05	-74,5%

H3S1					
Inlet	Δ %	2,5 m	Δ %	Outlet	Δ %
1,21	-29,6%	0,86	51,7%	0,55	12,9%
0,62	-27,2%	0,34	-9,4%	0,24	-1,1%
0,31	-38,8%	0,12	-44,1%	0,11	-17,0%
0,15	-57,1%	0,05	-64,4%	0,06	-39,1%
0,08	-72,5%	0,02	-84,8%	0,03	-69,0%
0,06	-84,5%	0,01	-94,7%	0,01	-94,6%



Gambar 4.21 Grafik perbandingan kecepatan aliran udara rata-rata pada model H1S1, H2S1 dan H3S1

Tabel 4.12 Lantai A-F sebagai perwakilan untuk tiap lantai pada model H1S1, H2S1 dan H3S1

	H1S1	H2S1	H3S1
Lt. A	Lt. 33	Lt. 27	Lt. 21
Lt. B	Lt. 32	Lt. 26	Lt. 20
Lt. C	Lt. 31	Lt. 25	Lt. 19
Lt. D	Lt. 30	Lt. 24	Lt. 18
Lt. E	Lt. 29	Lt. 23	Lt. 17
Lt. F	Lt. 28	Lt. 22	Lt. 16

Berdasarkan tabel dan grafik di atas, dapat diamati bahwa kecepatan aliran udara yang terjadi pada model H2S1 dan H3S1 tidak jauh berbeda dengan model *base case* atau H1S1. Pada model H2S1, kecepatan aliran udara di lantai teratas (lantai 27) justru mengalami peningkatan dibandingkan dengan lantai teratas pada model *base case* (lantai 33) seperti terlihat pada grafik atau gambar 4.21 di atas. Kecepatan aliran udara pada titik *inlet* di lantai 27 memang lebih rendah daripada di lantai 33, yaitu lebih rendah sekitar 8%, namun mengalami peningkatan di titik 2,5 m serta di titik *outlet* ruangan (lubang menuju ke *shaft*), yang masing-masing mengalami peningkatan sebesar 73% dan 55% dibandingkan kecepatan aliran udara di lantai 33. Peningkatan serupa juga terjadi di lantai 26 model H1S2, namun dengan persentase peningkatan yang lebih rendah dibandingkan dengan lantai 32 model H1S1. Meski demikian kecepatan aliran udara yang terjadi pada 4 lantai terbawah pada model H1S2 mengalami penurunan yang cukup drastis yang juga lebih rendah apabila dibandingkan dengan model H1S1.

Pola yang serupa juga terjadi pada model H3S1. Kecepatan aliran udara rata-rata pada lantai teratas model tersebut (lantai 21) ternyata juga lebih tinggi daripada model H1S1 (gambar 4.13). Pada titik *inlet*, kecepatan aliran udara memang lebih rendah sekitar 29,6% dibandingkan dengan di lantai 33 (model H1S1) namun mengalami peningkatan di tengah ruangan serta di titik *outlet* yaitu masing-masing sebesar 51,7% serta 12,9%. Meski demikian, kecepatan aliran udara pada 5 lantai di bawahnya (lantai 20 hingga lantai 16) ternyata lebih rendah daripada model H1S1.

Tabel 4.13 Perbandingan jumlah titik yang memenuhi kriteria efek pendinginan fisiologis oleh angin pada model H1S1, H2S1 dan H3S1

	H1S1	H2S1	$\Delta\%$	H3S1	$\Delta\%$
LT A	8	7	-13%	10	25%
LT B	4	4	0%	3	-25%
LT C	2	0	-100%	0	-100%
LT D	0	0	-	0	-
LT E	0	0	-	0	-
LT F	0	0	-	0	-
Total	14	11	-21%	13	-7%

Apabila ditinjau dari segi efek pendinginan fisiologis oleh angin yang dihasilkan, dapat diamati bahwa model H2S1 memiliki jumlah titik yang mampu menghasilkan efek pendinginan fisiologis oleh angin paling sedikit dibandingkan model H1S1 serta H3S1. Hal tersebut disebabkan oleh adanya kecepatan aliran udara yang terlalu tinggi (melampaui 1,5 m/s) di area sekitar *inlet* lantai 33 model H2S1, sehingga jumlah titik yang tergolong nyaman pada lantai tersebut berkurang. Sementara itu, model H3S1 memiliki tingkat efek pendinginan fisiologis oleh angin yang sangat baik pada lantai 33 namun pada lantai-lantai di bawahnya menghasilkan tingkat efek pendinginan fisiologis oleh angin yang lebih buruk dibandingkan dengan dua model lainnya (H1S1 dan H2S1). Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa perbedaan ketinggian dapat mempengaruhi kecepatan serta pemerataan aliran udara yang dihasilkan oleh sistem *ventilation shaft*. Semakin jauh jarak model dari *outlet shaft* di area atap (semakin rendah ketinggian model), maka kecepatan aliran udara yang dihasilkan cenderung semakin berkurang serta tingkat pemerataan aliran udara semakin buruk.

4.3.2 Perbandingan kinerja ventilasi model H1S2 dengan model H1S1

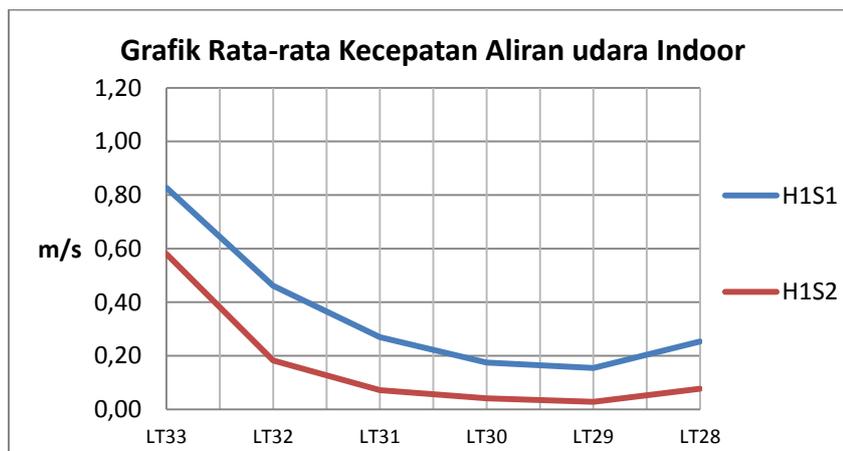
Tabel 4.14 Perbandingan kecepatan aliran udara pada model H1S1 dan H1S2

	H1S1			H1S2					
	Inlet	2,5 m	Outlet	Inlet	$\Delta\%$	2,5 m	$\Delta\%$	Outlet	$\Delta\%$
LT33	1,72	0,57	0,49	1,04	-39,5%	0,47	-17,1%	0,23	-53,5%
LT32	0,86	0,37	0,24	0,36	-57,7%	0,14	-63,7%	0,07	-71,3%
LT31	0,50	0,21	0,13	0,19	-62,0%	0,05	-77,3%	0,04	-72,8%
LT30	0,35	0,13	0,09	0,14	-61,2%	0,03	-79,3%	0,03	-72,3%
LT29	0,31	0,11	0,08	0,12	-61,3%	0,02	-85,0%	0,02	-74,2%
LT28	0,38	0,19	0,21	0,17	-56,0%	0,05	-75,6%	0,05	-78,0%

Tabel 4.15 Perbandingan jumlah titik yang memenuhi kriteria efek pendinginan fisiologis oleh angin pada model H1S1 dan H1S2

	H1S1	H1S2	Δ %
LT33	8	5	-38%
LT32	4	0	-100%
LT31	2	0	-100%
LT30	0	0	-
LT29	0	0	-
LT28	0	0	-
Total	14	5	-64%

Berdasarkan tabel di atas, dapat diidentifikasi bahwa kinerja model H1S2 lebih rendah dibandingkan dengan kinerja model H1S1. Hal tersebut dapat dilihat dari kecepatan aliran udara yang dihasilkan di setiap lantai model H1S2 selalu lebih rendah dibandingkan dengan kecepatan aliran udara pada model H1S1.



Gambar 4.22 Grafik perbandingan kecepatan aliran udara rata-rata pada model H1S1 dan H1S2

Grafik rata-rata kecepatan aliran udara tiap lantai pada kedua model juga menunjukkan hasil yang serupa (gambar 4.22) Pada grafik tersebut, kedua model juga menunjukkan pola distribusi kecepatan aliran udara per lantai yang serupa dengan model H1S1 yaitu aliran udara paling baik terjadi di lantai teratas, kemudian terus mengalami penurunan pada lantai-lantai di bawahnya namun model H1S2 memiliki nilai rata-rata kecepatan aliran udara per lantai yang lebih rendah apabila dibandingkan dengan model H1S1. Tabel 4.14 juga menunjukkan

bahwa model H1S2 memiliki kinerja yang lebih rendah yaitu penurunan jumlah titik yang memenuhi kriteria efek pendinginan fisiologis oleh angin sebesar 64% dibandingkan dengan model H1S1. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa pengurangan luas penampang *shaft* sebesar 50% pada model H1S2 dapat mengurangi kinerja sistem *ventilation shaft* dalam menghasilkan kecepatan aliran udara antara 17,1% hingga 85% (lebih rendah) serta pengurangan jumlah titik yang memenuhi kriteria efek pendinginan fisiologis oleh angin dari segi kecepatan aliran udara sebesar 64% apabila dibandingkan dengan model H1S1.

4.3.3 Perbandingan kinerja ventilasi model H1B2 dan H1B3 dengan model H1S1

Tabel 4.16 Perbandingan kecepatan aliran udara pada model H1S1, H1B2 dan H1B3

	H1S1			H1B2					
	Inlet	2,5 m	Outlet	Inlet	Δ %	2,5 m	Δ %	Outlet	Δ %
LT33	1,72	0,57	0,49	0,45	-74,1%	0,20	-65,6%	1,62	230,3%
LT32	0,86	0,37	0,24	0,70	-18,7%	0,32	-14,7%	1,33	459,4%
LT31	0,50	0,21	0,13	0,70	39,7%	0,32	51,0%	0,76	478,7%
LT30	0,35	0,13	0,09	0,53	51,4%	0,24	86,9%	0,33	259,4%
LT29	0,31	0,11	0,08	0,40	30,1%	0,17	55,4%	0,15	79,4%
LT28	0,38	0,19	0,21	0,47	22,7%	0,23	21,3%	0,21	1,4%

H1B3					
Inlet	Δ %	2,5 m	Δ %	Outlet	Δ %
0,82	-52,2%	0,21	-63,7%	1,53	212,6%
1,02	19,1%	0,36	-2,8%	1,25	427,4%
0,87	74,3%	0,34	57,6%	0,72	450,2%
0,62	78,7%	0,24	88,7%	0,32	254,8%
0,44	44,0%	0,19	70,9%	0,15	86,1%
0,50	31,4%	0,27	39,5%	0,22	6,9%

Berdasarkan tabel di atas dapat diidentifikasi bahwa perlakuan berupa variasi pada bukaan internal menuju ke *shaft* pada model H1B2 mengakibatkan penurunan kecepatan aliran udara di lantai paling atas (lantai 33) apabila dibandingkan dengan model *base case* (H1S1) yaitu sebesar 74,1% dan 65,6% pada titik *inlet* dan di tengah ruangan (titik 2,5 m) sedangkan pada titik *outlet*nya terjadi peningkatan yang cukup signifikan yaitu sebesar 230,3%. Sementara itu, kecepatan aliran udara pada lantai 32 model H1B2 tidak mengalami perbedaan

yang jauh dengan lantai yang sama pada model H1S1 walaupun terdapat sedikit penurunan yaitu dari 0,86 m/s di model H1S1 menjadi 0,7 m/s pada model H1B2 atau sebesar 18,7%. Penurunan kecepatan aliran udara pada lantai tersebut juga terjadi di titik 2,5 m yaitu dari 0,37 m/s di model H1S1 menjadi 0,32 m/s di model H1B2 atau berkurang sekitar 14,7%. Meski demikian penurunan kecepatan aliran udara di lantai paling atas ini juga diimbangi dengan kenaikan kecepatan aliran udara, terutama pada lantai 31 hingga 28. Kecepatan aliran udara di area *inlet* model H1B2 pada lantai 31 hingga 28 mengalami kenaikan sebesar 22% hingga 51% sementara di tengah ruangan terjadi kenaikan kecepatan aliran udara sebesar 21,3% hingga 86,9%. Kecepatan aliran udara yang terjadi di area *outlet* ruangan (lubang internal yang menghubungkan ruangan dengan *shaft*) hampir seluruhnya mengalami kenaikan yaitu paling sedikit 1,4% (lantai 28) hingga paling banyak sebesar 478,7% pada lantai 31.

Tabel 4.17 Perbandingan jumlah titik yang memenuhi kriteria efek pendinginan fisiologis oleh angin pada model H1S1, H1B2 dan H1B3

	H1S1	H1B2	Δ %	H1B3	Δ %
LT33	8	0	-100%	2	-75%
LT32	4	4	0%	5	25%
LT31	2	4	100%	4	100%
LT30	0	2	200%	2	200%
LT29	0	0	-	0	-
LT28	0	0	-	2	200%
Total	14	10	-29%	15	7%

Apabila ditinjau dari segi efek pendinginan fisiologis oleh angin yang dihasilkan oleh masing-masing model, maka dapat diamati bahwa model H1B2 dan H1B3 memiliki kinerja (lihat tabel 4.17 di atas). Pada model H1B2 dan H1B3, mengalami penurunan kinerja dalam menghasilkan efek penyejukan di lantai 33 apabila dibandingkan dengan model H1S1, namun cenderung mengalami peningkatan pada lantai-lantai di bawahnya, yaitu meningkat sekitar 25% hingga 200%. Secara keseluruhan, model H1B2 mengalami penurunan jumlah titik yang tergolong nyaman sebesar 29% sementara model H1B3 mengalami peningkatan sebesar 7%.

Berdasarkan perbandingan-perbandingan di atas, dapat dikatakan bahwa *treatment* berupa ukuran lubang internal yang semakin besar pada lantai yang lebih rendah pada model H1B2 dapat meningkatkan pemerataan kecepatan aliran udara namun justru dapat mengurangi jumlah titik yang memenuhi kriteria efek pendinginan fisiologis oleh angin apabila dibandingkan dengan model H1S1. Sedangkan pada model H1B3 *treatment* serupa namun dilakukan pada lubang *inlet* dan lubang internal dapat menghasilkan pemerataan kecepatan aliran udara serta jumlah titik yang memenuhi kriteria efek pendinginan fisiologis oleh angin yang lebih baik dibanding model H1S1.

4.3.4 Perbandingan kinerja ventilasi model H1W2 dan H1W3 dengan model H1S1

Tabel 4.18 Perbandingan kecepatan aliran udara pada model H1S1, H1W2 dan H1W3

	H1S1			H1W2					
	Inlet	2,5 m	Outlet	Inlet	Δ %	2,5 m	Δ %	Outlet	Δ %
LT33	1,72	0,57	0,49	0,70	-59,6%	0,47	-18,0%	0,36	-26,9%
LT32	0,86	0,37	0,24	0,37	-56,8%	0,27	-27,0%	0,17	-27,3%
LT31	0,50	0,21	0,13	0,30	-39,9%	0,16	-24,8%	0,10	-26,9%
LT30	0,35	0,13	0,09	0,25	-28,5%	0,10	-21,9%	0,07	-28,0%
LT29	0,31	0,11	0,08	0,23	-26,7%	0,08	-28,1%	0,06	-24,7%
LT28	0,38	0,19	0,21	0,27	-29,8%	0,12	-40,2%	0,13	-38,6%

H1W3					
Inlet	Δ %	2,5 m	Δ %	Outlet	Δ %
0,12	-92,8%	0,00	-99,9%	0,04	-92,7%
0,08	-91,1%	0,01	-98,3%	0,04	-84,9%
0,07	-85,1%	0,01	-97,1%	0,04	-69,8%
0,08	-77,0%	0,00	-98,7%	0,03	-66,8%
0,12	-60,5%	0,03	-76,2%	0,04	-47,9%
0,29	-23,0%	0,10	-49,3%	0,15	-25,2%

Perubahan orientasi arah angin pada model H1W2 secara umum menyebabkan penurunan kecepatan aliran udara di dalam ruangan apabila dibandingkan dengan model H1S1. Pada area *inlet*, kecepatan aliran udara pada model H1W2 mengalami penurunan sebesar 28,5% hingga 59,6% apabila dibandingkan dengan model H1S1. Penurunan kecepatan aliran udara di area *inlet* yang paling besar terjadi pada lantai-lantai paling atas, khususnya pada lantai 33 dan 32 yang masing-masing mengalami penurunan sebesar 59,6% dan 56,8%.

Kecepatan aliran udara di tengah ruangan pada model H1W2 juga mengalami penurunan meskipun tidak sebesar di titik *inlet* yaitu paling rendah 18% (lantai 33) paling sebesar 40% (lantai 28). Sementara itu, di area *outlet*, penurunan kecepatan aliran udara yang terjadi cenderung lebih seragam yaitu antara 24% hingga 38%.

Model H1W3 yang memiliki orientasi kedatangan angin dari arah 90° atau dari samping mengalami penurunan kecepatan aliran udara yang sangat jauh dibandingkan dengan model H1S1. Penurunan paling rendah terjadi di lantai paling bawah, yang juga merupakan lantai dengan kecepatan aliran udara paling baik pada model H1W3, yaitu sebesar 23% di area *inlet*, 49% di tengah ruangan serta 25% di area *outlet*. Penurunan kecepatan aliran udara paling besar justru ada di lantai paling atas, terutama di tengah ruangan yang memiliki kecepatan aliran udara mendekati 0 m/s atau berkurang hampir 100% dibanding model H1S1.

Tabel 4.19 Perbandingan jumlah titik yang memenuhi kriteria efek pendinginan fisiologis oleh angin pada model H1S1, H1W2 dan H1W3

	H1S1	H1W2	Δ %	H1W3	Δ %
LT33	8	5	-38%	0	-100%
LT32	4	2	-50%	0	-100%
LT31	2	0	-100%	0	-100%
LT30	0	0	-	0	-
LT29	0	0	-	0	-
LT28	0	0	-	0	-
Total	14	7	-50%	0	-100%

Apabila ditinjau dari jumlah titik yang memenuhi kriteria efek pendinginan fisiologis oleh angin, dapat diamati bahwa kinerja model H1W2 (orientasi angin 45°) mengalami penurunan dibandingkan dengan model H1S1. Model H1W3 dengan orientasi arah angin sebesar 90° (angin datang dari samping) memiliki kinerja paling buruk, yaitu tidak ada satupun titik ukur yang memenuhi kriteria efek pendinginan fisiologis oleh angin. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa sistem *ventilation shaft* dengan orientasi 0° dapat menghasilkan kinerja yang paling baik dari segi kecepatan aliran udara serta

tingkat efek pendinginan fisiologis oleh angin yang dihasilkan sementara orientasi 90° menghasilkan kinerja paling buruk.

4.3.5 Perbandingan kinerja ventilasi model H1T2 dengan model H1S1

Tabel 4.20 Perbandingan kecepatan aliran udara pada model H1S1 dan H1T2

	H1S1			H1T2					
	Inlet	2,5 m	Outlet	Inlet	Δ %	2,5 m	Δ %	Outlet	Δ %
LT33	1,72	0,57	0,49	1,30	-24,4%	0,50	-12,6%	0,60	23,4%
LT32	0,86	0,37	0,24	0,86	0,0%	0,42	12,0%	0,40	69,2%
LT31	0,50	0,21	0,13	0,57	14,4%	0,29	37,8%	0,27	104,4%
LT30	0,35	0,13	0,09	0,42	19,0%	0,20	53,7%	0,18	95,0%
LT29	0,31	0,11	0,08	0,36	16,2%	0,17	55,4%	0,17	112,4%
LT28	0,38	0,19	0,21	0,36	-6,2%	0,19	-3,0%	0,21	3,7%

Berdasarkan tabel di atas, dapat diamati bahwa penggunaan lubang *inlet* dengan kemiringan 45° secara vertikal dan tambahan *grill* pengarah aliran udara dapat memberikan efek yang cukup positif terhadap kecepatan aliran udara yang dihasilkan, apabila dibandingkan dengan model H1S1 yaang menggunakan lubang *outlet* tanpa elemen pengarah. Kecepatan aliran udara pada lantai paling atas model H1T2 memang lebih rendah sekitar 24% dan 12% di area *inlet* dan di tengah ruangan (titik 2,5 m), namun terus mengalami peningkatan pada lantai-lantai di bawahnya pada kedua titik pengukuran tersebut. Adanya elemen pengarah di area lubang internal juga mengakibatkan peningkatan kecepatan aliran udara di titik *outlet* ruangan (di dekat lubang internal) pada sebagian besar lantai model H1T2 apabila dibandingkan dengan model H1S1.

Tabel 4.21 Perbandingan jumlah titik yang memenuhi kriteria efek pendinginan fisiologis oleh angin pada model H1S1 dan H1T2

	H1S1	H1T2	Δ %
LT33	8	8	0%
LT32	4	4	0%
LT31	2	2	0%
LT30	0	0	-
LT29	0	0	-
LT28	0	0	-
Total	14	14	0%

Meski demikian, adanya peningkatan kecepatan udara pada model H1T2 dibandingkan model H1S1 seperti yang telah dijelaskan pada tabel sebelumnya (tabel 4.20) tidak diikuti oleh adanya peningkatan efek pendinginan fisiologis oleh angin pada model H1T2. Berdasarkan tabel 4.21 di atas, tampak bahwa jumlah titik ukur yang memenuhi kriteria efek pendinginan fisiologis oleh angin pada tiap lantai model H1T2 masih sama seperti yang dihasilkan oleh model H1S1. Hal tersebut menunjukkan bahwa efek peningkatan kecepatan dan pemerataan aliran udara yang disebabkan oleh penggunaan lubang internal dengan kemiringan 45° secara vertikal dan tambahan *grill* pengarah aliran udara masih belum mampu meningkatkan jumlah titik yang tergolong nyaman berdasarkan efek pendinginan fisiologis oleh angin yang dihasilkan.

4.3.6 Perbandingan kinerja ventilasi model K1-K6 dengan model H1S1

Tabel 4.22 Perbandingan persentase kecepatan aliran udara di dalam ruangan dengan kecepatan *input* simulasi pada model H1S1 dan K1-K6

Vo (m/s):	3,92			4,18			4,04				
H1S1	Rata2	Vo %	K1	Rata2	Vo %	Δ %	K1	Rata2	Vo %	Δ %	
LT33	0,83	21%	LT33	0,51	12%	-42%	LT29	0,50	12%	-42%	
LT32	0,46	12%	LT32	0,61	15%	24%	LT28	0,48	12%	1%	
LT31	0,27	7%	LT31	0,71	17%	148%	LT27	0,52	13%	89%	
LT30	0,17	4%									
LT29	0,15	4%									
LT28	0,25	6%									
Vo (m/s):	3,92			3,88			3,7				
H1S1	Rata2	Vo %	K3	Rata2	Vo %	Δ %	K4	Rata2	Vo %	Δ %	
LT33	0,83	21%	LT25	0,54	14%	-34%	LT21	0,56	15%	-28%	
LT32	0,46	12%	LT24	0,50	13%	10%	LT20	0,51	14%	17%	
LT31	0,27	7%	LT23	0,51	13%	90%	LT19	0,42	11%	66%	
LT30	0,17	4%									
LT29	0,15	4%									
LT28	0,00	6%									

Vo (m/s):	3,92			3,49				3,24		
H1S1	Rata2	Vo %	K5	Rata2	Vo %	Δ %	K6	Rata2	Vo %	Δ %
LT33	0,83	21%	LT17	0,49	14%	-33%	LT13	0,40	12%	-41%
LT32	0,46	12%	LT16	0,44	13%	8%	LT12	0,35	11%	-8%
LT31	0,27	7%	LT15	0,42	12%	75%	LT11	0,33	10%	48%
LT30	0,17	4%								
LT29	0,15	4%								
LT28	0,00	6%								

Keterangan:

Vo : *Input* kecepatan angin untuk simulasi (m/s)

Vo% : Persentase kecepatan aliran udara *indoor* dibandingkan dengan kecepatan *input* (%)

Rata2 : Kecepatan aliran udara rata-rata *indoor* (m/s)

Δ % : Persentase kenaikan atau penurunan dari model H1S1

Masing-masing model pada model K1-K6 ini disimulasikan dengan menggunakan *input* kecepatan angin luar yang disesuaikan dengan ketinggian masing-masing. Model K1 memiliki *input* kecepatan angin luar yang paling tinggi yaitu mencapai 4,18 m/s sedangkan model K6 memiliki *input* kecepatan angin luar paling rendah yaitu sebesar 3,24 m/s. Kecepatan *input* masing-masing model K1-K6 tersebut berbeda antara satu sama lain dan berbeda pula dengan *input* kecepatan angin pada model *base case* atau H1S1. Oleh karena itu, kinerja dari masing-masing model perlu dibandingkan berdasarkan persentase kecepatan aliran udara *indoor* terhadap kecepatan angin luar (kecepatan angin yang menjadi *input* untuk simulasi).

Model *base case* atau H1S1 memiliki persentase kecepatan aliran udara *indoor* terhadap kecepatan angin luar yang bervariasi antara 21% (lantai paling atas atau lantai 33) hingga 4% (pada lantai 30 dan 29). Berdasarkan tabel di atas, dapat diamati bahwa umumnya lantai paling atas pada model K1-K6 memiliki persentase kecepatan aliran udara *indoor* terhadap kecepatan angin luar yang lebih rendah dibandingkan dengan lantai teratas pada model H1S1. Nilai Vo% di lantai paling atas pada masing-masing model K1-K6 berkisar antara 12% hingga 15% atau mengalami penurunan sebesar 42% hingga 28% dibandingkan dengan model H1S1. Lantai tengah pada model K1-K6 umumnya memiliki nilai Vo% yang hampir sama dengan lantai kedua paling atas (lantai 32) pada model H1S1, yaitu

berkisar antara 11% (model K6) hingga 15% (model K1). Lantai tengah pada model K6 (lantai 12) merupakan satu-satunya lantai tengah pada model K1-K6 yang nilai $V_o\%$ nya lebih rendah dari model H1S1 yaitu menurun sebanyak 8%, sedangkan nilai $V_o\%$ pada model K1-K6 lainnya mengalami kenaikan antara 1% hingga 24%. Lantai paling bawah pada tiap model K1-K6 semuanya memiliki nilai kecepatan rata-rata yang lebih tinggi dari model H1S1, yaitu mengalami peningkatan antara 48% hingga 148%. Hal tersebut menunjukkan bahwa kecepatan aliran udara rata-rata pada model H1S1 mengalami penurunan yang cukup besar bahkan apabila dilihat dari 3 lantai yang paling atas saja sementara model K1-K6 memiliki nilai kecepatan aliran udara rata-rata yang cenderung seragam di tiap lantainya.

4.4 Pengaruh ketinggian dan elemen desain terhadap distribusi aliran udara yang dihasilkan

Pengaruh dari ketinggian atau letak model secara vertikal pada bangunan serta pengaruh elemen desain, yaitu ukuran *shaft*, konfigurasi bukaan *inlet* dan internal, orientasi, serta elemen pengarah pada lubang internal, dapat dilihat melalui pemerataan debit aliran udara yang dihasilkan tiap lantai, serta dibandingkan dengan model *base case* atau H1S1. Tingkat pemerataan aliran udara tersebut juga dapat diukur melalui indikator yang disebut *flow unbalance* (U_c) yang merupakan rasio dari debit maksimum yang dibagi dengan debit minimum dari aliran udara yang dihasilkan oleh tiap lantai pada suatu sistem *ventilation shaft*.

4.4.1 Distribusi aliran udara pada model H1S1

Volume *flow rate* atau debit (Q) dapat dihitung berdasarkan rumus yang disebutkan oleh Szokolay (2004):

$$Q = AV \quad (4-1)$$

Dengan pengertian:

Q : Debit aliran udara (m^3/s)

A : Luas bukaan (m^2)

V : Kecepatan aliran udara pada area bukaan (m/s)

Kecepatan aliran udara yang menjadi acuan untuk perhitungan debit di atas adalah kecepatan aliran udara di area lubang internal yang menghubungkan tiap ruangan dengan *ventilation shaft*. Debit aliran udara yang dihasilkan oleh tiap lantai pada sistem *ventilation shaft* ini juga dapat dianggap seperti *lateral discharge* (debit keluaran dari pipa *lateral*) pada suatu *combining manifold*. Berdasarkan hukum konservasi massa pada mekanika fluida (Cengel, 2006), pada kondisi *steady state*, massa fluida yang memasuki suatu sistem adalah sama dengan massa fluida yang keluar dari sistem. Apabila aliran udara di dalam sistem *ventilation shaft* dianggap memiliki sifat tidak termampatkan atau *incompressible*, maka volume udara yang masuk ke dalam sistem (debit udara yang masuk) adalah sama dengan volume udara yang keluar dari sistem (debit udara yang keluar). Dengan demikian, besarnya debit aliran udara yang melewati *ventilation shaft* adalah sama dengan total dari debit aliran udara yang dihasilkan oleh masing-masing ruangan yang terhubung dengan *ventilation shaft*.

Tabel 4.23 Debit aliran udara pada model H1S1

	V	A	Q	%
LT33	1,36	2	2,72	40%
LT32	0,73	2	1,47	22%
LT31	0,43	2	0,86	13%
LT30	0,30	2	0,59	9%
LT29	0,24	2	0,47	7%
LT28	0,31	2	0,62	9%
		SUM	6,74	100%

% : persentase debit yang dihasilkan oleh lantai tersebut dibandingkan dengan total debit dalam satu sistem *ventilation shaft*

Hasil perhitungan debit aliran udara dari masing-masing lantai dapat dilihat pada tabel 4.23 di atas. Berdasarkan tabel tersebut, dapat diidentifikasi bahwa lantai teratas yang dekat dengan *outlet* memiliki debit aliran udara yang paling tinggi sedangkan debit aliran udara pada lantai-lantai di bawahnya semakin berkurang. Debit aliran udara yang dihasilkan oleh lantai teratas (lantai 33) adalah

sebesar 2,72 m³/s atau mencakup 40% dari total debit yang melewati *ventilation shaft* sementara debit paling kecil yang dihasilkan oleh lantai 29 hanya sebesar 0,47 m³/s atau mencakup 9% dari total debit sistem secara keseluruhan. Perbedaan yang cukup besar tersebut menunjukkan bahwa distribusi aliran udara yang dihasilkan model *base case* atau H1S1 adalah tidak merata.

Bajura & Jones (1971) juga menyebutkan bahwa tidak meratanya distribusi aliran fluida pada suatu *manifolds* dapat diukur berdasarkan nilai debit terkecil dibagi dengan debit paling besar yang dihasilkan oleh saluran cabang (*lateral*). Nilai ideal (distribusi aliran udara merata dengan sempurna) yang disebutkan adalah 1, yang berarti tidak ada perbedaan debit antara masing-masing saluran cabang, sedangkan nilai yang semakin besar menunjukkan adanya ketidakmerataan aliran (*flow unbalance*) yang semakin besar pula. Nilai *flow unbalance* (U_c) pada model H1S1 adalah sebesar 5,75 yang berarti masih jauh dari nilai ideal.

4.4.2 Distribusi aliran udara pada model H2S1 dan H3S1

Tabel 4.24 Perbandingan debit aliran udara pada model H1S1, H2S1 dan H3S1

LANTAI	H1S1			H2S1				H3S1			
	V	A	Q	V	A	Q	Δ %	V	A	Q	Δ %
LT A	1,36	2,00	2,72	1,42	2,00	2,83	4%	1,13	2,00	2,26	-17%
LT B	0,73	2,00	1,47	0,63	2,00	1,25	-15%	0,50	2,00	0,99	-32%
LT C	0,43	2,00	0,86	0,29	2,00	0,57	-33%	0,22	2,00	0,44	-49%
LT D	0,30	2,00	0,59	0,14	2,00	0,29	-52%	0,09	2,00	0,18	-69%
LT E	0,24	2,00	0,47	0,09	2,00	0,19	-60%	0,03	2,00	0,06	-87%
LT F	0,31	2,00	0,62	0,08	2,00	0,15	-75%	0,03	2,00	0,06	-90%
SUM	3,37	12,00	6,74	2,64	12,00	5,29	-22%	2,00	12,00	4,00	-41%
Uc			5,75			14,94	160%			37,29	549%

Tabel di atas menunjukkan perbandingan debit yang dihasilkan oleh model H1S1, H2S1 dan H3S1. Berdasarkan tabel di atas, nilai debit (Q) yang dihasilkan oleh tiap lantai pada masing-masing model selalu mengalami penurunan dari lantai paling atas hingga yang paling bawah (pada tiap model). Lantai paling atas pada masing-masing model selalu menghasilkan debit aliran udara yang paling

besar dibandingkan dengan lantai lainnya. Model *base case* atau H1S1 memiliki nilai debit aliran udara paling besar dibandingkan dengan model H2S1 dan H3S1, baik dari segi debit total maupun dari debit per lantai. Hal tersebut menunjukkan bahwa variasi letak ketinggian model di dalam bangunan memiliki pengaruh terhadap total debit aliran udara yang dihasilkan oleh sistem *ventilation shaft*. Model yang terletak pada ketinggian lebih rendah serta memiliki *shaft* yang lebih panjang untuk mencapai lubang *outlet* di atap bangunan akan menghasilkan debit aliran udara yang lebih rendah.

Perhitungan nilai U_c (*flow unbalance*) juga menunjukkan bahwa model H1S1 memiliki nilai U_c terkecil di antara ketiga model yaitu sebesar 5,75 kemudian model H2S1 sebesar 14,94 dan model H3S1 sebesar 37,29. Hal tersebut menunjukkan bahwa tingkat pemerataan distribusi aliran udara juga mengalami penurunan seiring dengan penurunan letak ketinggian model di dalam bangunan.

4.4.3 Distribusi aliran udara pada model H1S2

Tabel 4.25 Perbandingan debit aliran udara pada model H1S1, H1S2

LANTAI	H1S1			H1S2			
	V	A	Q	V	A	Q	Δ %
LT33	1,36	2,00	2,72	0,99	2,00	1,98	-27%
LT32	0,73	2,00	1,47	0,43	2,00	0,85	-42%
LT31	0,43	2,00	0,86	0,25	2,00	0,51	-41%
LT30	0,30	2,00	0,59	0,18	2,00	0,36	-40%
LT29	0,24	2,00	0,47	0,14	2,00	0,27	-42%
LT28	0,31	2,00	0,62	0,10	2,00	0,20	-69%
SUM	3,37	12,00	6,74	2,08	12,00	4,17	-38%
U_c			5,75			7,27	27%

Apabila ditinjau dari sisi debit aliran udara yang disalurkan ke dalam *ventilation shaft*, berdasarkan tabel 4.25, dapat diidentifikasi bahwa model H1S2 memiliki kinerja yang lebih buruk dibanding dengan model H1S1. Debit aliran udara yang dikeluarkan melalui lubang internal yang menghubungkan *shaft* dengan ruangan pada model H1S2 cenderung lebih rendah atau mengalami

penurunan sebesar 27% hingga 69% apabila dibandingkan dengan model H1S1. Nilai *flow unbalance* yang dihasilkan model H1S2 juga 27% lebih besar daripada model H1S1. Hal tersebut menunjukkan bahwa variasi

4.4.4 Distribusi aliran udara pada model H1B2 dan H1B3

Tabel 4.26 Perbandingan debit aliran udara pada model H1S1, H1B2 dan H1B3

LANTAI	H1S1			H1B2				H1B3			
	V	A	Q	V	A	Q	Δ%	V	A	Q	Δ%
LT33	1,36	2,00	2,72	2,90	0,25	0,72	-73%	2,81	0,25	0,70	-74%
LT32	0,73	2,00	1,47	2,13	0,49	1,04	-29%	2,03	0,49	0,99	-32%
LT31	0,43	2,00	0,86	1,25	0,81	1,01	17%	1,20	0,81	0,97	13%
LT30	0,30	2,00	0,59	0,65	1,21	0,79	33%	0,65	1,21	0,78	32%
LT29	0,24	2,00	0,47	0,36	1,69	0,61	28%	0,37	1,69	0,63	33%
LT28	0,31	2,00	0,62	0,33	2,25	0,75	21%	0,35	2,25	0,78	25%
SUM	3,37	12,00	6,74	7,62	6,70	4,93	-27%	7,41	6,70	4,86	-28%
Uc			5,75			1,72	-70%			1,58	-72%

Berdasarkan tabel 4.26 di atas, dapat diamati bahwa model H1B2 dan H1B3 memiliki pola distribusi aliran udara yang sedikit berbeda dengan model H1S1. Pada model H1B2, debit aliran udara tertinggi terjadi pada lantai 32 atau lantai kedua dari atas, yaitu sebesar 1,04 m³/s, dan nilai debit terendah terjadi pada lantai 29 yaitu sebesar 0,61 m³/s. Dengan demikian perbedaan antara debit maksimum dan minimum hanya sebesar 0,43 m³/s dibandingkan dengan model H1S1 yang memiliki perbedaan sebesar 2,25 m³/s. Debit aliran udara pada lantai 33 dan 32 pada model H1B2 memang lebih rendah sekitar 73% dan 29% daripada model H1S1, namun debit aliran udara pada 4 lantai di bawahnya (lantai 31 hingga 28) menunjukkan adanya peningkatan sebesar 17% hingga 33%. Hal tersebut menunjukkan bahwa adanya variasi ukuran lubang internal pada model H1B2 dapat menghasilkan debit aliran udara yang relatif lebih seragam dibandingkan dengan model H1S1 yang memiliki ukuran lubang internal dan *inlet* seragam.

Model H1B3 yang memiliki variasi pada ukuran lubang *inlet* dan internal sekaligus ternyata menghasilkan distribusi aliran udara yang hampir sama dengan model H1B2. Model H1B3 memiliki nilai deit maksimum sebesar 0,99 m³/s dan

nilai debit minimum sebesar 0,63 m³/s yang kurang lebih sama dengan nilai debit maksimum dan minimum model H1B2. Hal tersebut menunjukkan bahwa tambahan variasi pada ukuran lubang *inlet* pada model H1B3 tidak menimbulkan banyak perbedaan dari segi debit aliran udara yang dihasilkan apabila dibandingkan dengan model H1B2.

Perhitungan U_c juga menunjukkan bahwa model H1B2 dan H1B3 memiliki nilai U_c yang lebih rendah dari model H1S1, yaitu masing-masing sebesar 1,72 dan 1,58. Hal tersebut membuktikan bahwa model H1B2 dan model H1B3 dapat menghasilkan distribusi aliran udara yang lebih seragam dibandingkan dengan model H1S1.

4.4.5 Distribusi aliran udara pada model H1W2 dan H1W3

Tabel 4.27 Perbandingan debit aliran udara pada model H1S1, H1W2 dan H1W3

LANTAI	H1S1			H1W2				H1W3			
	V	A	Q	V	A	Q	Δ %	V	A	Q	Δ %
LT33	1,36	2,00	2,72	1,03	2,00	2,05	-24%	0,075	2,00	0,15	-94%
LT32	0,73	2,00	1,47	0,55	2,00	1,11	-24%	0,083	2,00	0,17	-89%
LT31	0,43	2,00	0,86	0,33	2,00	0,65	-24%	0,092	2,00	0,18	-79%
LT30	0,30	2,00	0,59	0,22	2,00	0,45	-25%	0,095	2,00	0,19	-68%
LT29	0,24	2,00	0,47	0,17	2,00	0,34	-29%	0,109	2,00	0,22	-54%
LT28	0,31	2,00	0,62	0,21	2,00	0,42	-32%	0,218	2,00	0,44	-30%
SUM	3,37	12,00	6,74	2,51	12,00	5,02	-25%	0,67	12,00	1,34	-80%
U_c			5,75			6,09	6%			2,89	-50%

Apabila ditinjau dari besarnya debit yang dihasilkan oleh tiap lantai, maka model H1W2 mengalami penurunan debit dibandingkan dengan model H1S1. Penurunan debit tersebut berkisar antara 24% hingga 32% pada tiap lantainya atau dapat dikatakan hampir seragam. Hal tersebut menunjukkan bahwa perubahan orientasi sebesar 45° pada model H1W2 dapat mengurangi debit aliran udara yang dihasilkan, namun tidak banyak mempengaruhi distribusi yang dihasilkan apabila dibandingkan dengan model H1S1. Hal tersebut juga dapat dilihat dari nilai *flow unbalance* atau U_c yang dihasilkan oleh model H1W2 yaitu sebesar 6,09 atau

meningkat sebesar 6% dari nilai U_c model H1S1 yaitu 5,75. Hal tersebut menunjukkan kecilnya pengaruh perubahan orientasi dari 0° ke 45° apabila ditinjau dari segi pemerataan distribusi aliran udara yang dihasilkan.

Pengaruh orientasi terhadap pemerataan distribusi aliran udara yang cukup signifikan terjadi pada model H1W3. Nilai U_c pada model H1W3, yaitu sebesar 2,89 atau mengalami penurunan sebesar 50% dibandingkan model H1S1. Hal tersebut kemungkinan disebabkan oleh kinerja model H1W3 yang sangat buruk sehingga hampir seluruh lantai pada model tersebut memiliki nilai debit yang sangat rendah.

4.4.6 Distribusi aliran udara pada model H1T2

Tabel 4.28 Perbandingan debit aliran udara pada model H1S1 dan H1T2

LANTAI	H1S1			H1T2			
	V	A	Q	V	A	Q	$\Delta\%$
LT33	1,36	2,00	2,72	1,46	1,60	2,33	-14%
LT32	0,73	2,00	1,47	0,92	1,60	1,46	0%
LT31	0,43	2,00	0,86	0,62	1,60	0,98	14%
LT30	0,30	2,00	0,59	0,44	1,60	0,70	18%
LT29	0,24	2,00	0,47	0,43	1,60	0,69	46%
LT28	0,31	2,00	0,62	0,56	1,60	0,89	43%
SUM	3,37	12,00	6,74	4,42	9,60	7,06	5%
U_c			5,75			3,38	-41%

Apabila ditinjau dari debit aliran udara yang dihasilkan, dapat diamati bahwa penggunaan lubang internal dengan kemiringan vertikal 45° dan elemen pengarah dapat meningkatkan debit aliran udara secara keseluruhan, yang mengalami kenaikan sebesar 5% dibandingkan dengan model *base case* atau H1S1. Penurunan debit hanya terjadi pada lantai pertama (lantai 33) yaitu sekitar 5% dari debit lantai pertama model H1S1, namun pada lantai-lantai di bawahnya debit aliran udara cenderung mengalami peningkatan antara 5% hingga 46%. Tingkat pemerataan distribusi aliran udara juga dapat diukur berdasarkan nilai U_c atau *flow unbalance* yang diambil dari nilai debit paling tinggi dengan nilai debit

paling rendah yang dihasilkan dari model HIT2. Nilai Uc dari model HIT2 adalah sebesar 3,38 atau berkurang sebanyak 41% dibandingkan dengan model H1S1 yang memiliki nilai Uc 5,75. Hal tersebut menunjukkan bahwa penggunaan lubang internal dengan kemiringan vertikal 45° dan elemen pengarah juga dapat meningkatkan pemerataan distribusi aliran udara dibandingkan dengan sistem *ventilation shaft* dengan lubang internal yang tegak lurus dengan *shaft* dan tidak menggunakan elemen pengarah.

4.4.7 Distribusi aliran udara pada model K1-K6

Tabel 4.29 Perbandingan debit aliran udara pada model H1S1 dan K1-K6

LANTAI	H1S1			LANTAI	K1				LANTAI	K2			
	V	A	Q		V	A	Q	Δ %		V	A	Q	Δ %
LT33	1,36	2,00	2,72	LT33	2,16	0,56	1,22	-55%	LT29	2,19	0,56	1,23	-55%
LT32	0,73	2,00	1,47	LT32	1,33	1,00	1,33	-10%	LT28	1,19	1,00	1,19	-19%
LT31	0,43	2,00	0,86	LT31	0,96	1,96	1,89	119%	LT27	0,73	1,96	1,42	65%
LT30	0,30	2,00	0,59	SUM	4,45	3,52	4,43	-34%	SUM	4,11	3,52	3,85	-43%
LT29	0,24	2,00	0,47										
LT28	0,31	2,00	0,62										
SUM	3,37	12,00	6,74										
Uc		5,75				1,554	-73%				1,192	-79%	
LANTAI	H1S1			LANTAI	K3				LANTAI	K4			
	V	A	Q		V	A	Q	Δ %		V	A	Q	Δ %
LT33	1,36	2,00	2,72	LT25	2,20	0,56	1,24	-54%	LT21	2,26	0,56	1,27	-53%
LT32	0,73	2,00	1,47	LT24	1,17	1,00	1,17	-20%	LT20	1,25	1,00	1,25	-15%
LT31	0,43	2,00	0,86	LT23	0,64	1,96	1,25	45%	LT19	0,60	1,96	1,17	36%
LT30	0,30	2,00	0,59	SUM	4,01	3,52	3,66	-46%	SUM	4,11	3,52	3,69	-45%
LT29	0,24	2,00	0,47										
LT28	0,31	2,00	0,62										
SUM	3,37	12,00	6,74										
Uc		5,75				1,064	-81%				1,084	-81%	
LANTAI	H1S1			LANTAI	K5				LANTAI	K6			
	V	A	Q		V	A	Q	Δ %		V	A	Q	Δ %
LT33	1,36	2,00	2,72	LT17	2,02	0,56	1,14	-58%	LT13	1,71	0,56	0,96	-65%
LT32	0,73	2,00	1,47	LT16	1,06	1,00	1,06	-28%	LT12	0,88	1,00	0,88	-40%
LT31	0,43	2,00	0,86	LT15	0,51	1,96	1,01	16%	LT11	0,42	1,96	0,82	-5%
LT30	0,30	2,00	0,59	SUM	3,59	3,52	3,20	-53%	SUM	3,01	3,52	2,66	-61%
LT29	0,24	2,00	0,47										
LT28	0,31	2,00	0,62										
SUM	3,37	12,00	6,74										
Uc		5,75				1,13	-80%				1,177	-80%	

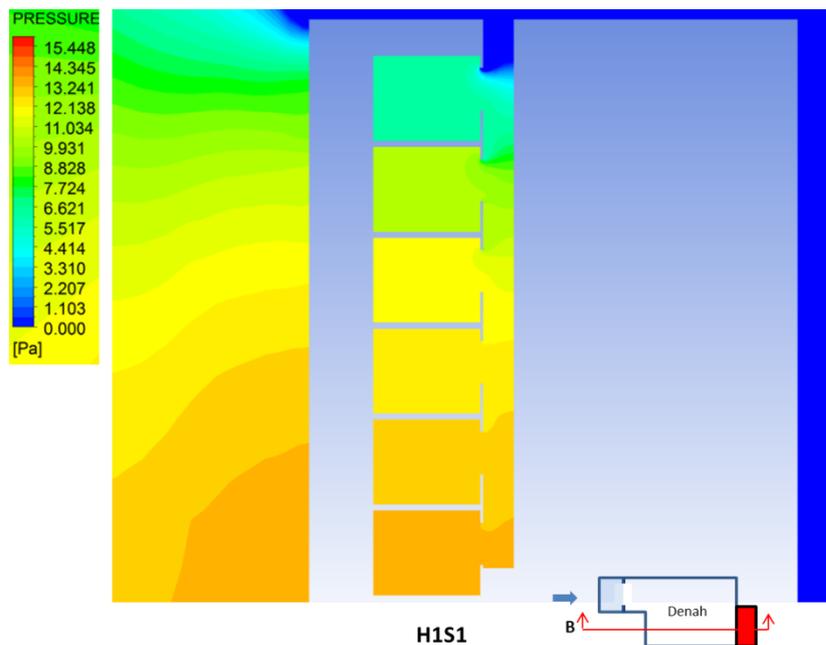
Apabila ditinjau dari segi debit aliran udara, model K1 hingga K6 juga mampu menghasilkan distribusi aliran udara yang cukup merata di tiap lantainya. Debit aliran udara yang dihasilkan di tiap lantai model K1-K6 cenderung lebih seragam dibandingkan dengan model H1S1. Model K3 merupakan model yang memiliki debit paling seragam di antara model K1-K6 dengan nilai debit aliran udara per lantai berkisar antara 1,17 m³/s hingga 1,25 m³/s atau hanya berbeda sekitar 0,08 m³/s. Nilai *Uc* atau *flow unbalance* juga menunjukkan hasil yang positif pada model K1-K6 yaitu paling baik bernilai 1,064 (model K3) atau mengalami penurunan sekitar 81% dibanding nilai *Uc* model H1S1, sedangkan nilai *Uc* paling buruk pada model K1-K6 adalah sebesar 1,554 (model K1).

Berdasarkan perbandingan nilai *Vo%* dan nilai *Uc* antara model K1-K6 dan model *base case* H1S1, dapat dikatakan bahwa pengurangan jumlah lantai yang terhubung dengan *shaft*, konfigurasi lubang internal yang lebih kecil di lantai atas dan semakin membesar ke lantai bawah, serta memperpendek panjang *shaft* dengan cara membuat lubang *outlet* di sisi bangunan yang berlawanan dari bukaan *inlet* dapat menghasilkan kinerja sistem *ventilation shaft* yang lebih baik daripada model *base case* atau H1S1. Kinerja yang lebih baik tersebut dapat dibuktikan dari total area yang tergolong nyaman yaitu sebesar 62% pada model H1S1 meningkat menjadi sebesar 100% pada seluruh model K1-K6 serta dari nilai *Uc* yang mengalami penurunan dari 5,75 pada model H1S1 menjadi antara 1,554 hingga 1,064 pada model K1-K6 (menurun 73% hingga 81% yang berarti distribusi aliran udara pada model K1-K6 lebih seragam)

4.4.8 Analisis kinerja model H1S1 dan pengaruh ketinggian model terhadap distribusi aliran udara

Sistem *ventilation shaft* dapat bekerja dengan cara menciptakan perbedaan tekanan antara *inlet* di sisi *windward* yang mendapatkan tekanan bernilai positif dan area *outlet* di bagian atap atau sisi *leeward* bangunan yang mendapatkan bernilai negatif, sehingga udara dapat mengalir melalui ruangan. Dengan sistem tersebut, setiap ruangan yang terhubung dengan *shaft* diharapkan dapat menerima aliran udara yang cukup untuk menghasilkan efek pendinginan fisiologis. Meski

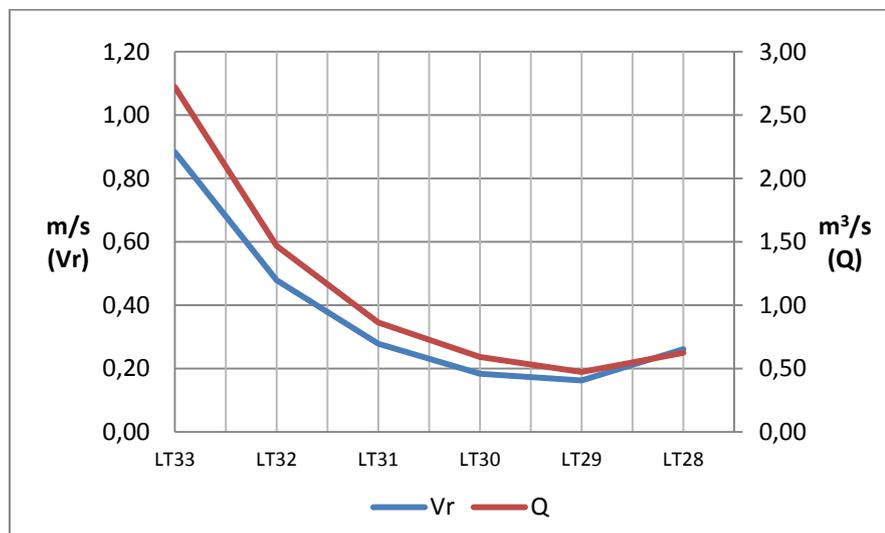
demikian, hasil simulasi model H1S1 atau model *base case* menunjukkan bahwa aliran udara yang terjadi di setiap ruangan tidak sama atau terjadi ketidakmerataan distribusi aliran udara. Hal tersebut mengakibatkan adanya kesenjangan antara satu ruangan dengan ruangan lainnya, sehingga ada ruangan-ruangan tertentu yang mendapatkan kecepatan aliran udara yang sangat tinggi, sementara ruangan lainnya mendapatkan kecepatan aliran udara yang sangat rendah.



Gambar 4.23 Kontur tekanan udara secara vertikal pada model H1S1

Berdasarkan gambar 4.23, dapat diidentifikasi bahwa tekanan di dalam *shaft* mengalami perubahan drastis dari tekanan yang bernilai 0 pa sampai dengan negatif (kontur warna biru tua) sebelum mencapai percabangan pertama, kemudian berubah menjadi nilai positif setelah melalui percabangan pertama hingga mencapai sekitar 6 pa. Tekanan di dalam *shaft* tersebut kemudian semakin bertambah secara bertahap setiap kali melewati percabangan. Wang (2011) menyebutkan bahwa kecepatan aliran fluida di dalam saluran cabang bergantung pada perbedaan tekanan antara di luar sistem dengan tekanan di dalam *manifold*. Hal tersebut juga selaras dengan prinsip ventilasi alami yang mengandalkan tekanan angin (Aynsley, 1977) yang menjelaskan bahwa sumber tenaga

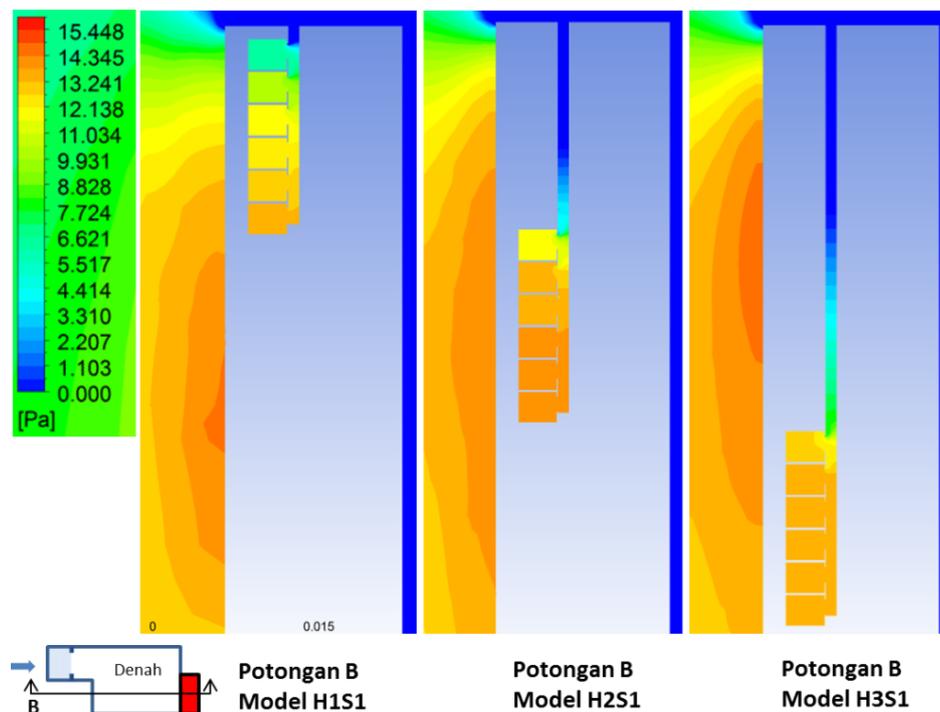
penggerak agar udara dapat mengalir di dalam bangunan adalah perbedaan tekanan angin pada sisi *windward* dan sisi *leeward*. Dengan demikian, maka semakin besar perbedaan tekanan yang terjadi, semakin besar pula kecepatan aliran udara yang dihasilkan di dalam ruangan, begitu pula sebaliknya. Adanya perubahan tekanan di dalam *shaft* tersebut mengakibatkan perbedaan tekanan yang terjadi antara di dalam *shaft* dengan di sisi *windward* pada lantai-lantai yang jauh dari *outlet* menjadi semakin kecil sehingga kecepatan aliran udara yang terjadi di dalam ruangan juga semakin kecil.



Gambar 4.24 Perbandingan kecepatan aliran udara rata-rata (V_r) dan debit aliran udara (Q) pada model H1S1

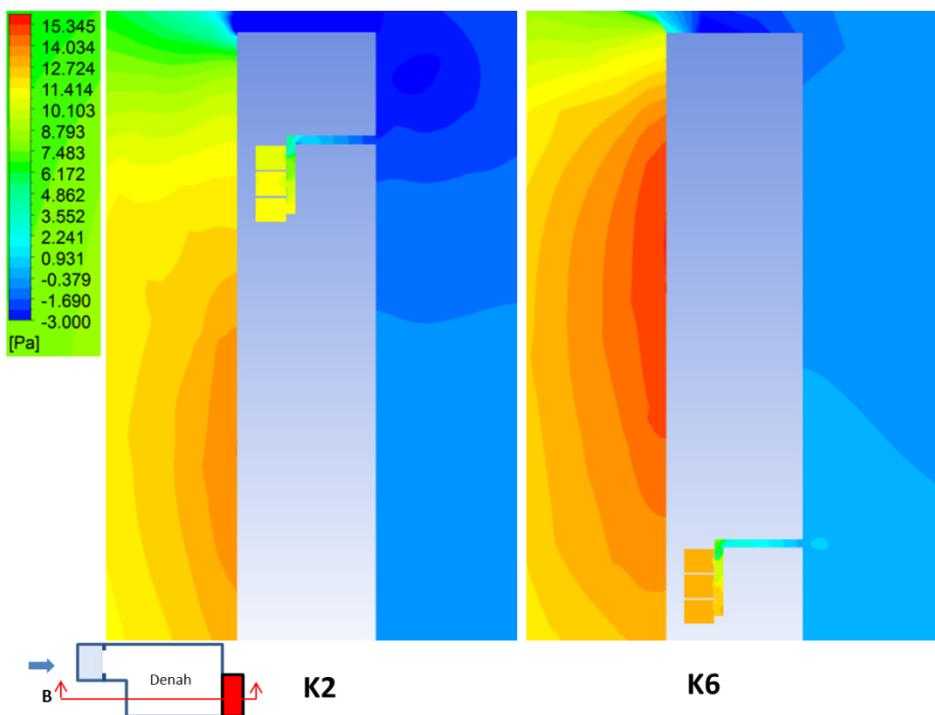
Berdasarkan gambar 4.24, dapat diamati bahwa kecepatan aliran udara yang terjadi di tiap lantai memiliki pola yang serupa dengan debit yang dihasilkan. Kecepatan aliran udara yang terjadi pada tiap lantai dipengaruhi oleh perbedaan antara tekanan di area *inlet* dengan tekanan yang terjadi di dalam *shaft*, sementara debit yang dihasilkan oleh tiap ruangan juga berbanding lurus dengan kecepatan aliran udara rata-rata pada ruangan tersebut. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa kecepatan aliran udara dan debit aliran udara yang dihasilkan oleh tiap lantai (tiap ruangan) dapat dipengaruhi oleh perbedaan antara tekanan di area *inlet* dengan tekanan yang terjadi di dalam *shaft*.

Distribusi aliran udara yang tidak merata pada tiap lantai juga membuktikan bahwa sistem *ventilation shaft* juga mengalami masalah yang serupa dengan yang terjadi pada *combining manifold*. Chen dkk (2003) menyebutkan bahwa bahwa aliran yang masuk ke *lateral* yang jauh dari lubang *outlet* akan mengalami *junction losses*, atau hilangnya energi aliran fluida akibat adanya percabangan, yang lebih besar daripada aliran yang masuk ke *lateral* yang dekat dengan *outlet*. Apabila semua *lateral* memiliki diameter yang sama, maka semakin jauh dari *outlet*, *lateral discharge* (debit) yang dihasilkan oleh *lateral* akan semakin berkurang (terjadi ketidakseragaman). Efek dari *junction losses* tersebut dapat dilihat pada perubahan tekanan yang terjadi di dalam manifolds. Hal tersebut sesuai dengan yang disebutkan oleh Bajura & Jones (1971), bahwa pada *combining manifold*, proses percabangan dapat menyebabkan terjadinya perubahan tekanan. Adanya perubahan tekanan yang terjadi pada tiap percabangan pada sistem *ventilation shaft* telah dibuktikan melalui gambar 4.23. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa ketidakmerataan distribusi aliran udara pada sistem *ventilation shaft* dapat disebabkan oleh adanya *junction losses* yang terjadi pada setiap percabangan antara *shaft* dengan masing-masing ruangan.

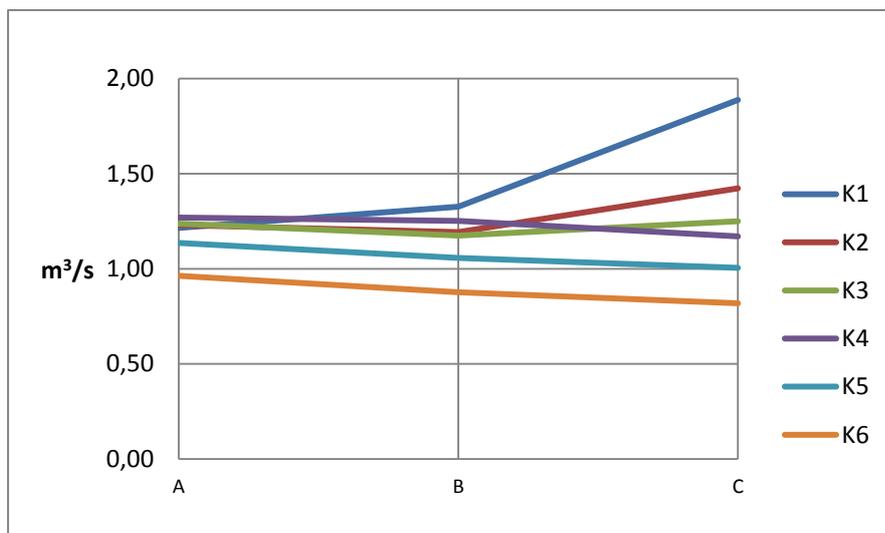


Gambar 4.25 Kontur tekanan pada model H1S1, H2S1 dan H3S2

Gradien tekanan yang terdapat pada permukaan bangunan di sisi *windward* (gambar 4.25) juga berpengaruh terhadap distribusi aliran udara di dalam sistem *ventilation shaft*. Pada model H1S1 misalnya, tekanan udara pada sisi *windward* model H1S1 memiliki gradien yaitu tekanan di area *inlet* lantai paling atas adalah yang paling rendah sementara tekanan di area *inlet* pada lantai paling bawah adalah yang paling besar. Kondisi tersebut dapat berfungsi sebagai penyeimbang dari efek *junction loss* seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, meskipun efek penyeimbang yang dihasilkan tidak terlalu signifikan. Meski demikian, gradien tekanan di area *inlet* pada model H2S1 dan H3S1 tidak memiliki efek yang serupa seperti pada model H1S1. Pada model H2S1, tekanan yang terjadi di masing-masing area *inlet*-nya hampir seragam sehingga faktor *junction losses* memiliki pengaruh yang dominan terhadap ketidakmerataan distribusi aliran udara pada model tersebut. Pada model H3S1, gradien tekanan di area *inlet* yang bernilai lebih besar di area *inlet* lantai yang lebih tinggi justru dapat membuat distribusi aliran udara semakin tidak merata.



Gambar 4.26 Kontur tekanan pada model K2 dan K6



Keterangan: A menunjukkan posisi lantai paling atas, B adalah lantai kedua dari atas, sedangkan C menunjukkan lantai paling bawah pada tiap model

Gambar 4.27 Debit aliran udara pada model K1-K6

Hal yang serupa juga terjadi pada model K1-K6. Letak ketinggian masing-masing model di dalam bangunan menyebabkan adanya perbedaan gradien tekanan di area *inlet* atau di sisi *windward* bangunan (gambar 4.26). Perbedaan gradien tekanan tersebut menyebabkan adanya perbedaan pola distribusi aliran udara pada model K1-K6. Berdasarkan gambar 4.27, dapat diamati bahwa model K1-K3 menunjukkan adanya kenaikan debit aliran udara dari lantai paling atas hingga lantai yang paling bawah, sedangkan model K4-K6 menunjukkan pola sebaliknya, yaitu penurunan debit aliran udara dari lantai paling atas hingga lantai yang paling bawah. Hal tersebut memperkuat indikasi bahwa gradien tekanan di area *inlet* dapat mempengaruhi distribusi aliran udara di dalam sistem *ventilation shaft*.

Pengaruh dari posisi/ketinggian model pada bangunan ini dapat dikaitkan dengan konsekuensi berupa penambahan panjang *shaft* pada masing-masing model. Semakin jauh jarak model dengan atap bangunan maka dibutuhkan *shaft* yang lebih panjang untuk mencapai lubang *outlet* di bagian atap bangunan. Pengaruh dari penambahan panjang *shaft* ini dapat dilihat pada gambar 4.26 di atas, yaitu terjadi perubahan tekanan pada saluran *shaft* yang lebih panjang. Wang

(2011) menyebutkan bahwa efek dari *friction* atau hambatan yang ditimbulkan oleh permukaan saluran akan sangat berpengaruh terutama pada saluran yang panjang atau memiliki rasio panjang/diameter yang besar. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa semakin panjang *shaft* untuk mencapai lubang *outlet*, maka efek *friction* yang terjadi akan semakin besar sehingga *head loss* (hilangnya energi aliran fluida) menjadi semakin besar pula. Hal ini menunjukkan bahwa variasi kelompok ketinggian ini memiliki pengaruh yang cukup signifikan pada kinerja sistem *ventilation shaft*. Semakin jauh letak model dari *outlet*, maka kinerja sistem *ventilation shaft* akan semakin berkurang, terutama dari segi pemerataan distribusi aliran udara dan total debit aliran udara yang dihasilkan oleh sistem tersebut.

4.4.9 Pengaruh konfigurasi bukaan, ukuran *shaft*, dan jumlah lantai yang terhubung dengan *shaft* terhadap distribusi aliran udara

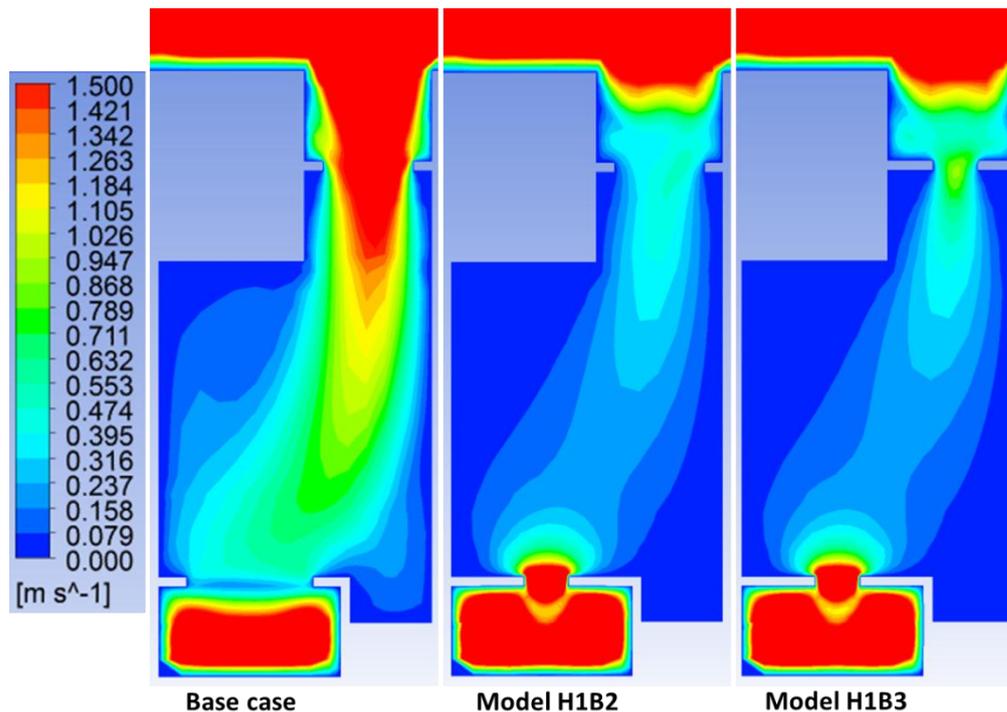
Salah satu strategi untuk membuat distribusi aliran di dalam suatu *combining manifold* lebih seragam adalah dengan memvariasikan diameter pipa *lateral*. Hal tersebut sesuai dengan yang disebutkan oleh Chen dkk (2003) bahwa aliran fluida pada *combining manifold* dapat dibuat lebih seragam dengan cara memperbesar diameter pipa *lateral* dari yang dekat *outlet* hingga yang paling besar adalah pipa *lateral* yang paling jauh dari *outlet*. Teori tersebut diaplikasikan pada sistem *ventilation shaft* dengan cara memvariasikan lubang internal yang menghubungkan ruangan unit apartemen dengan *shaft*. Lubang internal dibuat semakin besar dari lantai yang dekat *outlet* hingga lantai terbawah atau yang paling jauh dari *outlet* akan memiliki lubang internal yang paling besar. Konfigurasi bukaan tersebut disebut sebagai model H1B2. Pada model H1B3, konfigurasi yang serupa juga diterapkan pada ukuran lubang *inlet* dan lubang internal sekaligus.

Hasil simulasi pada model H1B2 dan H1B3 menunjukkan bahwa konfigurasi bukaan tersebut mampu membuat distribusi aliran udara lebih seragam dibandingkan dengan model *base case* (H1S1). Hal tersebut dapat dilihat berdasarkan perbandingan nilai *flow unbalance* (U_c) yang dihasilkan oleh model H1S1, H1B2 dan H1B3 masing-masing adalah 5,75, 1,72 (turun 70%), serta 1,58 (turun 72%). Penurunan nilai U_c pada model H1B2 dan H1B3 menunjukkan

bahwa debit aliran udara yang dihasilkan tiap lantai lebih seragam dibandingkan model H1S1. Meski demikian, debit total yang dihasilkan oleh model H1B2 dan H1B3 masih lebih rendah dibandingkan model H1S1. Hal tersebut juga menunjukkan bahwa konfigurasi ukuran bukaan yang kecil di lantai yang lebih atas dan semakin membesar pada lantai yang lebih bawah dapat mengakibatkan penurunan debit total yang dihasilkan oleh sistem *ventilation shaft*.

Wang (2011) menyebutkan bahwa ada beberapa hal yang dapat mempengaruhi distribusi aliran fluida pada suatu *manifold* yaitu rasio antara diameter *header* dengan panjang *header*, rasio antara area saluran cabang dengan area *header* (atau juga disebut sebagai *area ratio* seperti yang disebutkan oleh Bajura & Jones, 1971) serta tingkat resistansi saluran cabang. Variasi pada lubang internal yang menghubungkan ruangan dengan *shaft* merupakan salah satu cara untuk mengatur tingkat resistansi di dalam saluran cabang (ruangan apartemen). Hal ini sesuai dengan yang disebutkan oleh Chu (2010) bahwa pada ventilasi silang yang melibatkan lebih dari 1 ruangan, besarnya bukaan internal akan mempengaruhi nilai *resistance* ruang sehingga pada akhirnya juga mempengaruhi *ventilation rate* yang dihasilkan.

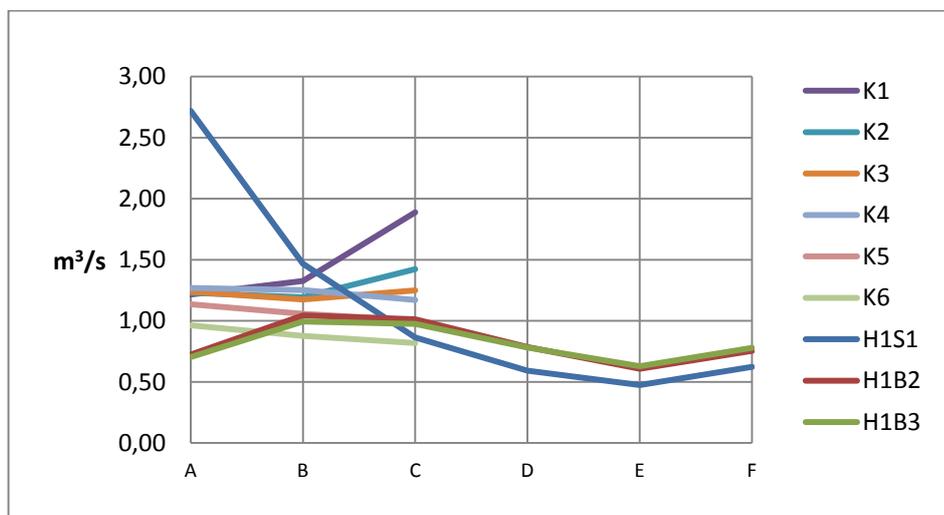
Pada konfigurasi bukaan seperti yang ada pada model H1B2, lantai-lantai yang lebih atas akan memiliki ukuran lubang internal yang lebih kecil dibandingkan lantai yang lebih bawah. Lantai paling atas akan memiliki tingkat resistansi yang lebih besar dibandingkan lantai-lantai di bawahnya. Wang (2011) menyebutkan bahwa aliran fluida cenderung melewati saluran dengan tingkat resistansi yang lebih kecil. Dengan demikian, pada model H1B2, aliran udara akan lebih banyak melewati ruangan-ruangan di lantai yang lebih rendah. Hal tersebut dapat dibuktikan dengan kecilnya nilai debit yang dihasilkan lantai teratas (lantai 33) pada model H1B2 serta adanya peningkatan debit aliran udara pada 4 lantai terbawah (lantai 31-28) pada kedua model tersebut jika dibandingkan dengan model H1S1.



Gambar 4.28 Perbandingan kontur kecepatan aliran udara di lantai 33 pada model *base case* (H1S1), H1B2 dan H1B3

Berdasarkan gambar 4.28, dapat diamati bahwa perbedaan antara model H1B2 dan H1B3 terletak pada ukuran lubang *inlet*-nya. Model H1B3 memiliki ukuran lubang *inlet* yang lebih kecil dibandingkan model H1B2. Perbedaan ukuran lubang *inlet* tersebut tidak menimbulkan perbedaan kecepatan aliran udara yang signifikan di dalam ruangan, kecuali di area sekitar lubang *inlet*. Model H1B3 memiliki kecepatan aliran udara yang lebih tinggi di sekitar lubang *inlet* dikarenakan ukuran lubang *inlet* yang lebih kecil. Adanya fenomena peningkatan aliran udara di area *inlet* pada model H1B3 ini dapat dijelaskan melalui teori mengenai *venturi effect*. Moore (1993) menyebutkan bahwa *venturi effect* ini menyebabkan terjadinya percepatan aliran udara saat aliran udara dari area yang lebih luas harus melewati area yang lebih sempit. Fenomena serupa juga terjadi pada area lubang internal model H1B2 dan H1B3 yang berukuran kecil. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa variasi ukuran lubang *inlet* tidak berpengaruh banyak apabila dibandingkan dengan efek yang dihasilkan oleh variasi ukuran lubang internal.

Efek pemerataan distribusi aliran udara yang dihasilkan oleh variasi ukuran lubang internal juga dapat dilihat pada hasil simulasi model K1-K6. Model-model tersebut memiliki ukuran lubang internal yang lebih kecil pada lantai paling atas dan semakin membesar pada lantai yang lebih bawah pada masing-masing model. Tingkat pemerataan distribusi pada model K1-K6 dapat dilihat berdasarkan nilai U_c yang dihasilkan, yaitu paling besar adalah 1,55 pada model K1 dan paling rendah 1,06 pada model K3.



Gambar 4.29 Perbandingan debit aliran pada model *base case* (H1S1), H1B2 dan H1B3 serta model K1-K6

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, salah satu faktor yang mempengaruhi distribusi aliran di dalam manifolds adalah faktor *area ratio* atau perbandingan antara total diameter *lateral* dengan diameter *header*. Apabila diterjemahkan ke dalam konteks sistem *ventilation shaft*, maka *area ratio* merupakan perbandingan antara total luas bukaan internal (dari semua lantai) dengan luas penampang *shaft*. Bajura & Jones (1971) menyebutkan bahwa semakin kecil nilai *area ratio* tersebut, maka distribusi aliran dapat dibuat lebih seragam. Pada sistem *ventilation shaft*, nilai *area ratio* tersebut dapat dibuat lebih kecil dengan 2 cara yaitu mengurangi jumlah lantai yang terhubung dengan *shaft* atau memperbesar ukuran (luas penampang) *shaft*.

Model K1-K6 memiliki jumlah lantai yang terhubung dengan *shaft* lebih sedikit (3 lantai) dibandingkan model H1S1, H1B2 dan H1B3 (6 lantai).

Berdasarkan gambar 4.29, dapat diamati bahwa model K1-K6 cenderung menghasilkan debit yang seragam di tiap lantainya (memiliki grafik yang lebih lurus), kecuali untuk model K1. Selain itu, model K1-K6 cenderung menghasilkan debit aliran udara yang lebih tinggi kecuali pada model K6. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa model yang memiliki jumlah lantai lebih sedikit cenderung menghasilkan debit aliran udara yang lebih besar dan lebih seragam di tiap lantainya. Hal tersebut menunjukkan kesesuaian antara hasil simulasi dengan teori mengenai *area ratio* yang disebutkan oleh Bajura & Jones (1971).

Pengaruh dari nilai *area ratio* juga dapat dilihat dari perbandingan hasil simulasi model H1S2 dengan model H1S1. Model H1S2 memiliki ukuran *shaft* (luas penampang *shaft*) yang lebih kecil, yaitu 2m x 0,5m, dibandingkan dengan model H1S1 yang memiliki *shaft* berukuran 2m x 1m. Secara teoritis, model H1S2 yang memiliki ukuran *shaft* lebih kecil atau nilai *area ratio* yang lebih besar akan memiliki tingkat distribusi aliran udara yang lebih rendah dibandingkan dengan model H1S1 yang memiliki ukuran *shaft* lebih besar. Hasil simulasi kedua model tersebut ternyata juga menunjukkan kesesuaian dengan teori mengenai *area ratio*. Model H1S2 memiliki nilai *flow unbalance* (Uc) sebesar 7,27 atau lebih tinggi 27% dari nilai Uc model H1S1, yaitu 5,75. Pengamatan terhadap kecepatan aliran udara dan debit aliran udara pada kedua model juga menunjukkan bahwa kecepatan aliran udara dan debit yang dihasilkan tiap lantai pada model H1S2 lebih rendah dibandingkan dengan model H1S1. Hal tersebut menunjukkan bahwa pada sistem *ventilation shaft*, ukuran *shaft* yang lebih besar akan menghasilkan distribusi aliran udara yang lebih seragam serta kecepatan dan debit aliran udara yang lebih besar pada tiap lantainya.

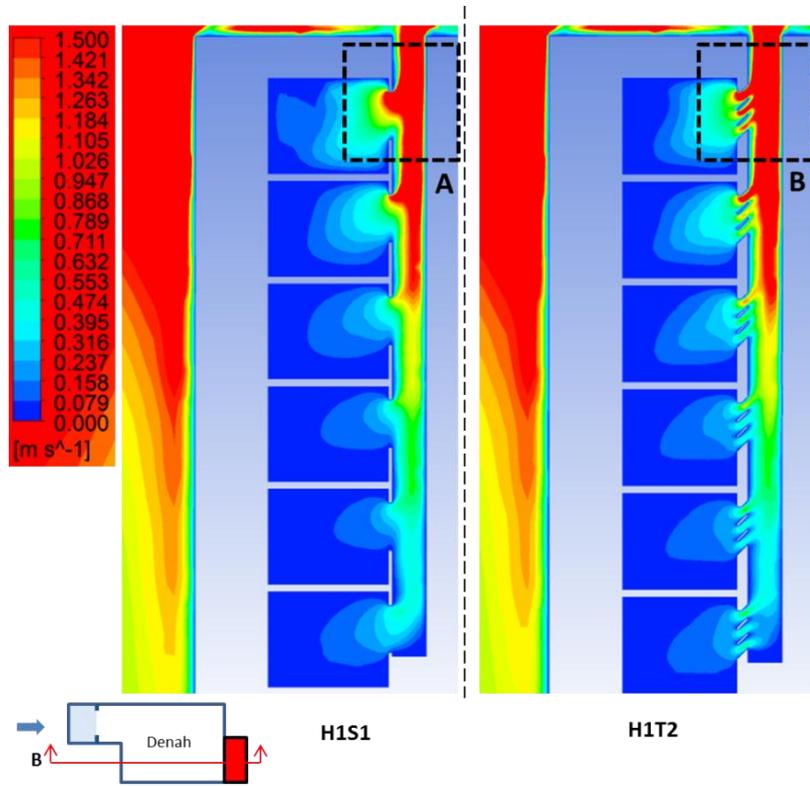
Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, salah satu faktor yang mempengaruhi distribusi aliran di dalam manifolds adalah faktor *area ratio* atau perbandingan antara total diameter *lateral* dengan diameter *header*. Apabila diterjemahkan ke dalam konteks sistem *ventilation shaft*, maka *area ratio* merupakan perbandingan antara total luas bukaan internal (dari semua lantai) dengan luas penampang *shaft*. Bajura & Jones (1971) menyebutkan bahwa semakin kecil nilai *area ratio* tersebut, maka distribusi aliran dapat dibuat lebih seragam. Pada sistem *ventilation shaft*, nilai *area ratio* tersebut dapat dibuat lebih

kecil dengan 2 cara yaitu mengurangi jumlah lantai yang terhubung dengan *shaft* atau memperbesar ukuran (luas penampang) *shaft*.

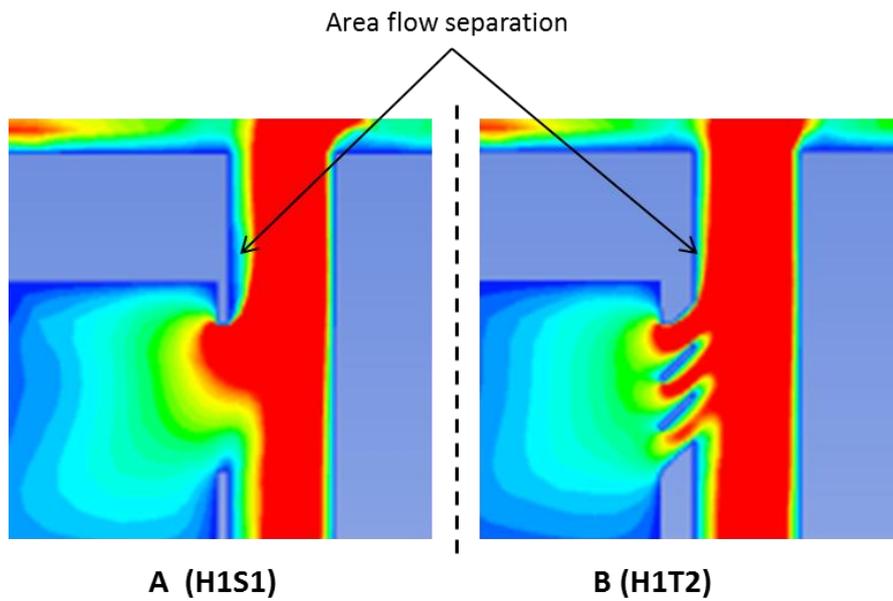
Model K1-K6 memiliki jumlah lantai yang terhubung dengan *shaft* lebih sedikit (3 lantai) dibandingkan model H1S1, H1B2 dan H1B3 (6 lantai). Berdasarkan gambar 4.29, dapat diamati bahwa model K1-K6 cenderung menghasilkan debit yang seragam di tiap lantainya (memiliki grafik yang lebih lurus), kecuali untuk model K1. Selain itu, model K1-K6 cenderung menghasilkan debit aliran udara yang lebih tinggi kecuali pada model K6. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa model yang memiliki jumlah lantai lebih sedikit cenderung menghasilkan debit aliran udara yang lebih besar dan lebih seragam di tiap lantainya. Hal tersebut menunjukkan kesesuaian antara hasil simulasi dengan teori mengenai *area ratio* yang disebutkan oleh Bajura & Jones (1971).

Pengaruh dari nilai *area ratio* juga dapat dilihat dari perbandingan hasil simulasi model H1S2 dengan model H1S1. Model H1S2 memiliki ukuran *shaft* (luas penampang *shaft*) yang lebih kecil, yaitu 2m x 0,5m, dibandingkan dengan model H1S1 yang memiliki *shaft* berukuran 2m x 1m. Secara teoritis, model H1S2 yang memiliki ukuran *shaft* lebih kecil atau nilai *area ratio* yang lebih besar akan memiliki tingkat distribusi aliran udara yang lebih rendah dibandingkan dengan model H1S1 yang memiliki ukuran *shaft* lebih besar. Hasil simulasi kedua model tersebut ternyata juga menunjukkan kesesuaian dengan teori mengenai *area ratio*. Model H1S2 memiliki nilai *flow unbalance* (U_c) sebesar 7,27 atau lebih tinggi 27% dari nilai U_c model H1S1, yaitu 5,75. Pengamatan terhadap kecepatan aliran udara dan debit aliran udara pada kedua model juga menunjukkan bahwa kecepatan aliran udara dan debit yang dihasilkan tiap lantai pada model H1S2 lebih rendah dibandingkan dengan model H1S1. Hal tersebut menunjukkan bahwa pada sistem *ventilation shaft*, ukuran *shaft* yang lebih besar akan menghasilkan distribusi aliran udara yang lebih seragam serta kecepatan dan debit aliran udara yang lebih besar pada tiap lantainya.

4.4.10 Pengaruh kemiringan lubang internal dan elemen pengarah terhadap distribusi aliran udara



Gambar 4.30 Perbandingan aliran udara di dalam *shaft* model H1S1 dan H1T2



Gambar 4.31 Detail perbandingan aliran udara di dalam *shaft* model H1S1 dan H1T2 dari gambar 4.31

Penggunaan lubang internal dengan kemiringan vertikal 45° dan elemen pengarah memiliki pengaruh terhadap *turning loss* (hilangnya energi aliran akibat pembelokan). Shaughnessy dkk (2005) menyebutkan bahwa pembelokan aliran fluida yang terjadi secara tiba-tiba dapat menyebabkan terjadinya *eddy* atau aliran berputar di area sudut setelah pembelokan. Adanya pembentukan formasi dari *eddy* tersebut disebut dengan istilah *flow separation*. Adanya *eddy* atau *flow separation* ini dapat menyebabkan pengurangan luas penampang efektif dari pipa atau saluran tersebut serta mengakibatkan hilangnya sebagian dari energi mekanik aliran fluida. Luas penampang efektif dari saluran dapat berkurang karena tidak ada aliran *downstream* (aliran yang menuju ke arah *outlet*) yang melewati area yang terdapat *eddy*. Mekanisme dari *flow separation* tersebut memiliki kesamaan dengan teori yang disebutkan oleh Aynsley (1977) mengenai pembagian *flow field* menjadi beberapa lapisan yaitu *freestream flow*, *shear layer* dan *wake flow*. Aliran *downstream* pada pipa atau saluran merupakan aliran *freestream*, sementara *flow separation* dan *eddy* yang dihasilkan adalah sama dengan *shear layer* dan *wake flow*. Berdasarkan Aynsley, *freestream flow* selalu memiliki kecepatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan *wake flow*, sementara *shear layer* dapat memiliki kecepatan aliran yang sama dengan *freestream flow* hingga nol.

Berdasarkan gambar 4.31 di atas, dapat diamati bahwa pada gambar A terdapat sebagian area dari *shaft* yang tidak dialiri udara dengan kecepatan tinggi (kontur berwarna merah menunjukkan kecepatan aliran udara yang tinggi) setelah terjadi pembelokan aliran udara dari ruangan. Dengan mengamati gambar tersebut, dapat diidentifikasi bahwa aliran berwarna merah (aliran dengan kecepatan tinggi) merupakan aliran *downstream*. Area berwarna kuning hingga biru (kecepatan aliran lebih rendah) setelah pembelokan dapat diidentifikasi sebagai area *separation flow*. Dari perbandingan antara gambar A dan B, dapat diamati bahwa gambar B atau model H1T2 dapat menghasilkan area *separation flow* yang lebih kecil dibandingkan dengan model H1S1. Hal tersebut menunjukkan bahwa penggunaan lubang internal dengan kemiringan vertikal 45° dan elemen pengarah dapat mengurangi *turning loss* yang ditimbulkan oleh pembelokan aliran serta meningkatkan area efektif dari luas penampang *shaft*.

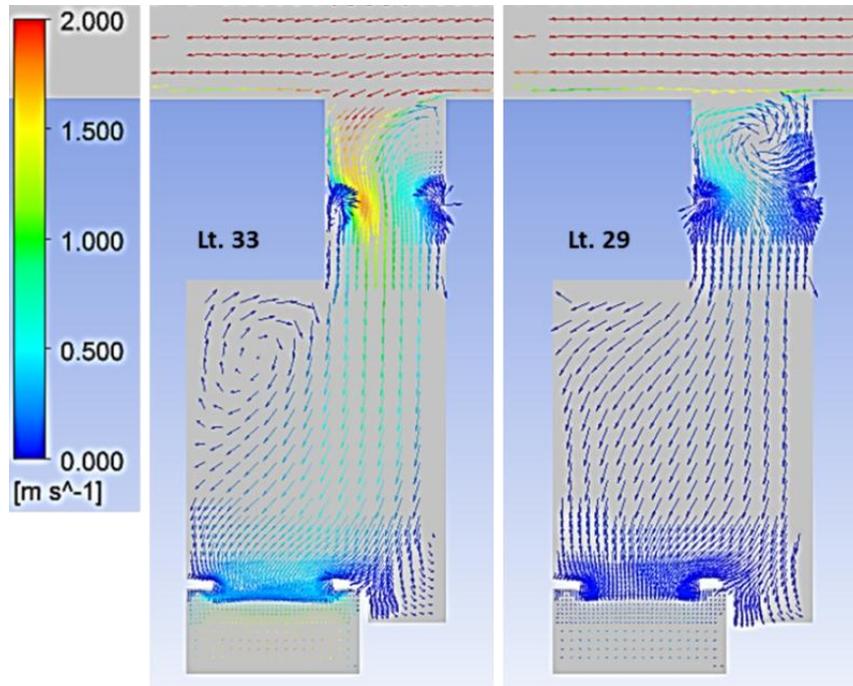
Berdasarkan Bajura & Jones (1971), nilai dari *turning loss* merupakan salah satu komponen dari nilai resistansi yang dihasilkan oleh *lateral*. Koefisien *turning loss* yang lebih kecil dapat mengurangi nilai resistansi *lateral*.

Meski demikian, penambahan elemen pengarah juga memiliki pengaruh terhadap area efektif dari lubang internal. Moore (1993) menyebutkan bahwa jendela dengan elemen pengarah seperti jendela tipe jalusi dan *awning* memiliki area efektif sebesar 75% dari ukuran jendela tersebut. Luas area lubang internal yang lebih kecil tersebut berpotensi meningkatkan resistansi ruang seperti yang telah dibahas pada subbab 4.4.9.

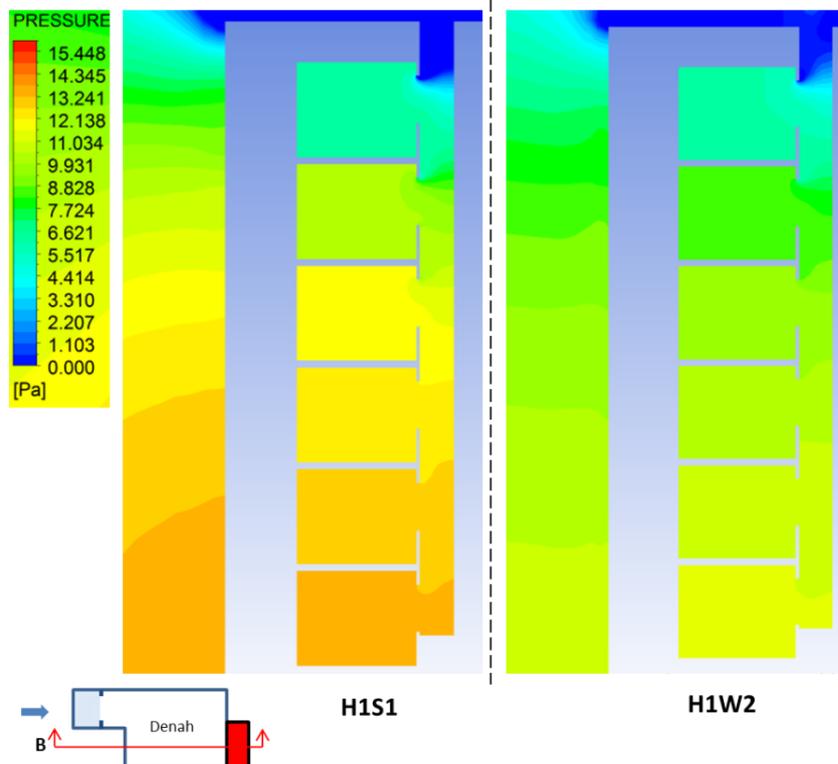
Berdasarkan Bajura & Jones (1971), nilai resistansi saluran *lateral* merupakan salah satu faktor yang dapat mempengaruhi distribusi aliran di dalam suatu *manifolds*. Berdasarkan analisa di atas, penggunaan lubang internal dengan kemiringan vertikal 45° dan elemen pengarah dapat mengakibatkan pengurangan nilai *turning loss*, namun di sisi lain penggunaan elemen pengarah juga dapat meningkatkan resistansi dari ruangan (yang merupakan saluran *lateral* untuk *ventilation shaft*) sehingga sulit ditentukan apakah nilai total resistansi tersebut berkurang atau justru bertambah.

Meski demikian, hasil simulasi menunjukkan bahwa penggunaan lubang internal dengan kemiringan vertikal 45° dan elemen pengarah pada sistem *ventilation shaft* dapat menghasilkan distribusi aliran yang lebih seragam dibandingkan dengan sistem *ventilation shaft* dengan lubang internal tegak lurus dan tanpa elemen pengarah. Hal tersebut dapat dibuktikan berdasarkan nilai U_c pada model H1T2, yaitu 3,38, atau lebih rendah 41% dibandingkan dengan nilai U_c model H1S1, yaitu 5,75. Pemerataan distribusi aliran udara yang lebih baik tersebut juga dapat diakibatkan oleh peningkatan area efektif dari luas penampang *shaft* seperti tampak pada gambar 4.31.

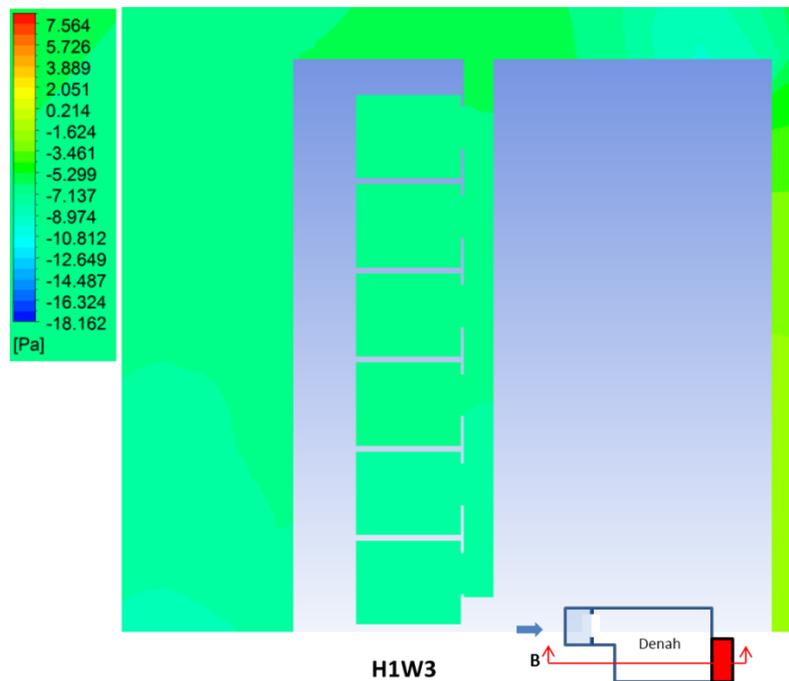
4.4.11 Pengaruh arah kedatangan angin terhadap distribusi aliran udara



Gambar 4.32 Perbandingan vektor kecepatan aliran udara dengan kecepatan tinggi (lantai 33) dan kecepatan rendah (lantai 29)



Gambar 4.33 Perbandingan kontur tekanan pada orientasi 0° (H1S1) dan 45° (H1W2)



Gambar 4.34 Kontur tekanan pada orientasi angin 90° (H1W3)

Pengaruh dari orientasi terhadap arah kedatangan angin ini dapat dijelaskan melalui gambar 4.33 dan 4.34 yang menunjukkan distribusi tekanan angin di permukaan dinding bangunan serta di area atap bangunan. Prajongsan (2011) menyebutkan bahwa sistem *ventilation shaft* dapat bekerja dengan cara memanfaatkan adanya perbedaan tekanan pada permukaan bangunan di sisi *windward* (sisi *inlet* pada orientasi 0°) dengan tekanan di area atap yang bersifat negatif. Berdasarkan gambar 4.32 dan 4.33 dapat diamati bahwa model H1S1 dan H1W2 sama-sama memiliki tekanan bersifat positif di area *inlet*-nya dan tekanan bersifat negatif di area atap. Meski demikian, model H1S1 memiliki tekanan positif yang bernilai lebih besar di area *inlet*-nya apabila dibandingkan dengan model H1W2 sehingga perbedaan tekanan yang dihasilkan model H1S1 menjadi lebih besar. Wang (2011) menyebutkan bahwa kecepatan aliran fluida di dalam saluran cabang bergantung pada perbedaan tekanan antara di luar sistem dengan tekanan di dalam *manifold*. Hal tersebut juga sesuai dengan mekanisme *cross ventilation* (Aynsley, 1977) yang menjelaskan bahwa sumber tenaga penggerak agar udara dapat mengalir di dalam bangunan adalah perbedaan tekanan angin

pada sisi *windward* dan sisi *leeward*. Dengan demikian model H1S1 dengan orientasi 0° dapat menghasilkan perbedaan tekanan lebih besar yang selanjutnya juga menghasilkan kecepatan aliran udara yang lebih tinggi, sementara model H1W2 yang memiliki orientasi 45° menghasilkan perbedaan tekanan yang lebih kecil yang selanjutnya menghasilkan kecepatan aliran udara lebih rendah pula. Hal tersebut juga berlaku pada model H1W3 yang memiliki orientasi 90° sehingga tekanan pada sisi *inlet* dan di atap bangunan sama-sama bernilai negatif (gambar 4.34) yang selanjutnya mengakibatkan perbedaan tekanan yang kecil serta kecepatan aliran udara yang sangat rendah.

Meskipun kecepatan aliran udara yang dihasilkan berbeda, pemerataan distribusi aliran udara yang dihasilkan oleh model H1S1 dan H1W2 tidak mengalami perbedaan yang signifikan. Hal tersebut dapat dijelaskan dari elemen-elemen desain kedua model yang identik (ukuran *shaft*, ketinggian, dan konfigurasi bukaan) sehingga perbedaan kinerja pada kedua model hanya disebabkan oleh perubahan distribusi tekanan angin pada permukaan bangunan yang diakibatkan oleh perubahan orientasi.

4.5 Rangkuman analisa penelitian

Seluruh analisa yang telah dilakukan sebelumnya perlu dirangkum terlebih dahulu untuk memudahkan proses penyusunan kesimpulan. Rangkuman analisa pada penelitian ini dibagi menjadi 2 bagian sebagai berikut:

4.5.1 Kinerja *ventilation shaft* dalam menciptakan efek pendinginan fisiologis oleh angin

Kemampuan sistem *ventilation shaft* dalam menghasilkan efek pendinginan fisiologis oleh angin dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain jumlah lantai yang terhubung dengan *shaft*, ukuran *shaft* (luas penampang *shaft*), konfigurasi bukaan-bukaan pada unit apartemen, letak ketinggian pada bangunan, serta arah angin.

Tabel 4.30 Rangkuman jumlah titik yang memenuhi kriteria efek pendinginan fisiologis oleh angin pada seluruh model yang diamati

	Base Case	Variasi/Treatment												
		Ukuran Shaft			Konfigurasi Bukaannya				Orientasi Angin				Kemiringan L. Internal	
		H1S1	H1S2	Δ %	H1B2	Δ %	H1B3	Δ %	H1W2	Δ %	H1W3	Δ %	H1T2	Δ %
LT33	8	5	-38%	0	-100%	2	-75%	5	-38%	0	-100%	8	0%	
LT32	4	0	-100%	4	0%	5	25%	2	-50%	0	-100%	4	0%	
LT31	2	0	-100%	4	100%	4	100%	0	-100%	0	-100%	2	0%	
LT30	0	0	-	2	200%	2	200%	0	-	0	-	0	-	
LT29	0	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	
LT28	0	0	-	0	-	2	200%	0	-	0	-	0	-	
Total	14	5	-64%	10	-29%	15	7%	7	-50%	0	-100%	14	0%	

	Base Case	Variasi Ketinggian					
		H2S1		Δ %	H3S1		Δ %
		H1S1					
LT33	8	LT27	7	-13%	LT21	10	25%
LT32	4	LT26	4	0%	LT20	3	-25%
LT31	2	LT25	0	-100%	LT19	0	-100%
LT30	0	LT24	0	-	LT18	0	-
LT29	0	LT23	0	-	LT17	0	-
LT28	0	LT22	0	-	LT16	0	-
Total	14	-	11	-21%	-	13	-7%

	Base Case	Kombinasi sistem <i>ventilation shaft</i> 3 lantai dan variasi bukaan internal								
		K1		Δ %	K2		Δ %	K3		Δ %
		H1S1								
LT33	8	LT33	5	-38%	LT29	5	-38%	LT25	6	-25%
LT32	4	LT32	10	150%	LT28	5	25%	LT24	6	50%
LT31	2	LT31	10	400%	LT27	5	150%	LT23	4	100%
LT30	0									
LT29	0									
LT28	0									
Total	14		25	79%		15	7%		16	14%

	Base Case	Kombinasi sistem <i>ventilation shaft</i> 3 lantai dan variasi bukaan internal								
		K4		Δ %	K5		Δ %	K6		Δ %
		H1S1								
LT33	8	LT21	7	-13%	LT17	5	-38%	LT13	4	-50%
LT32	4	LT20	5	25%	LT16	5	25%	LT12	3	-25%
LT31	2	LT19	3	50%	LT15	4	100%	LT11	2	0%
LT30	0									
LT29	0									
LT28	0									
Total	14		15	7%		14	0%		9	-36%

Δ% : Persentase selisih jumlah titik nyaman terhadap model base case (H1S1)

Sistem *ventilation shaft* pada lantai 33 hingga 28 dengan ukuran *shaft* 2x1 m dan konfigurasi bukaan yang seragam serta orientasi 0° terhadap arah kedatangan angin, mampu menghasilkan efek pendinginan fisiologis oleh angin pada lantai 33, 32 dan 31 yang secara berurutan adalah sebesar 80%, 40% dan 20% dari total titik ukur pada tiap lantai tersebut dengan kecepatan aliran udara rata-rata berkisar antara 0,16 m/s hingga 0,88 m/s.

Sistem *ventilation shaft* dengan ukuran *shaft* 2x1 m, orientasi 0°, ukuran *inlet* dan *outlet* yang seragam namun terletak pada lantai 27 hingga 22 dapat menghasilkan efek pendinginan fisiologis oleh angin pada 70% dan 40% dari total area yang diukur di lantai 33 dan 32 dengan kecepatan aliran udara rata-rata antara 0,07 m/s hingga 1,16 m/s. Pada sistem *ventilation shaft* tersebut, terjadi aliran udara dengan kecepatan yang terlalu tinggi di area di dekat *inlet* hingga melampaui batas kriteria untuk efek pendinginan fisiologis oleh angin. Sementara itu, sistem *ventilation shaft* yang sama namun terletak pada lantai 21 hingga 16 dapat menghasilkan efek pendinginan fisiologis oleh angin pada 100% dan 30% dari total area yang diukur di lantai 33 dan 32 dengan kecepatan aliran udara rata-rata antara 0,02 m/s hingga 0,95 m/s.

Sistem *ventilation shaft* pada lantai 33 hingga 28 dengan ukuran *shaft* 2x0,5 m, konfigurasi bukaan seragam serta orientasi 0° dapat menghasilkan efek pendinginan fisiologis oleh angin pada 50% dari total area yang diukur di lantai 33 saja dengan kecepatan aliran udara rata-rata antara 0,04 m/s hingga 0,59 m/s..

Sistem *ventilation shaft* pada lantai 33 hingga 28 dengan ukuran *shaft* 2x1 m, orientasi 0° namun dengan bukaan internal yang divariasikan dapat menghasilkan efek pendinginan fisiologis pada 40%, 40% dan 20% dari total area yang diukur berturut-turut pada lantai 32, 31 dan 30 dengan kecepatan aliran udara antara 0,24 m/s hingga 0,53 m/s. Sementara itu, sistem *ventilation shaft* serupa namun dengan variasi pada bukaan *inlet* dan bukaan internal dapat menghasilkan efek pendinginan fisiologis oleh angin pada 20%, 50%, 40%, 20%, 0% dan 20% dari total area yang diukur berturut-turut pada lantai 33 hingga 28 dengan kecepatan aliran udara rata-rata antara 0,25 m/s hingga 0,62 m/s

Sistem *ventilation shaft* dengan ukuran *shaft* 2x1 m, orientasi 0°, ukuran *inlet* dan *outlet* yang seragam, terletak pada lantai 33 hingga 28, namun memiliki

kemiringan lubang internal sebesar 45° sekaligus juga memiliki elemen pengarah pada lubang internal tersebut dapat menghasilkan efek pendinginan fisiologis oleh angin pada 80%, 40% dan 20% dari total area yang diukur dengan kecepatan aliran udara rata-rata antara 0,23 m/s hingga 0,72 m/s.

Sistem *ventilation shaft* yang terdiri dari 3 lantai, *shaft* berukuran 2x1 m, bukaan internal yang divariasikan dan orientasi 0° terbagi dalam 6 kelompok ketinggian yang berbeda. Kelompok pertama yang terletak pada lantai 33-31 dapat menghasilkan efek pendinginan fisiologis oleh angin secara berturut-turut pada 50%, 100% dan 100% dari total titik ukur pada ketiga lantai tersebut dengan kecepatan aliran udara rata-rata berkisar antara 0,60 m/s hingga 0,75 m/s. Kelompok kedua yang terletak pada lantai 29-27 dapat menghasilkan efek pendinginan fisiologis oleh angin secara berturut-turut pada 50%, 50% dan 50% dari total titik ukur pada ketiga lantai tersebut dengan kecepatan aliran udara rata-rata berkisar antara 0,52 m/s hingga 0,60 m/s. Kelompok ketiga yang terletak pada lantai 25-23 dapat menghasilkan efek pendinginan fisiologis oleh angin secara berturut-turut pada 60%, 60% dan 40% dari total titik ukur pada ketiga lantai tersebut dengan kecepatan aliran udara rata-rata berkisar antara 0,53 m/s hingga 0,65 m/s. Kelompok keempat yang terletak pada lantai 21-19 dapat menghasilkan efek pendinginan fisiologis oleh angin secara berturut-turut pada 70%, 50% dan 30% dari total titik ukur pada ketiga lantai tersebut dengan kecepatan aliran udara rata-rata berkisar antara 0,45 m/s hingga 0,68 m/s. Kelompok kelima yang terletak pada lantai 17-15 dapat menghasilkan efek pendinginan fisiologis oleh angin secara berturut-turut pada 50%, 40% dan 30% dari total titik ukur pada ketiga lantai tersebut dengan kecepatan aliran udara rata-rata berkisar antara 0,44 m/s hingga 0,60 m/s. sementara itu, kelompok keenam yang terletak pada lantai 25-23 dapat menghasilkan efek pendinginan fisiologis oleh angin secara berturut-turut pada 40%, 30% dan 20% dari total titik ukur pada ketiga lantai tersebut dengan kecepatan aliran udara rata-rata berkisar antara 0,35 m/s hingga 0,49 m/s. Kelompok-kelompok ketinggian tersebut dapat menghasilkan efek pendinginan fisiologis oleh angin dan kecepatan aliran udara yang berbeda karena masing-masing memiliki input kecepatan angin yang berbeda (kelompok paling atas

memiliki input kecepatan aliran udara paling besar) serta karena distribusi tekanan permukaan bangunan yang berbeda pula.

Tabel 4.31 Rangkuman kecepatan aliran udara rata-rata (m/s) yang dihasilkan pada seluruh model yang diamati

	Base Case	Variasi/Treatment												
		Ukuran Shaft			Konfigurasi Bukaan				Orientasi Angin				Kemiringan L. Internal	
		H1S1	H1S2	Δ %	H1B2	Δ %	H1B3	Δ %	H1W2	Δ %	H1W3	Δ %	H1T2	Δ %
LT33	0,88	0,59	-33%	0,42	-52%	0,48	-45%	0,62	-30%	0,02	-97%	0,72	-18%	
LT32	0,48	0,19	-61%	0,53	12%	0,62	29%	0,32	-33%	0,02	-96%	0,52	9%	
LT31	0,28	0,08	-71%	0,47	69%	0,50	81%	0,20	-29%	0,02	-93%	0,36	30%	
LT30	0,18	0,05	-73%	0,33	80%	0,35	89%	0,14	-26%	0,01	-93%	0,26	39%	
LT29	0,16	0,04	-78%	0,24	45%	0,25	56%	0,11	-29%	0,05	-71%	0,23	40%	
LT28	0,26	0,08	-68%	0,31	17%	0,34	29%	0,16	-39%	0,16	-41%	0,25	-5%	

	Base Case	Variasi Ketinggian					
		H1S1	H2S1			H3S1	
				Δ %		Δ %	
LT33	0,88	LT27	1,16	31%	LT21	0,95	8%
LT32	0,48	LT26	0,49	2%	LT20	0,39	-19%
LT31	0,28	LT25	0,21	-26%	LT19	0,16	-44%
LT30	0,18	LT24	0,09	-50%	LT18	0,07	-65%
LT29	0,16	LT23	0,07	-58%	LT17	0,03	-84%
LT28	0,26	LT22	0,07	-72%	LT16	0,02	-94%

	Base Case	Kombinasi sistem <i>ventilation shaft</i> 3 lantai dan variasi bukaan internal								
		H1S1	K1		Δ %	K2		Δ %	K3	
LT33	0,88	LT33	0,60	-32%	LT29	0,60	-32%	LT25	0,65	-26%
LT32	0,48	LT32	0,64	34%	LT28	0,52	9%	LT24	0,56	16%
LT31	0,28	LT31	0,75	169%	LT27	0,55	98%	LT23	0,53	90%
LT30	0,18									
LT29	0,16									
LT28	0,26									

	Base Case	Kombinasi sistem <i>ventilation shaft</i> 3 lantai dan variasi bukaan internal								
		H1S1	K1		Δ %	K2		Δ %	K3	
LT33	0,88	LT21	0,68	-23%	LT17	0,60	-32%	LT13	0,49	-45%
LT32	0,48	LT20	0,57	20%	LT16	0,49	3%	LT12	0,39	-18%
LT31	0,28	LT19	0,45	62%	LT15	0,44	58%	LT11	0,35	25%
LT30	0,18									
LT29	0,16									
LT28	0,26									

Δ% : Persentase selisih kecepatan aliran udara rata-rata terhadap model base case (H1S1)

Berdasarkan data-data di atas, dapat disimpulkan bahwa 1) letak ketinggian sistem *ventilation shaft* pada bangunan dapat mempengaruhi keseragaman kecepatan aliran udara yang dihasilkan. Semakin rendah ketinggian kecepatan aliran udara yang dihasilkan semakin tidak seragam, 2) ukuran *shaft* yang lebih besar dapat menghasilkan efek pendinginan fisiologis oleh angin dan kecepatan aliran udara yang lebih baik, 3) sistem *ventilation shaft* dengan variasi pada bukaan internal, yaitu semakin membesar pada lantai yang lebih bawah pada satu sistem *ventilation shaft*, dapat menghasilkan kecepatan aliran udara yang lebih seragam, namun tingkat efek pendinginan fisiologis oleh angin yang dihasilkan lebih rendah, sedangkan variasi pada bukaan *inlet* dan internal sekaligus dapat menghasilkan efek pendinginan fisiologis oleh angin yang sedikit lebih baik 4) orientasi 0° dapat menghasilkan tingkat efek pendinginan fisiologis oleh angin paling baik pada sistem *ventilation shaft* dibandingkan dengan orientasi 45° dan 90° , 5) lubang internal yang dimiringkan sebesar 45° ditambah dengan penggunaan elemen pengarah dapat menghasilkan kecepatan aliran udara yang lebih seragam, namun efek pendinginan fisiologis oleh angin yang dihasilkan masih relatif sama, 6) sistem *ventilation shaft* yang hanya terhubung dengan 3 lantai cenderung dapat menghasilkan tingkat efek pendinginan fisiologis oleh angin yang lebih baik serta kecepatan aliran udara yang lebih seragam, namun hal tersebut juga tergantung pada letak ketinggian sistem *ventilation shaft* pada bangunan. Sistem *ventilation shaft* yang terletak pada ketinggian yang rendah cenderung menghasilkan efek pendinginan fisiologis oleh angin dan pemerataan kecepatan aliran udara yang lebih rendah.

4.5.2 Pengaruh ketinggian dan elemen desain *ventilation shaft* terhadap distribusi aliran udara

Kemampuan sistem *ventilation shaft* dalam menghasilkan aliran udara dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain jumlah lantai yang terhubung dengan *shaft*, ukuran *shaft* (luas penampang *shaft*), konfigurasi bukaan-bukaan pada unit apartemen, letak ketinggian pada bangunan, serta arah angin. hal tersebut dapat dilihat dari adanya perbedaan pada hasil simulasi sistem *ventilation shaft* dengan perlakuan yang berbeda-beda.

Tabel 4.32 Debit aliran udara (m³/s) yang dihasilkan pada seluruh model yang diamati

	Base Case	Variasi/Treatment												
		Ukuran Shaft			Konfigurasi Buka-an				Orientasi Angin				Kemiringan L. Internal	
		H1S1	H1S2	Δ %	H1B2	Δ %	H1B3	Δ %	H1W2	Δ %	H1W3	Δ %	H1T2	Δ %
LT33	2,72	1,98	-27%	0,72	-73%	0,70	-74%	2,05	-24%	0,15	-94%	2,33	-14%	
LT32	1,47	0,85	-42%	1,04	-29%	0,99	-32%	1,11	-24%	0,17	-89%	1,46	0%	
LT31	0,86	0,51	-41%	1,01	17%	0,97	13%	0,65	-24%	0,18	-79%	0,98	14%	
LT30	0,59	0,36	-40%	0,79	33%	0,78	32%	0,45	-25%	0,19	-68%	0,70	18%	
LT29	0,47	0,27	-42%	0,61	28%	0,63	33%	0,34	-29%	0,22	-54%	0,69	46%	
LT28	0,62	0,20	-69%	0,75	21%	0,78	25%	0,42	-32%	0,44	-30%	0,89	43%	
Total	6,74	4,17	-38%	4,93	-27%	4,86	-28%	5,02	-25%	1,34	-80%	7,06	5%	
Uc	5,75	10,09	75%	1,72	-70%	1,58	-72%	6,09	6%	2,89	-50%	3,38	-41%	

	Base Case	Variasi Ketinggian					
		H2S1		Δ %	H3S1		Δ %
		H1S1	H2S1	Δ %	H3S1	Δ %	
LT33	2,72	LT27	2,83	4%	LT21	2,26	-17%
LT32	1,47	LT26	1,25	-15%	LT20	0,99	-32%
LT31	0,86	LT25	0,57	-33%	LT19	0,44	-49%
LT30	0,59	LT24	0,29	-52%	LT18	0,18	-69%
LT29	0,47	LT23	0,19	-60%	LT17	0,06	-87%
LT28	0,62	LT22	0,15	-75%	LT16	0,06	-90%
Total	6,74	-	5,29	-22%	-	4,00	-41%
Uc	5,75	-	18,53	222%	-	37,29	549%

	Base Case	Kombinasi sistem <i>ventilation shaft</i> 3 lantai dan variasi bukaan internal								
		K1		Δ %	K2		Δ %	K3		Δ %
		H1S1	K1	Δ %	K2	Δ %	K3	Δ %		
LT33	2,72	LT33	1,22	-55%	LT29	1,23	-55%	LT25	1,24	-54%
LT32	1,47	LT32	1,33	-10%	LT28	1,19	-19%	LT24	1,17	-20%
LT31	0,86	LT31	1,89	119%	LT27	1,42	65%	LT23	1,25	45%
LT30	0,59									
LT29	0,47									
LT28	0,62									
Total	6,74		4,43	-34%		3,85	-43%		3,66	-46%
Uc	5,75		1,55	-73%		1,19	-79%		1,06	-81%

	Base Case	Kombinasi sistem <i>ventilation shaft</i> 3 lantai dan variasi bukaan internal									
	H1S1	K4			$\Delta\%$	K5			$\Delta\%$	K6	
LT33	2,72	LT21	1,27	-53%	LT17	1,14	-58%	LT13	0,96	-65%	
LT32	1,47	LT20	1,25	-15%	LT16	1,06	-28%	LT12	0,88	-40%	
LT31	0,86	LT19	1,17	36%	LT15	1,01	16%	LT11	0,82	-5%	
LT30	0,59										
LT29	0,47										
LT28	0,62										
Total	6,74		3,69	-45%		3,20	-53%		2,66	-61%	
Uc	5,75		1,08	-81%		1,13	-80%		1,18	-80%	

$\Delta\%$: Persentase selisih debit aliran udara terhadap model base case (H1S1)

Sistem *ventilation shaft* pada lantai 28 hingga 33 dengan ukuran *shaft* 2x0,5 m, konfigurasi bukaan seragam serta orientasi 0° dapat menghasilkan debit aliran udara per lantai antara 0,47-2,72 m³/s serta nilai Uc sebesar 5,75. Sistem *ventilation shaft* dengan ukuran *shaft* 2x1 m, orientasi 0°, ukuran *inlet* dan *outlet* yang seragam namun terletak pada lantai 22 hingga 27 serta pada lantai 16 hingga 21 masing-masing dapat menghasilkan debit aliran udara per lantai antara 0,34-2,05 m³/s dan 0,15-0,44 m³/s serta nilai Uc sebesar 18,53 dan 37,29.

Sistem *ventilation shaft* pada lantai 28 hingga 33 dengan ukuran *shaft* 2x1 m, orientasi 0° namun dengan bukaan internal yang divariasikan serta dengan bukaan *inlet* dan *internal* yang divariasikan masing-masing dapat menghasilkan debit aliran udara per lantai antara 0,61-1,04 m³/s dan 0,63-0,99 m³/s serta nilai Uc sebesar 1,72 dan 1,58.

Sistem *ventilation shaft* pada lantai 28 hingga 33 dengan ukuran *shaft* 2x1 m dan konfigurasi bukaan yang seragam dengan orientasi 45° dan 90° dapat menghasilkan debit aliran udara per lantai antara 0,61-1,04 m³/s dan 0,63-0,99 m³/s serta nilai Uc sebesar 6,09 dan 2,89.

Sistem *ventilation shaft* pada lantai 28 hingga 33 dengan ukuran *shaft* 2x1 m dan konfigurasi bukaan yang seragam namun memiliki lubang internal yang dimiringkan 45° dan elemen pengarah dapat menghasilkan debit aliran udara per lantai antara 0,69-2,33 m³/s serta nilai Uc sebesar 3,38.

Sistem *ventilation shaft* dengan jumlah lantai yang terhubung dengan *shaft* sebanyak 3 lantai dapat menghasilkan kecepatan aliran udara serta tingkat

keseragaman aliran udara yang lebih baik (dengan indikator berupa nilai U_c yang lebih kecil) dibandingkan dengan sistem *ventilation shaft* yang terhubung dengan 6 lantai. Sistem *ventilation shaft* dengan 3 lantai, *shaft* berukuran 2x1 m, bukaan internal yang divariasikan dan orientasi 0° yang terletak pada ketinggian berbeda-beda pada bangunan yaitu lantai 33-31, lantai 29-27, lantai 25-23, lantai 21-19, lantai 17-15 dan lantai 13-11 dapat menghasilkan kecepatan aliran udara rata-rata per lantai masing-masing sebesar 1,22-1,89 m^3/s , 1,19-1,42 m^3/s , 1,17-1,25 m^3/s , 1,17-1,27 m^3/s , 1,01-1,14 m^3/s dan 0,82-0,96 m^3/s . Selain itu, masing-masing sistem *ventilation shaft* tersebut juga dapat menghasilkan nilai U_c secara berurutan 1,55, 1,19, 1,06, 1,08, 1,13 serta 1,18.

Perbedaan distribusi aliran udara dan nilai U_c yang dihasilkan oleh masing-masing sistem *ventilation shaft* di atas dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain: 1) Distribusi tekanan pada permukaan bangunan. Berdasarkan Aynsley (1977), adanya gradien tekanan pada permukaan bangunan pada sisi *windward* dapat disebabkan oleh adanya gradien kecepatan angin lokal. Perbedaan tekanan pada permukaan bangunan juga dapat dipengaruhi oleh orientasi angin (Liddament, 1998). Adanya gradien tekanan tersebut selanjutnya dapat mempengaruhi perbedaan tekanan yang dihasilkan tiap lantai pada sistem *ventilation shaft*. 2) Perbandingan antara panjang *shaft* dengan luas penampang *shaft* memiliki pengaruh terhadap aliran udara yang dihasilkan sistem *ventilation shaft*. Berdasarkan Bajura & Jones (1971), semakin besar nilai perbandingan antara panjang *header* dengan diameter *header* (semakin panjang *shaft*) maka efek *friction* akan semakin besar. 3) Nilai *area ratio* dari sistem *ventilation shaft*. Nilai *area ratio* ini merupakan nilai total luas lubang-lubang yang berhubungan dengan *shaft*, dibagi dengan luas penampang *shaft* itu sendiri. Nilai *area ratio* yang kecil dapat menghasilkan distribusi aliran udara yang lebih seragam (Bajura & Jones, 1976). 4) Resistansi dari saluran *lateral* (yang diinterpretasikan sebagai ruangan apartemen pada sistem *ventilation shaft*). Distribusi aliran udara dapat dibuat lebih seragam dengan cara mengatur sedemikian rupa besarnya resistansi tiap *lateral* (Wang dkk, 2011). Nilai resistansi pada ruangan dapat dipengaruhi oleh luas lubang internalnya (Chu dkk, 2010).

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Eksperimen yang dilakukan pada penelitian ini terbagi menjadi beberapa model simulasi yang ditujukan untuk mengamati pengaruh ketinggian dan elemen-elemen desain terhadap kinerja yang dihasilkan sistem *ventilation shaft* dalam menghasilkan efek pendinginan fisiologis serta distribusi aliran udara yang seragam. Eksperimen tersebut melibatkan model *base case* yang terdiri atas 6 lantai yang dihubungkan dengan *shaft* secara vertikal beserta varian-varian dari model tersebut yang masing-masing mewakili elemen desain yang diamati. Varian dari model dengan 6 lantai tersebut yaitu model dengan variasi pada ketinggian model pada bangunan, ukuran *shaft* (luas penampang *shaft*), konfigurasi bukaan, orientasi angin serta kemiringan lubang internal dan penggunaan elemen pengarah pada lubang internal tersebut.

Efek pendinginan fisiologis tersebut dapat diukur berdasarkan kecepatan aliran udara yang dihasilkan dan dibandingkan dengan standar mengenai respon umum terhadap aliran udara menurut Szokolay (2004). Distribusi aliran udara yang dihasilkan oleh tiap lantai pada masing-masing model juga dapat diukur berdasarkan debit aliran udara yang dihasilkan pada tiap lantai beserta nilai U_c atau *flow unbalance* yang diukur berdasarkan debit aliran udara paling tinggi yang dibagi dengan debit aliran udara terendah yang dihasilkan tiap lantai pada masing-masing model.

5.2 Kinerja *ventilation shaft* dalam menciptakan efek pendinginan fisiologis

Penggunaan *ventilation shaft* pada unit apartemen untuk menciptakan ventilasi silang dapat menghasilkan kecepatan aliran udara yang lebih tinggi apabila dibandingkan dengan kecepatan aliran udara yang dihasilkan oleh ventilasi satu sisi. Adanya kecepatan aliran udara yang lebih tinggi ini diharapkan dapat menghasilkan efek pendinginan fisiologis di dalam ruangan unit apartemen. Kecepatan aliran udara yang dibutuhkan untuk menimbulkan efek pendinginan

adalah antara 0,5 m/s hingga 1,5 m/s. Sistem *ventilation shaft* memiliki beberapa unit apartemen yang terletak pada lantai berbeda lantai yang terhubung dengan *shaft*. Dengan demikian, kemampuan *ventilation shaft* dalam menciptakan efek pendinginan fisiologis juga tergantung pada seberapa besar kecepatan aliran udara yang dihasilkan pada tiap-tiap lantai yang terhubung dengan *ventilation shaft*.

Kemampuan sistem *ventilation shaft* dalam menghasilkan efek pendinginan fisiologis dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain letak ketinggian sistem *ventilation shaft* pada bangunan, konfigurasi bukaan-bukaan pada unit apartemen, ukuran *shaft* (luas penampang *shaft*), jumlah lantai yang terhubung dengan *shaft*, arah angin serta kemiringan bukaan internal.

Sistem *ventilation shaft* yang terletak pada lantai 33 hingga 28 dengan ukuran *shaft* 2x1 m dan konfigurasi bukaan yang seragam serta orientasi 0° terhadap arah kedatangan angin, mampu menghasilkan efek pendinginan fisiologis pada lantai 33, 32 dan 31 yang secara berurutan adalah sebesar 80%, 40% dan 20% dari total titik ukur pada tiap lantai tersebut dengan kecepatan aliran udara rata-rata berkisar antara 0,16 m/s hingga 0,88 m/s. Meski demikian, sistem *ventilation shaft* tersebut tidak mampu menghasilkan efek pendinginan yang cukup di lantai 30, 29 dan 28.

Perubahan orientasi atau arah kedatangan angin, yaitu pada 45° dan 90° dapat menyebabkan berkurangnya kecepatan aliran udara rata-rata di tiap lantai masing-masing sebesar 26% hingga 39%. Jumlah total titik ukur yang mampu menghasilkan efek pendinginan fisiologis juga mengalami pengurangan yaitu masing-masing sebesar 50% dan 100%.

Perubahan ukuran *shaft*, yaitu pengurangan luas penampang *shaft* sebesar 50%, mengakibatkan penurunan kecepatan aliran udara rata-rata di tiap lantai sebesar 33% hingga 78%. Jumlah total titik ukur yang mampu menghasilkan efek pendinginan fisiologis juga mengalami penurunan sebesar 64%.

Perubahan letak ketinggian sistem *ventilation shaft* pada bangunan, yaitu pada lantai 27-22 dan lantai 21-16 mengakibatkan adanya peningkatan kecepatan aliran udara pada lantai paling atas, namun mengalami penurunan pada lantai-lantai di bawahnya. Meski demikian, total jumlah titik pengukuran yang

memenuhi kriteria pendinginan fisiologis pada kedua sistem *ventilation shaft* tersebut mengalami penurunan masing-masing sebesar 21% dan 7%.

Perubahan kemiringan lubang internal dan elemen pengarah dapat meningkatkan kecepatan aliran udara di lantai 32-29 sebesar 9% hingga 40%, namun juga mengurangi kecepatan aliran udara di lantai 33 dan 28 yaitu masing-masing sebesar 18% dan 5%. Meski demikian, perubahan kemiringan lubang internal dan elemen pengarah tersebut tidak mengakibatkan adanya perubahan pada jumlah titik yang menghasilkan efek pendinginan fisiologis.

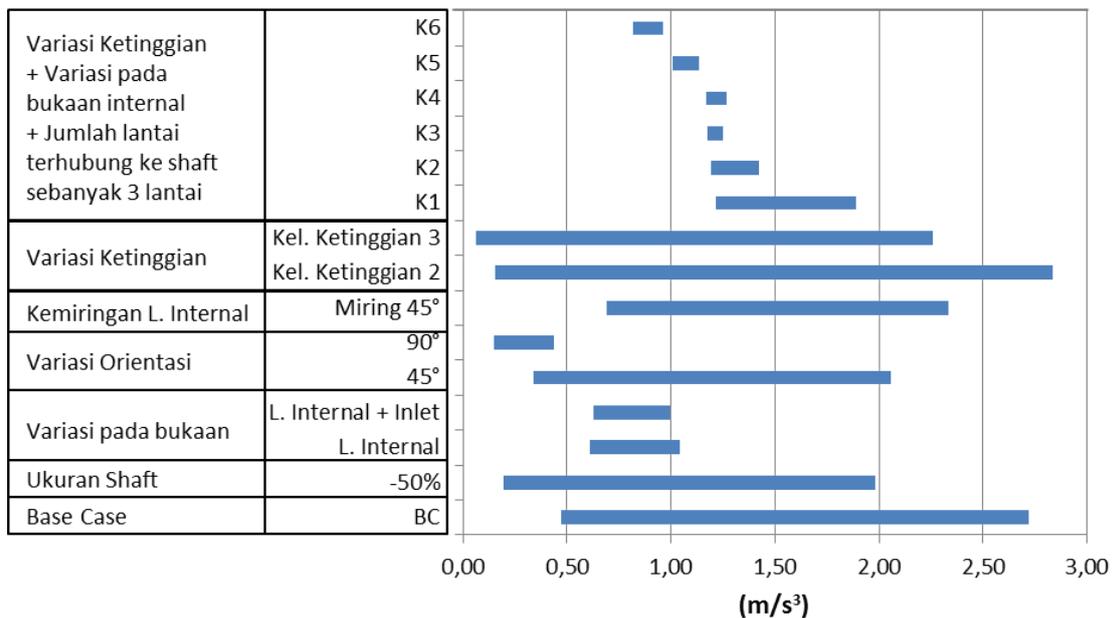
Sistem *ventilation shaft* dengan jumlah lantai yang terhubung dengan *shaft* lebih sedikit dan memiliki konfigurasi bukaan internal yang divariasikan umumnya dapat menghasilkan efek pendinginan fisiologis yang lebih baik. Sistem *ventilation shaft* pada lantai 33-31, 29-27, 25-23, dan 21-19 dapat menghasilkan jumlah titik ukur yang memenuhi kriteria untuk efek pendinginan fisiologis lebih banyak sebesar 79%, 7%, 16%, dan 7%.

Paparan di atas membuktikan bahwa efek pendinginan fisiologis lebih banyak dipengaruhi oleh kecepatan aliran udara yang dihasilkan pada tiap lantai. Sistem *ventilation shaft* yang memiliki persebaran aliran udara lebih merata belum tentu dapat menghasilkan efek pendinginan yang lebih baik. Umumnya, efek pendinginan hanya terjadi pada 3 lantai paling atas pada tiap model. Penurunan ketinggian, perubahan orientasi angin serta pengurangan ukuran *shaft* hampir selalu menyebabkan penurunan efek pendinginan fisiologis yang dihasilkan, yaitu antara 7% hingga 100%. Kombinasi antara penggunaan lubang internal yang membesar dari atas ke bawah serta jumlah lantai yang terhubung dengan *shaft* sebanyak 3 lantai dapat menghasilkan efek pendinginan fisiologis yang lebih baik, antara 7% hingga 79%. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa sistem *ventilation shaft* dapat menghasilkan efek pendinginan fisiologis yang cukup baik apabila jumlah lantai yang terhubung dengan *shaft* dibatasi sebanyak 3 lantai serta menggunakan bukaan internal yang semakin besar dari lantai atas ke lantai bawah.

5.3 Pengaruh ketinggian dan elemen desain *ventilation shaft* terhadap distribusi aliran udara

Kemampuan sistem *ventilation shaft* dalam menghasilkan distribusi aliran udara yang seragam juga dapat dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti letak ketinggian sistem *ventilation shaft* pada bangunan, konfigurasi bukaan-bukaan pada unit apartemen, ukuran *shaft* (luas penampang *shaft*), jumlah lantai yang terhubung dengan *shaft*, arah angin, serta kemiringan bukaan internal. Tingkat distribusi aliran udara tersebut dapat diukur berdasarkan nilai *flow unbalance* atau Uc. Berdasarkan Bajura dan Jones (1971) nilai Uc tersebut dapat diukur berdasarkan nilai debit maksimum dibagi dengan nilai debit minimum yang dihasilkan. Semakin besar nilai Uc, maka distribusi aliran semakin tidak seragam atau sebaliknya semakin kecil nilai Uc maka distribusi aliran semakin seragam.

Diagram Nilai Max/Min Air Flow Rate



Gambar 5.1 Diagram nilai maksimum dan minimum air flow rate yang dihasilkan tiap model

Sistem *ventilation shaft* bercabang pada lantai 33 hingga 28 dengan ukuran *shaft* 2x1 m dan konfigurasi bukaan yang seragam serta orientasi 0° terhadap arah kedatangan angin dapat menghasilkan debit aliran udara antara 0,62 m³/s hingga

2,72 m³/s dengan nilai maksimum pada lantai paling atas (lantai 33). Nilai Uc yang dihasilkan oleh sistem *ventilation shaft* tersebut adalah sebesar 5,75.

Adanya variasi pada bukaan internal dan variasi pada bukaan *inlet* dan internal sekaligus dapat menghasilkan debit aliran udara masing-masing antara 0,61-1,04 m³/s dan 0,63-0,99 m³/s. Nilai Uc yang dihasilkan kedua sistem masing-masing adalah 1,72 dan 1,58 atau menurun sebesar 70% dan 72%. Kombinasi antara variasi pada bukaan internal dan jumlah lantai terhubung dengan *shaft* yang lebih sedikit mampu menghasilkan Uc yang lebih baik, yaitu antara 1,55 hingga 1,06 atau menurun antara 73% hingga 81%. Hal ini sesuai dengan pernyataan Wang (2011) bahwa aliran udara dapat dibuat lebih seragam dengan cara mengatur sedemikian rupa besarnya resistansi tiap *lateral*. Variasi pada bukaan mengacu pada pernyataan Chu dkk (2010) bahwa nilai resistansi pada ruangan dapat dipengaruhi oleh luas lubang internalnya.

Pengurangan ukuran *shaft* sebesar 50% dapat menghasilkan debit aliran udara antara 0,20-1,98 m³/s serta nilai Uc sebesar 10,09 atau meningkat sebesar 75%. Perubahan jumlah lantai terhubung ke *shaft* dan ukuran *shaft* akan tersebut mempengaruhi nilai *area ratio* dari sistem *ventilation shaft*. Nilai *area ratio* ini merupakan nilai total luas lubang-lubang yang berhubungan dengan *shaft*, dibagi dengan luas penampang *shaft* itu sendiri. Nilai *area ratio* yang kecil dapat menghasilkan distribusi aliran yang lebih seragam (Bajura & Jones, 1976).

Perubahan kemiringan pada lubang internal dan elemen pengarah sebesar 45° dapat menghasilkan debit aliran udara antara 0,69-2,33 m³/s serta nilai Uc sebesar 3,38 atau menurun sebesar 41%. Hal tersebut disebabkan oleh adanya perubahan *turning loss*.

Perubahan ketinggian pada sistem *ventilation shaft*, yaitu pada ketinggian lantai 27-22 dan 21-16 dapat menghasilkan debit aliran udara masing-masing antara 0,15-2,83 m³/s dan 0,06-2,26 m³/s. Nilai Uc yang dihasilkan kedua sistem masing-masing adalah 18,53 dan 37,29 atau meningkat sebesar 222% dan 549%. Perubahan orientasi menjadi 45° dan 90° dapat menghasilkan debit aliran udara masing-masing antara 0,34-2,05 m³/s dan 0,15-0,44 m³/s. Nilai Uc yang dihasilkan kedua sistem masing-masing adalah 6,09 atau meningkat 6% dan 2,89 atau menurun 50%. Hal tersebut disebabkan oleh perbedaan distribusi tekanan

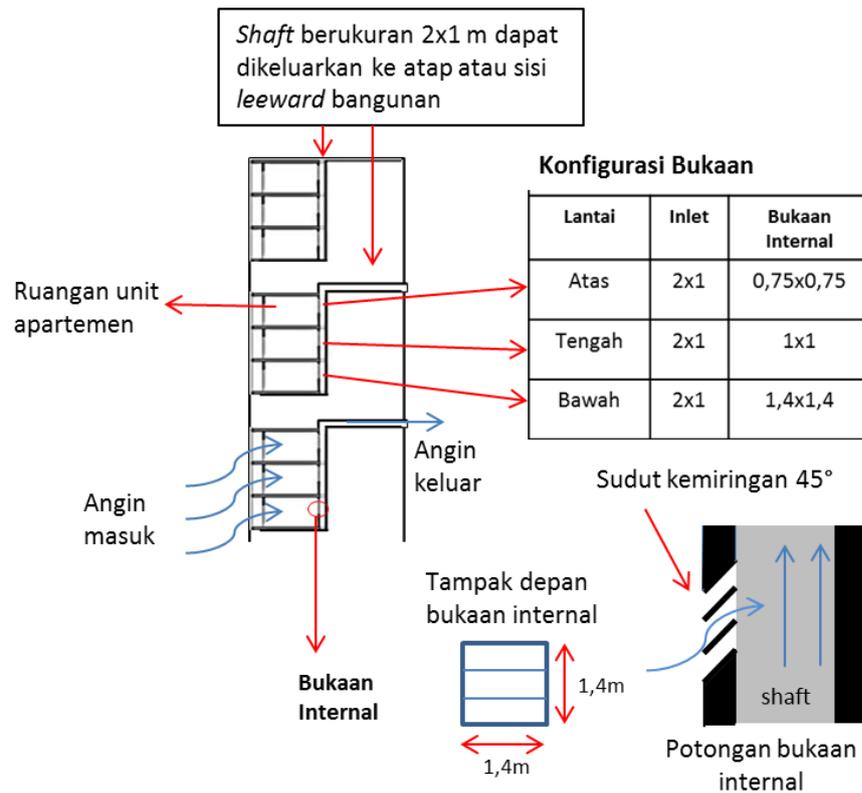
pada permukaan bangunan. Hal tersebut sesuai dengan pernyataan Aynsley (1977) tentang adanya gradien tekanan pada permukaan bangunan pada sisi *windward* yang disebabkan oleh adanya gradien kecepatan angin lokal serta perbedaan tekanan pada permukaan bangunan yang dipengaruhi oleh orientasi angin (Liddament, 1998).

Berdasarkan paparan di atas, dapat diidentifikasi bahwa elemen-elemen desain sistem *ventilation shaft* dapat memberikan dampak positif dan negatif terhadap pemerataan distribusi aliran udara. Elemen desain yang dapat meningkatkan pemerataan distribusi aliran udara antara lain variasi pada bukaan internal yang membesar dari atas ke bawah, pengurangan jumlah lantai yang terhubung ke shaft, serta kemiringan lubang internal, yaitu antara 41% hingga 81%. Sementara itu, penurunan ketinggian model, serta pengurangan ukuran *shaft* umumnya dapat menyebabkan distribusi aliran udara menjadi semakin tidak seragam yaitu antara 75% hingga 549%. Pada model dengan bukaan seragam, penurunan ketinggian dapat menyebabkan distribusi aliran udara menjadi semakin tidak merata. Meski demikian, pada model yang memiliki kombinasi antara variasi bukaan internal yang membesar dari atas ke bawah, serta jumlah lantai yang terhubung sebanyak 3 lantai, perubahan ketinggian tidak menghasilkan perubahan distribusi aliran udara secara signifikan, hanya besarnya debit aliran udara yang mengalami perubahan. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa kombinasi antara variasi bukaan internal yang membesar dari atas ke bawah serta jumlah lantai yang terhubung sebanyak 3 lantai memiliki pengaruh paling besar terhadap pemerataan distribusi aliran udara pada sistem *ventilation shaft*.

5.4 Konsep sistem *ventilation shaft* untuk meningkatkan efek pendinginan serta distribusi aliran udara yang seragam

Sistem *ventilation shaft* yang ideal adalah sistem *ventilation shaft* yang dapat menghasilkan kenyamanan pada setiap lantai yang terhubung dengan *shaft* tersebut. Berdasarkan hasil analisa dan kesimpulan di atas, maka dapat dirumuskan bahwa jumlah cabang atau jumlah lantai yang ideal untuk dihubungkan dengan *ventilation shaft* yang berukuran 2x1 m adalah sebanyak 3

lantai. Hal tersebut dilakukan untuk meminimalkan nilai *area ratio*, sesuai dengan yang disebutkan oleh Bajura & Jones (1976) bahwa nilai *area ratio* yang kecil dapat menghasilkan distribusi aliran udara yang lebih seragam. Lubang *outlet* dari *shaft* tidak harus diletakkan di atap bangunan, namun juga dapat diletakkan pada sisi bangunan yang berlawanan (sisi *leeward* apabila orientasi 0°) dengan sisi bangunan yang menjadi *inlet* pada unit apartemen. Hal tersebut ditujukan untuk mengurangi panjang *shaft* serta mengurangi efek *friction* (head loss) dari permukaan dalam dinding *shaft*, sesuai dengan yang disebutkan oleh Bajura & Jones (1976) bahwa semakin besar nilai perbandingan tersebut (semakin panjang *shaft*) maka efek *friction* akan semakin besar.



Gambar 5.2 Diagram konsep sistem *ventilation shaft*

Penggunaan variasi pada lubang internal yang menghubungkan ruangan apartemen dengan *shaft* dapat membantu menghasilkan distribusi aliran udara yang seragam. Hal tersebut mengacu pada teori yang disebutkan oleh Chen dkk (2003) bahwa aliran fluida pada *combining manifold* dapat dibuat lebih seragam

dengan cara memperbesar diameter pipa *lateral* dari yang dekat *outlet* hingga yang paling besar adalah pipa *lateral* yang paling jauh dari *outlet*. Ukuran lubang internal pada sistem *ventilation shaft* yang terdiri dari 3 lantai, yaitu sebesar 0,75 m x 0,75 m pada lantai teratas, 1 m x 1 m pada lantai tengah serta 1,4 m x 1,4 m pada lantai paling bawah terbukti cukup efektif dalam menghasilkan distribusi yang relatif seragam. Lubang internal juga dapat dibuat miring 45° dan ditambahkan elemen pengarah untuk mengurangi efek *turning loss*.

5.5 Saran

Ada beberapa hal yang dapat dilakukan agar penelitian mengenai sistem *ventilation shaft* bercabang yang selanjutnya dapat memberikan hasil yang lebih akurat serta menghasilkan konsep sistem *ventilation shaft* bercabang yang lebih baik yaitu:

1. Penggunaan metode eksperimen lain seperti *wind tunnel* agar dapat dibandingkan hasilnya dengan hasil simulasi komputer untuk memverifikasi keakuratan hasil simulasi.
2. Kondisi eksperimen dapat dibuat lebih realistis dengan menambahkan furnitur-furnitur pada ruangan apartemen sehingga hasil eksperimen yang didapatkan menjadi semakin akurat.
3. Perlu dipertimbangkan elemen-elemen lain yang dapat mengontrol kinerja *ventilation shaft*, seperti *grill* atau elemen pengarah yang dapat diatur bukaannya pada lubang internal, serta kemungkinan penggunaan kipas *exhaust* pada saluran *ventilation shaft*.
4. Desain koridor apartemen dapat dibuat lebih lebar atau penataan lain yang sedemikian rupa agar dapat mengakomodasi area yang dibutuhkan oleh *ventilation shaft* tanpa harus mengganggu fungsi dari koridor. Jarak antar lantai juga perlu diatur sedemikian rupa agar dapat mengakomodasi saluran *shaft* yang menuju ke sisi *leeward* dari bangunan.

DAFTAR PUSTAKA

- Akmal, I. (2007), *Menata Apartemen*, Gramedia, Jakarta
- Allard, F. (1998), *Natural Ventilation Buildings: A Design Handbook*, James & James (Science Publishers) Ltd., London.
- Awbi, H. B. (2003), *Ventilation of Buildings*, Spon Press, New York.
- Aynsley, R. M., Melbourne, W., Vickery, B. J. (1977), *Architectural Aerodynamics*, Applied Science Publisher Ltd, London.
- Bajura, R. A. dan Jones, E. H. (1971) "A Model for Flow Distribution in Manifolds," *Journal of Engineering Power*, Vol. 93, hal. 7-12.
- Bajura, R. A. dan Jones, E. H. (1976) "Flow Distribution Manifolds", *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 98, hal. 654-666.
- Cengel, Y. A. dan Cimbala, J. M. (2006), *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*, McGraw-Hill Education, New York.
- Chen, W. F. dan Liew, J. Y. R. (2003), *The Civil Engineering Handbook*, CRC Press, Boca Raton.
- Cheung, J. O. P. dan Liu, C. H. (2011), "CFD Simulations of Natural Ventilation Behaviour in High-Rise Buildings in Regular and Staggered Arrangements at Various Spacings", *Energy and Buildings*, Vol. 43, hal. 1149-1158.
- Chiara, J. D. dan Callender, J. (1983), *Time Saver Standards for Building Types*, McGraw-Hill Book Co., Singapore.
- Chu, C. R. dan Wang, Y. W. (2010a), "The Loss Factors of Building Openings for Wind-Driven Ventilation", *Building and Environment*, Vol. 45, hal. 2273-2279.
- Chu, C. R., Chiu, Y. H., Wang, Y. W. (2010b), "An experimental study of wind-driven cross ventilation in partitioned buildings", *Energy and Buildings*, Vol. 42, hal 667-673.
- Elshaer, A., Aboshosha, H., Bitsuamlak, G., Damatty, A. E. (2016), "LES Evaluation of Wind-Induced Responses for An Isolated and A Surrounded Tall Building", *Engineering Structures*, Vol. 115, hal. 179-195.
- Franke, J., Hirsch, C., Jensen, A.G., Krus, H.W., Schatzmann, M., Westbury, P.S., Miles, S.D., Wisse, J.A., Wright, N.G., (2004), "Recommendations on the use of CFD in wind engineering. In: van Beeck, J.P.A.J. (Ed.), COST Action C14, Impact of Wind and Storm on City Life Built Environment", *Proceedings of the International Conference on Urban Wind Engineering and Building Aerodynamics*, Von Karman Institute, hal. C1.1-C1.11.
- Gao, C.F. dan Lee, W.L. (2010), "Evaluating The Influence of Openings Configuration on Natural Ventilation Performance of Residential Units In Hong Kong", *Building and Environment*, Vol. 46, hal. 961-969.
- Godish, T., Davis, W. T., Fu, J. S. (2015), *Air Quality*, CRC Press, Boca Raton.
- Groat, L., Wang, D. (2002), *Architectural Research Methods*, John Wiley & Sons, Inc, New York.
- Koenigsberger, O. H., Ingersoll, T. G., Mayhew, A., Szokolay, S. V. (1975), *Manual of Tropical Housing and Building Part 1: Climatic Design*. Longman Group Ltd, London.
- McKetta, J. (1992), *Piping Design Handbook*, Marcel Dekker Inc., New York.

- Mohamed, M. F., King, S., Behnia, M., Prasad, D. (2014), “The Effects of Balconies on The Natural Ventilation Performance of Cross Ventilated High Rise Building”, *Journal of Green Building*, Vol. 9, No.2, hal. 145-160.
- Moore, F. (1993). *Environmental Control Systems*. McGraw Hill Inc, New York.
- Mulley, R. (2004), *Flow of Industrial Fluids: Theory and Equations*, CRC Press, Boca Raton.
- Mumovic, D. dan Santamouris, M. (2009), *A Handbook of Sustainable Building Design & Engineering: An Integrated Approach to Energy, Health and Operational Performance*, Earthscan, New York.
- Prajongsan, P., Sharples, S. (2011), “Enhancing Natural Ventilation, Thermal Comfort and Energy Savings In High-Rise Residential Buildings In Bangkok Through The Use of Ventilation Shafts”. *Building and Environment*, 50, hal. 104-113.
- Revuz, J., Hargreaves, D., Owen, J. (2012), “Domain Size for Computational Fluid Dynamics Modelling of Tall Buildings”, *Wind and Structures*, Vol. 15, No. 4, hal. 313-329.
- Shaughnessy, E. J., Katz, I. M., Schaffer, J. P. (2005), *Introduction to Fluid Mechanics*, Oxford University Press, New York.
- Szokolay, S. V. (2004), *Introduction to Architectural Science: The Basis of Sustainable Design*, Architectural Press, Burlington.
- Wang, J. (2011), “Theory of Flow Distribution in Manifolds”, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 168, hal. 1331-1345.
- Yang, A., Yen, C., Juan, Y., Su, Y., Wu, J. (2014), “Using The Central Ventilation Shaft Design Within Public Buildings For Natural Aeration Enhancement”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 70, hal. 219-230.
- Zhou, C., Wang, Z., Chen, Q., Jiang, Y., Pei, J. (2014), “Design Optimization and Field Demonstration of Natural Ventilation for High-Rise Residential Buildings”, *Energy and Buildings*, Vol. 82, hal. 457-465.

BIODATA PENULIS

Muhammad Rizal Fahmi, ST. lahir di Surabaya tanggal 6 Juni 1991. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SDN klampis Ngasem II, SMPN 19 Surabaya, SMAN 16 Surabaya, dan S1 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, jurusan Arsitektur. Kemudian penulis melanjutkan studinya di Program Pascasarja bidang Arsitektur Lingkungan, jurusan Arsitektur Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (2014). Penulis telah menyelesaikan tesisnya yang berjudul Pengaruh Ventilation Shaft Terhadap Aliran Udara di Dalam Bangunan Apartemen di Surabaya, pada tahun 2017. Untuk pengembangan dan kemajuan ilmu pengetahuan terkait desain penghawaan alami di bangunan apartemen, penulis dengan senang hati menerima kritikan, saran dan diskusi terkait tesis ini. Penulis dapat dihubungi ke alamat email rizalfmst@gmail.com.