



UNIVERSITAS INDONESIA

**KARAKTERISTIK PENDINGINAN PADA *HEAT SINK*  
MENGUNAKAN *SYNTHETIC JET* DENGAN FUNGSI  
GELOMBANG *TRIANGLE***

**SKRIPSI**

**EDWARD  
0706266973**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
DEPOK  
JUNI 2011**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**KARAKTERISTIK PENDINGINAN PADA *HEAT SINK*  
MENGUNAKAN *SYNTHETIC JET* DENGAN FUNGSI  
GELOMBANG *TRIANGLE***

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**EDWARD  
0706266973**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
DEPOK  
JUNI 2011**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi/Tesis/Disertasi ini adalah hasil karya saya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Edward

NPM : 0706266973

Tanda Tangan : 

Tanggal : 28 Juni 2011

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Edward  
NPM : 0706266973  
Program Studi : Teknik Mesin  
Judul Skripsi : Karakteristik Pendinginan pada *Heat Sink*  
menggunakan *Synthetic Jet* dengan Fungsi  
Gelombang *Triangle*

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Harinaldi, M.Eng. (.....)  
Penguji : Prof. Dr. Ir. Budiarmo, M.Eng. (.....)  
Penguji : Dr. Ir. Warjito, M.Eng. (.....)  
Penguji : Ardiyansyah, ST. M.Eng. (.....)

Ditetapkan di : Depok (Universitas Indonesia)  
Tanggal : 28 Juni 2011

## UCAPAN TERIMA KASIH

Puji dan syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yesus Kristus, karena atas segala berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Mesin pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya sangat menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu saya mengucapkan terima kasih kepada :

1. Dr. Ir. Harinaldi, M.Eng., selaku dosen pembimbing karena telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran serta membimbing saya untuk menyelesaikan skripsi ini.
2. Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan doa dan dukungannya baik materiil dan moral kepada saya untuk memberikan yang terbaik.
3. Damora Rhakasywi, ST. M.Eng. dan Rikko Defriadi ST. yang telah memberikan banyak ilmu dan pengalaman serta bimbingan dalam tim riset.
4. Kenfery sebagai sahabat dan rekan satu tim yang selalu bersemangat dan selalu menopang untuk mengerjakan skripsi ini.
5. Teman – teman lab mekanika fluida, khususnya Andre Grivanzy dan I Gusti Made Fredy Lay, yang telah banyak memberikan bantuan dan saran serta motivasi dalam mengerjakan skripsi.
6. Seluruh teman – teman teknik mesin 2007 dan seluruh pihak yang telah berkontribusi membantu dan mendukung penyelesaian skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yesus Kristus berkenan untuk membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini dapat membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Depok, 28 Juni 2011

Penulis

## HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Edward  
NPM : 0706266973  
Program Studi : Teknik Mesin  
Departemen : Teknik Mesin  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

### **KARAKTERISTIK PENDINGINAN PADA *HEAT SINK* MENGUNAKAN *SYNTHETIC JET* DENGAN FUNGSI GELOMBANG *TRIANGLE***

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok (Universitas Indonesia)

Pada tanggal : 28 Juni 2011

Yang menyatakan



(Edward)

## ABSTRAK

Nama : Edward  
Program Studi : Teknik Mesin  
Judul : **Karakteristik Pendinginan pada *Heat Sink* menggunakan *Synthetic Jet* dengan Fungsi Gelombang *Triangle***

Kebutuhan akan sistem pendinginan pada masa kini sangat penting terkait meningkatnya beban panas akibat miniaturisasi produk alat – alat elektronik. Sistem pendinginan konvensional berbasis *fan* telah mencapai batas efisiensinya dan dibutuhkan teknik pendinginan baru. *Synthetic jet* merupakan sistem pendinginan baru berdasar *input massa netto nol* tetapi momentum tidak nol. Dalam penelitian ini sebuah *impinging synthetic jet* digetarkan dengan fungsi gelombang *triangle*. Penelitian dilakukan dalam dua tahapan yaitu komputasional dan eksperimental. Tahapan komputasional bertujuan untuk melihat distribusi aliran panas *synthetic jet*. Tahapan eksperimental bertujuan untuk mendapatkan karakterisasi *synthetic jet*.

Pada tahap komputasional penelitian ini menggunakan *software CFD Fluent* dengan model turbulensi *k- $\omega$  SST* dengan elemen *meshing Tet/Hybrid* tipe *Tgrid*, sedangkan pada tahap eksperimental menggunakan *function generator* untuk menggerakkan membran dengan tiga frekuensi osilasi yaitu 80 hz, 120 hz, dan 160 hz pada amplitudo tetap 1 m/s. Hasil eksperimen menunjukkan adanya pengaruh gelombang dan frekuensi osilasi yang signifikan terhadap laju perpindahan panas yang terjadi. Laju perpindahan panas/pendinginan terbaik terjadi pada frekuensi osilasi yang lebih rendah; dalam penelitian ini pada frekuensi 80 hz.

**Kata Kunci :**

***CFD Fluent, Function Generator, Gelombang Triangle, Impinging Synthetic Jet, Laju perpindahan panas, Meshing, Model turbulensi k- $\omega$  SST, Synthetic jet***

## ABSTRACT

Name : Edward  
Study Program : Mechanical Engineering  
Title : **Cooling Characteristics on Heat Sink with Synthetic Jet using *Triangle* Wave Function**

The need for cooling in the present system becomes very important as the consequence of the increased heat load due to product miniaturization of electronics devices. Conventional fan-based cooling system has reached the limit of its efficiency and needed a new cooling technique. Synthetic jet is a new cooling system based on zero netto mass input but non zero momentum. In this study an impinging synthetic jet was vibrated with a *triangle* function. The study was conducted in two stages, computational and experimental. Computational stage aims to look at the distribution of heat flow of synthetic jet. Experimental stage intended to obtain characterization of synthetic jet.

In the computational stage the research using CFD Fluent software with a turbulence model k-w SST with meshing elements Tet/Hybrid type TGrid, while in the experimental stage it used the function generator to drive the membrane with three oscillation frequency: 80 hz, 120 hz, and 160 hz at fixed amplitude of 1 m/s. The experimental results show significant effect of wave and oscillation frequency on the heat transfer rate that occurred. The best heat transfer rate / cooling effect occurs at a lower oscillation frequency; in this study at a frequency of 80 hz.

**Key words :**

***CFD Fluent, Function Generator, Triangle Wave, Impinging Synthetic Jet, Heat Transfer Rate, Meshing, Turbulence Model k-w SST, Synthetic jet***



## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
UCAPAN TERIMA KASIH.....	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	v
ABSTRAK.....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR NOTASI.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
<b>BAB 1. PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Pembahasan Masalah.....	2
1.3 Metodologi.....	2
1.4 Tujuan Penelitian.....	2
1.5 Sistematika Penulisan.....	3
<b>BAB 2. DASAR TEORI.....</b>	<b>4</b>
2.1 <i>Synthetic Jet</i> .....	4
2.2 Gelombang.....	7
2.3 Perpindahan Kalor.....	12
2.3.1 Perpindahan Kalor Konduksi.....	13
2.3.2 Perpindahan Kalor Konveksi.....	13
2.3.3 Perpindahan Kalor Radiasi.....	14
2.4 Aliran Fluida.....	15
2.4.1 Aliran Laminar.....	15
2.4.2 Aliran Transisi.....	15
2.4.3 Aliran Turbulen.....	15
2.5 <i>CFD Fluent</i> .....	16
2.5.1 Gambit.....	17
2.5.2 Fluent.....	17
<b>BAB 3. SISTEM PENDINGIN DENGAN <i>SYNTHETIC JET</i>.....</b>	<b>20</b>
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	20
3.2 Modul <i>Synthetic Jet</i> .....	21
3.3 Tahap Komputasional.....	22
3.4 Tahap Eksperimen.....	23
3.4.1 Komponen – Komponen Eksperimen.....	24
3.4.2 Komponen dan Peralatan Tambahan.....	28
3.4.3 Prosedur Pengambilan Data.....	29

<b>BAB 4. ANALISIS DATA .....</b>	<b>30</b>
4.1 Analisis Komputasional.....	30
4.1.1 Analisis Kontur Kecepatan Sesaat.....	30
4.1.2 Analisis Kontur Vortisitas Sesaat.....	33
4.1.3 Analisis Kontur Temperatur Sesaat.....	36
4.1.4 Kontur <i>Suction</i> dan <i>Discharge</i> .....	39
4.2 Analisis Eksperimental.....	43
4.2.1 Analisis Perubahan Temperatur terhadap Waktu.....	43
4.2.2 Analisis Koefisien Perpindahan Kalor Konveksi terhadap Waktu.....	45
4.3 Tingkat Kepercayaan ( <i>Level of Confidence</i> ) dan Persentase Error Pengukuran Penelitian.....	47
<b>BAB 5. PENUTUP .....</b>	<b>49</b>
5.1 Kesimpulan.....	49
5.2 Saran.....	50
<b>DAFTAR REFERENSI .....</b>	<b>51</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Sketsa dari <i>synthetic jet</i> yang terbentuk karena adanya pergerakan diafragma dalam <i>cavity</i> .....	4
Gambar 2.2	Model <i>Impinging Jet</i> .....	6
Gambar 2.3	Model <i>Cross-Flow Jet</i> .....	6
Gambar 2.4	Gelombang yang merambat pada sebuah tali .....	8
Gambar 2.5	Gelombang Transversal .....	9
Gambar 2.6	Gelombang Longitudinal .....	9
Gambar 2.7	Gelombang satu dimensi yang berjalan ke arah kanan dengan kecepatan $v$ pada $t = 0$ .....	10
Gambar 2.8	Gelombang satu dimensi yang berjalan ke arah kanan dengan kecepatan $v$ setelah berjalan selama $t$ detik .....	11
Gambar 2.9	Gelombang sinusoidal yang berjalan ke arah kanan dengan kecepatan $v$ .....	11
Gambar 2.10	Skematik perpindahan kalor konveksi .....	14
Gambar 2.11	Aliran Laminar dan Turbulen .....	16
Gambar 2.12	Skematik proses kerja <i>step by step</i> Gambit – <i>CFD</i> .....	17
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian .....	19
Gambar 3.2	Model fisik <i>synthetic jet</i> .....	20
Gambar 3.3	Gambaran daerah komputasi <i>synthetic jet</i> .....	21
Gambar 3.4	<i>Experimental setup</i> .....	23
Gambar 3.5	<i>Synthetic jet</i> modul tampak sisi atas dan bawah .....	23
Gambar 3.6	<i>Heatsink</i> .....	24
Gambar 3.7	<i>Heater mat</i> .....	24
Gambar 3.8	<i>Thermostat</i> .....	25

Gambar 3.9	<i>Digital Multimeter</i> .....	25
Gambar 3.10	<i>Function Generator</i> .....	26
Gambar 3.11	Komputer.....	26
Gambar 3.12	<i>Thermocouple</i> .....	27
Gambar 3.13	<i>Glue Gun</i> .....	27
Gambar 3.14	<i>Hygrometer</i> .....	28
Gambar 4.1	Kontur kecepatan sesaat <i>synthetic jet</i> gelombang <i>triangle</i> pada frekuensi 80 hz, 120 hz, dan 160 hz.....	32
Gambar 4.2	Kontur vortisitas sesaat <i>synthetic jet</i> gelombang <i>triangle</i> pada frekuensi 80 hz, 120 hz, dan 160 hz.....	35
Gambar 4.3	Kontur temperatur sesaat <i>synthetic jet</i> gelombang <i>triangle</i> pada frekuensi 80 hz, 120 hz, dan 160 hz.....	38
Gambar 4.4	Skema Bentuk Gelombang.....	39
Gambar 4.5	Kontur Vortisitas pada fase <i>Suction</i> dan <i>Discharge</i> dari 1/4 sampai 4/4.....	40
Gambar 4.6	Kontur Kecepatan pada fase <i>Suction</i> dan <i>Discharge</i> dari 1/4 sampai 4/4.....	41
Gambar 4.7	Kontur Temperatur pada fase <i>Suction</i> dan <i>Discharge</i> dari 1/4 sampai 4/4.....	42
Gambar 4.8	Grafik temperatur pendinginan <i>synthetic jet</i> terhadap waktu.....	45
Gambar 4.9	Grafik koefisien perpindahan kalor <i>synthetic jet</i> terhadap waktu.....	47

## DAFTAR TABEL

Tabel Kondisi Komputasi .....	22
-------------------------------	----



## DAFTAR NOTASI

f	frekuensi (hz)
k	konduktivitas, kehantaran termal benda (W/m.K)
q	laju perpindahan kalor (W)
s	jarak tempuh (m)
t	waktu (s)
v	kecepatan partikel (m/s)
A	amplitudo gelombang (m); luasan penampang (m <sup>2</sup> )
D	diameter pipa (m)
Re	bilangan Reynolds
T	periode (s)
T <sub>w</sub>	temperatur dinding (°C)
T <sub>∞</sub>	temperatur <i>freestream</i> (°C)
V	kecepatan rambat gelombang; kecepatan rata – rata fluida yang mengalir (m/s)
V <sub>o</sub>	kecepatan awal gelombang (m/s)
k	koefisien angular gelombang (m <sup>-1</sup> )
λ	panjang gelombang (m)
μ	viskositas dinamik fluida (kg/m.s)
ω	frekuensi angular (s <sup>-1</sup> )
π	pi, bilangan tak berdimensi
ρ	massa jenis fluida (kg/m <sup>3</sup> )
Σ	sigma
θ	sudut antara sumbu simetri dengan arah gerak (°)
σ	konstanta proporsionalitas / Stefan – Boltzmann (5,669 x 10 <sup>-8</sup> W/m <sup>2</sup> .K <sup>4</sup> )
φ	beda fasa
∂T	gradien temperatur

## DAFTAR LAMPIRAN

- L1 Data Temperatur *Synthetic Jet* Gelombang *Triangle* pada Frekuensi 80 hz, 120 hz, dan 160 hz
- L2 Data *Heat Transfer Coefficient Synthetic Jet* Gelombang *Triangle* pada Frekuensi 80 hz, 120 hz, dan 160 hz



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Pada zaman modern ini, perkembangan teknologi mengalami kemajuan yang semakin pesat, khususnya dalam industri elektronik. Seiring waktu, perkembangan dalam industri elektronik menuntut efisiensi bentuk dan kinerja produk yang semakin tinggi. Berbagai peralatan elektronik seperti *laptop*, *netbook*, PC, *handphone*, dan lain-lainnya berkembang semakin canggih. Tentu, kecanggihan teknologi yang terus berkembang harus didukung oleh perangkat *hardware* di dalamnya. Pemasok daya yang ada seperti baterai masih berkapasitas terbatas. Seiring dengan tantangan efisiensi energi, maka diperlukan suatu sistem baru yang mampu menunjang hal tersebut. Salah satu yang dikembangkan adalah dalam hal sistem pendinginan elektronik (*cooling devices*).

Sistem pendinginan elektronik konvensional dengan konveksi paksa yaitu dengan menggunakan fan semakin tidak memadai. Hal tersebut menyebabkan dicarinya suatu sistem baru yang mampu menghasilkan efek pendinginan yang lebih baik dan efektif dengan efisiensi daya yang lebih baik daripada fan. Sistem pendinginan baru yang cukup menjanjikan adalah sistem pendinginan berbasis efek aliran jet, atau disebut dengan *synthetic jet*.

*Synthetic jet* merupakan suatu bentuk aliran fluida yang terbentuk karena adanya gerakan dari membran piezoelektrik. Dasar kerja dari *synthetic jet* adalah injeksi massa netto nol dari fluida yang ada di sekitarnya. Suatu bentuk *cavity* yang berisi membran menggerakkan udara di dalamnya, di mana fluida udara keluar melalui *cavity* dalam bentuk rangkaian *vortex* yang akan menghasilkan efek pendinginan pada media yang dituju.



## 1.2 Pembatasan Masalah

Laporan ini akan membahas mengenai karakteristik pendinginan pada suatu *heat sink* dengan menggunakan *synthetic jet* yang telah didesain bentuk *cavity*-nya. Membran pada *synthetic jet* dikontrol dengan menggunakan *function generator*. Variabel kontrol dengan *function generator* adalah frekuensi osilasi gelombang, yaitu 80 hz, 120 hz, dan 160hz. Amplitudo dijaga tetap pada 1 m/s. Pada laporan ini memakai jenis gelombang *triangle* untuk menggerakkan membrannya pada temperature ambient +/-28 – 30°C. Hasil yang didapat berupa simulasi aliran, data perubahan panas heat sink dari waktu ke waktu, serta analisis koefisien perpindahan panas terhadap waktu.

## 1.3 Metodologi

Pengerjaan dan pengumpulan data dalam laporan ini menggunakan berbagai sumber antara lain:

### 1. Studi Literatur

Referensi data yang digunakan diambil dari berbagai sumber buku, jurnal, dan internet. Data yang diambil berkaitan dengan dasar teori gelombang, perpindahan kalor dan *synthetic jet*.

### 2. Software CFD Fluent

Software ini dipakai untuk mensimulasikan aliran yang terjadi pada *synthetic jet*.

### 3. Software Autodesk Inventor

Software ini dipakai untuk merancang bentuk *cavity* dari *synthetic jet* yang dibuat.

## 1.4 Tujuan Penelitian

Secara umum penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan suatu sistem pendinginan berbasis *synthetic jet* untuk diaplikasikan pada komponen mikroelektronik. Diharapkan *synthetic jet* yang dibuat memiliki efisiensi termal yang tinggi. *Synthetic jet* diuji dengan menggunakan suatu gelombang yaitu *triangle wave*. *Synthetic jet* dengan gelombang *triangle* tersebut divariasikan pada frekuensi osilasi 80 hz, 120 hz, dan 160 hz dengan

amplitudo tetap. Pengaruh dari jenis gelombang dan frekuensi osilasi akan dikaji. Karakterisasi dari sintetik jet didapatkan dengan melihat koefisien perpindahan panas dari waktu ke waktu.

### **1.5 Sistematika Penulisan**

**Bab I** berisi mengenai bab pendahuluan yang berisi latar belakang penulisan skripsi, pembatasan masalah dan metodologi penulisan skripsi.

**Bab II** berisi mengenai bab dasar teori yang menjelaskan mengenai berbagai teori yang berkaitan dengan *synthetic jet* dan berbagai teori lain yang diperlukan yang mendukung penelitian.

**Bab III** berisi mengenai berbagai komponen elektronik yang dipergunakan dalam penelitian serta cara-cara set-up eksperimen.

**Bab IV** berisi mengenai pengolahan data dan analisis pada sistem pendinginan berbasis *synthetic jet* dengan gelombang *triangle*.

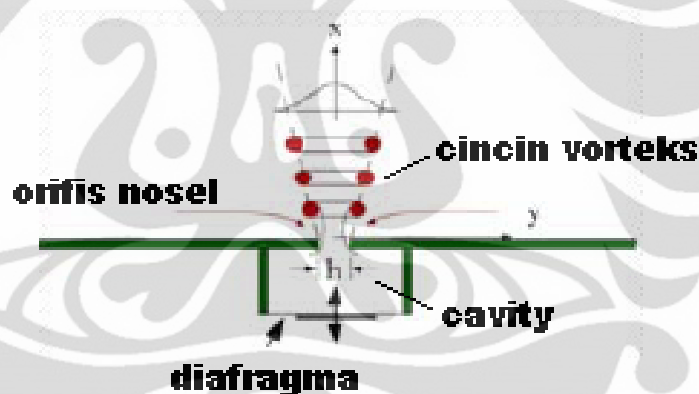
**Bab V** berisi mengenai kesimpulan dan saran yang diberikan atas hasil penelitian yang telah dilakukan.

## BAB 2

### DASAR TEORI

#### 2.1 *Synthetic Jet*

*Synthetic jet* merupakan suatu bentuk aliran fluida berupa serangkaian cincin *vortex* yang terbentuk karena adanya pergerakan periodik dari membran dalam suatu *cavity*. *Synthetic jet* ini digerakkan oleh sebuah aktuator berupa membran piezoelektrik yang memiliki *input massa netto* nol tetapi menghasilkan *output momentum netto* tidak nol. Secara visual *synthetic jet* dapat digambarkan seperti pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Sketsa dari *synthetic jet* yang terbentuk karena adanya pergerakan diafragma dalam *cavity*  
(Sumber: Lasance & Aarts, 2008)

Proses terbentuknya *synthetic jet* telah ditunjukkan dalam beberapa hasil kerja yang diantaranya telah dilakukan oleh Jagannatha dkk. (2007) dan Zhang & Tan (2007). Secara garis besar *synthetic jet* terbentuk sebagai berikut. Di dalam *cavity* terdapat suatu diafragma atau membran. Membran tersebut akan digerakkan secara periodik dan membentuk getaran sehingga udara di dalam *cavity* ikut bergerak. Fluida udara di dalam *cavity* dipaksa bergerak melewati dua fase yaitu fase hisap (*suction*) dan fase semburan (*ejection*). Kedua fase ini terbentuk karena adanya lubang orifis pada sisi *cavity*. Pada sisi keluar

orifis terjadi separasi aliran dari fluida udara karena adanya kedua fase tersebut dan membentuk pasangan cincin *vortex*. Pasangan cincin *vortex* ini terbentuk karena separasi aliran akibat amplitudo getaran membran yang cukup besar sehingga membentuk lapisan geser (*shear layer*) antara fluida keluar orifis dengan fluida udara sekitar. Lapisan geser dan turbulensi pada sisi luar mengakibatkan terbentuknya pasangan cincin *vortex*. Cincin-cincin *vortex* ini dipergunakan untuk menghasilkan efek perpindahan panas konvektif kontrol aliran termal yang lebih baik terhadap suatu *heat sink*.

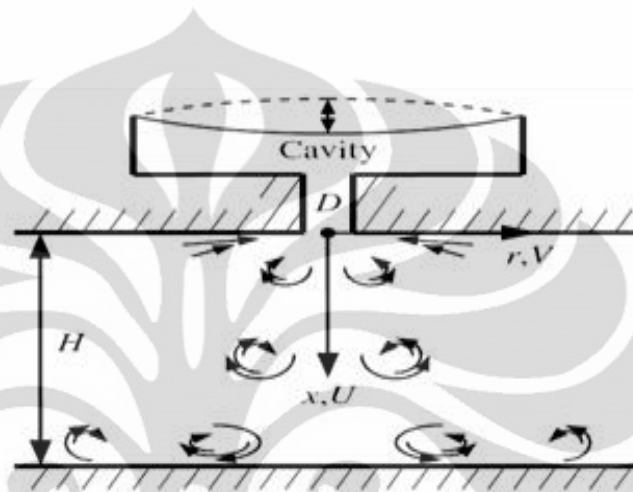
*Synthetic jet* terus dikembangkan karena memiliki keuntungan dibanding sistem pendinginan konvensional seperti fan. Pada sistem fan kebutuhan suplai udara dipenuhi dengan mengalirkan fluida udara dari satu tempat ke tempat lainnya. Sistem *synthetic jet* menawarkan keuntungan utama yaitu hanya menggunakan udara yang sama yang terus diputar oleh sistemnya (Sharma, 2007). Selain itu mengacu pada besarnya panas yang dibuang terhadap besarnya volume aliran maka fan dinilai kurang efisien (Mahalingam dkk, 2006). Keuntungan lain dari sistem pendinginan menggunakan *synthetic jet* dibanding fan untuk performa *heat transfer* yang sama, antara lain (Lasance & Aarts, 2008):

- Tingkat kebisingan yang jauh lebih rendah
- Efisiensi (termodinamik) yang lebih baik, kebutuhan daya hanya setengahnya atau kurang
- Memiliki *form factor* yang jauh lebih baik sehingga bersifat “*design-friendly*”
- *Reliability* (tahan uji) intrinsik yang lebih tinggi
- Problem *fouling* yang lebih rendah, komponen bergerak dapat dilindungi dari ambient
- Miniaturisasi produk lebih mudah dibanding fan
- Memiliki kemungkinan peredaman kebisingan yang lebih simple

Akan tetapi pada sistem *synthetic jet* terutama *impinging* memiliki kelemahan utama pada fluida udara yang dihisap kembali pada fase *suction*. Jika udara yang dibuang pada fase pembuangan kalor terdapat udara panas dan dihisap ke

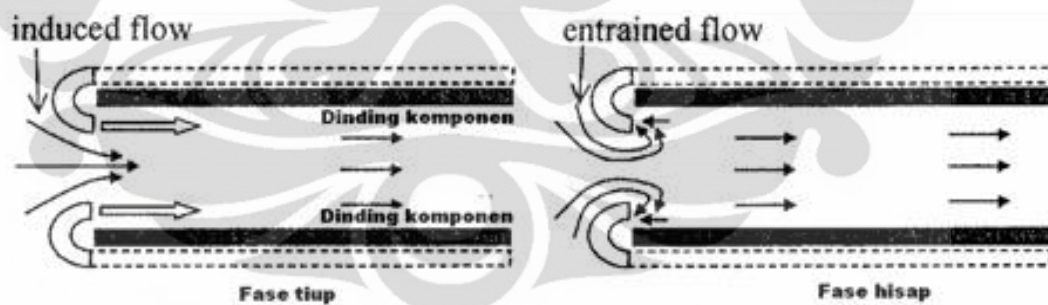
dalam *cavity* maka akan timbul akumulasi panas dalam *cavity synthetic jet* (Tesar, 2005).

*Synthetic jet* terbagi atas dua macam model uji yaitu model *impinging jet* dan *cross-flow jet*. Kedua model tersebut digambarkan seperti pada gambar 2.2 dan 2.3.



Gambar 2.2 Model *Impinging Jet*

(Sumber: Persoons, O'Donovan & B.Murray, 2008)



Gambar 2.3 Model *Cross-Flow Jet*

(Sumber: Raghav Mahalingam, 2007)

Model *impinging* dan *cross-flow jet* memiliki perbedaan pada bagian bidang sumber panas yang dituju. *Impinging jet* mengarahkan *vortex* untuk membentur dinding kemudian *vortex* berjalan sepanjang dinding sementara *cross-flow jet* mengarahkan *vortex* yang keluar dari sisi orifis langsung melewati dinding komponen dan bergerak sejajar dinding. Terdapat tiga variabel utama yang mempengaruhi perpindahan kalor pada *synthetic jet*

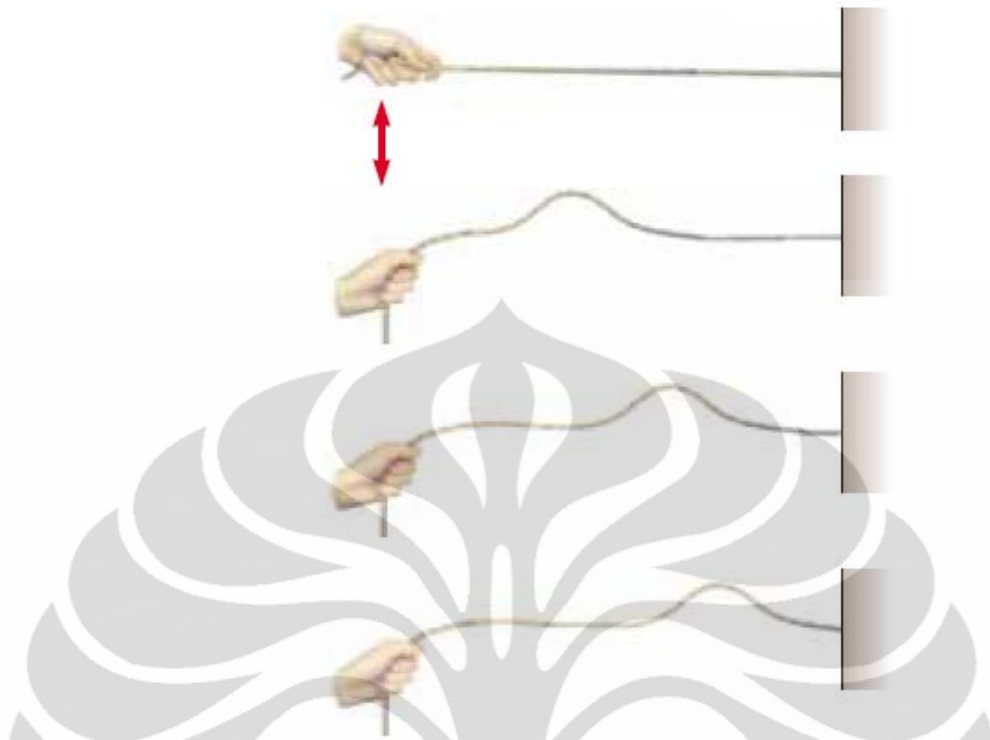
*impinging* yaitu frekuensi eksitasi, panjang langkah dan ketinggian orifis terhadap permukaan (Mc Guinn dkk, 2008).

Pengetahuan mengenai *synthetic jet* sebenarnya masih sangat terbatas. Penelitian mengenai *synthetic jet* seperti perbandingan bilangan Nusselt pada *synthetic jet* dengan menggunakan gelombang sinusoidal dan non-sinusoidal untuk melihat koefisien *heat transfer* gelombang menunjukkan hasil 5 – 10% lebih baik untuk gelombang non-sinusoidal (King & Jagannatha, 2009). King dan Jagannatha telah menunjukkan bahwa penelitian mengenai *synthetic jet* menggunakan gelombang non-sinusoidal masih sangat kurang padahal penggunaan gelombang non-sinusoidal untuk *synthetic jet* menunjukkan koefisien *heat transfer* yang menjanjikan. Dari sebab itu penggunaan gelombang lain yang umum seperti *triangle* dan *square* perlu dilakukan.

Pada awalnya *synthetic jet* digunakan dalam bidang aerodinamika untuk memodifikasi lapisan batas agar dapat mengurangi *drag* atau gaya hambat. Kemudian *synthetic jet* ini dipakai dalam bidang perpindahan kalor untuk kontrol aliran termal konvektif. Oleh karena itu penerapan *synthetic jet* masih relatif baru.

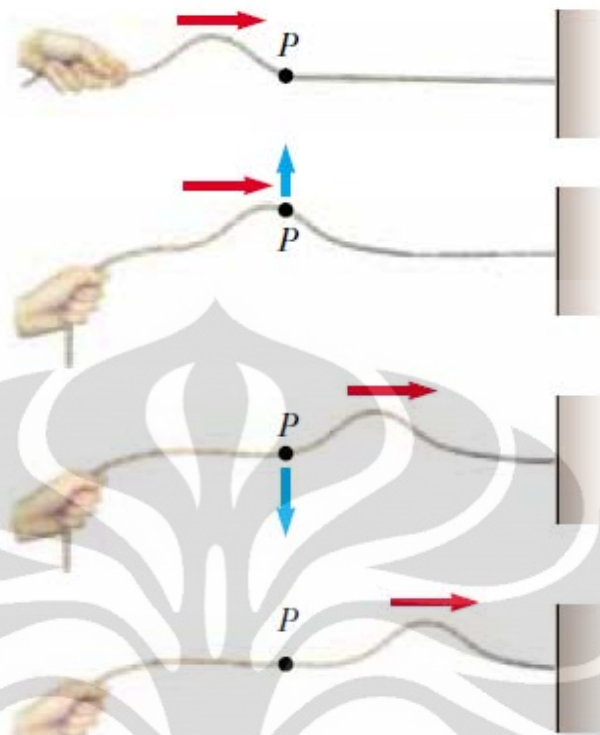
## 2.2 Gelombang

Gelombang adalah bentuk perubahan energi dan momentum pada satu titik ke titik lain. Bila kita ambil contoh, bila tali kita goyang naik – turun pada satu ujung sementara ujung lain diikatkan pada dinding, maka energi dan momentum yang diberikan akan menjalar melalui tali tersebut (seperti diperlihatkan pada gambar 2.4).



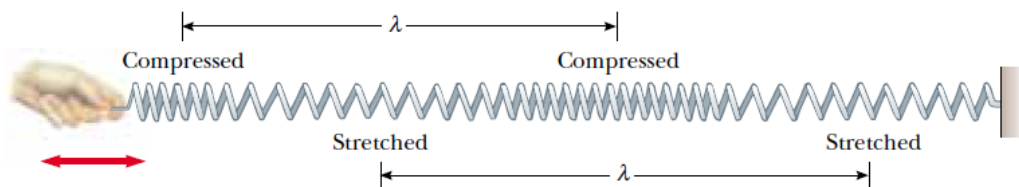
Gambar 2.4 Gelombang yang merambat pada sebuah tali  
(Sumber: Fundamental of Physics-Haliday Resnick,2000)

Gelombang digolongkan menjadi dua macam, yaitu: 1) berdasar arah rambat gelombang, dan 2) berdasar medium perambatan. Berdasar arah rambat gelombang, gelombang digolongkan menjadi dua yaitu: gelombang transversal dan longitudinal. Gelombang transversal adalah gelombang yang gerak partikelnya bergerak tegak lurus terhadap arah rambatannya (digambarkan pada gambar 2.5). Contoh dari gelombang transversal adalah gelombang cahaya dan gelombang pada tali.



Gambar 2.5 Gelombang Transversal  
(Sumber: Fundamental of Physics-Haliday Resnick,2000)

Berlawanan dengan gelombang transversal, gelombang longitudinal adalah gelombang yang arah gerak partikelnya sejajar dengan arah rambatannya (seperti digambarkan pada gambar 2.6). Contoh dari gelombang longitudinal adalah gelombang bunyi di udara.



Gambar 2.6 Gelombang Longitudinal  
(Sumber: Fundamental of Physics-Haliday Resnick,2000)

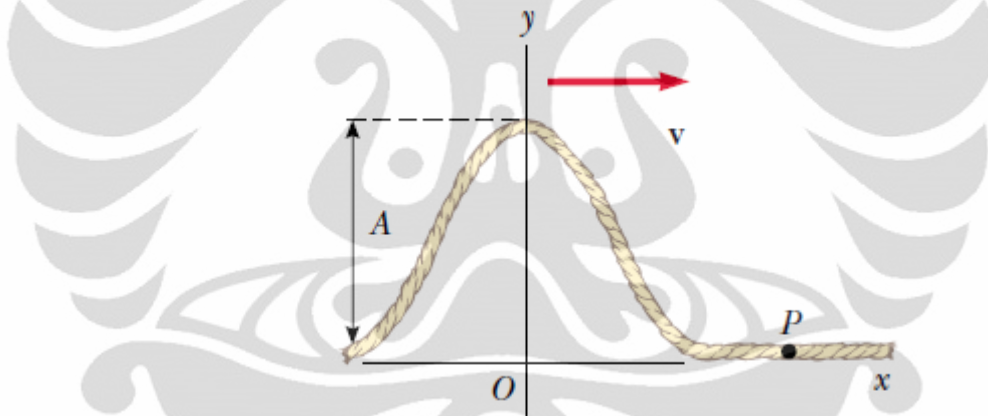
Gelombang juga digolongkan berdasarkan medium rambatannya. Gelombang berdasarkan penggolongan medium rambatannya terbagi dua



yaitu: gelombang mekanik dan gelombang elektromagnetik. Gelombang mekanik adalah suatu jenis gelombang yang energi dan momentumnya dipindahkan melalui suatu medium. Contohnya adalah gelombang pada tali dan gelombang bunyi di udara. Gelombang elektromagnetik adalah suatu jenis gelombang yang energi dan momentumnya dibawa oleh medan listrik dan magnet yang menjalar dalam ruang hampa. Contohnya adalah gelombang cahaya, gelombang radio dan sinar-X.

Bila sebuah tali panjang yang diregangkan ditinjau pada sumbu-x dan sebuah gelombang transversal digerakkan sepanjang tali (gambar 2.7), maka pada saat  $t = 0$ , bentuk persamaan pada tali dapat dinyatakan dengan:

$$y = f(x) \quad (2.1)$$



Gambar 2.7 Gelombang satu dimensi yang berjalan ke arah kanan dengan kecepatan  $v$  pada  $t = 0$

(Sumber: Fundamental of Physics-Haliday Resnick, 2000)

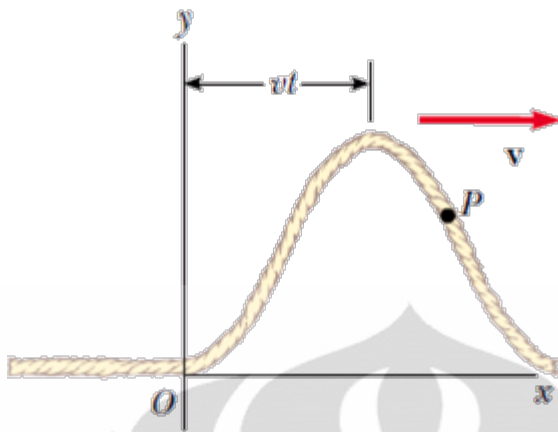
Setelah gelombang bergerak setelah  $t$  detik dengan jarak  $s = v.t$  (gambar 2.8), maka persamaan pada tali dapat dinyatakan:

- pada saat gelombang berjalan mengarah ke kanan,

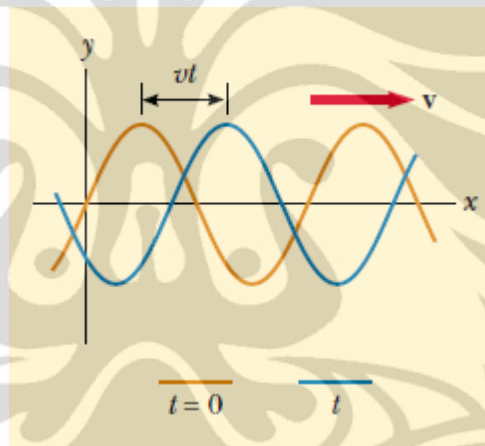
$$y = f(x - vt) \quad (2.2)$$

- pada saat gelombang berjalan mengarah ke kiri,

$$y = f(x + vt) \quad (2.3)$$



Gambar 2.8 Gelombang satu dimensi yang berjalan ke arah kanan dengan kecepatan  $v$  setelah berjalan selama  $t$  detik  
(Sumber: Fundamental of Physics-Haliday Resnick,2000)



Gambar 2.9 Gelombang sinusoidal yang berjalan ke arah kanan dengan kecepatan  $v$   
(Sumber: Fundamental of Physics-Haliday Resnick,2000)

Bentuk gelombang ada berbagai macam antara lain gelombang sinusoidal dan gelombang *triangle*. Gelombang sinusoidal adalah suatu bentuk gelombang dengan bentuk kurva sama dengan kurva fungsi  $\sin \theta$  terhadap  $\theta$ . Pada gambar 2.9, kurva merah menunjukkan sebuah gelombang sinusoidal bergerak pada  $t = 0$  dan kurva biru menunjukkan gelombang sinusoidal bergerak setelah  $t$  detik. Fungsi yang menggambarkan posisi partikel medium dimana gelombang sinusoidal bergerak yaitu:

$$y = A \sin \left( \frac{2\pi}{\lambda} x \right) \quad (2.4)$$

dimana  $A$  adalah amplitudo dan  $\lambda$  adalah panjang gelombang. Jika gelombang bergerak mengarah ke kanan dengan kecepatan  $v$ , maka fungsi gelombang setelah  $t$  detik adalah:

$$y = A \sin \left[ \frac{2\pi}{\lambda} (x - vt) \right] \quad (2.5)$$

dimana,

$$v = \frac{\lambda}{T} \quad (2.6)$$

maka persamaan (2.5) menjadi:

$$y = A \sin \left[ 2\pi \left( \frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right) \right] \quad (2.7)$$

Fungsi gelombang dapat pula didefinisikan dengan *angular wave number*  $k$  dan *angular frequency*  $\omega$ :

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.8)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2.9)$$

Maka,

$$y = A \sin(kx - \omega t) \quad (2.10)$$

$$y = A \sin(kx - \omega t + \phi) \quad (2.11)$$

Fungsi gelombang lain selain sinusoidal adalah *triangle*. Gelombang *triangle* juga cukup penting karena banyak diaplikasikan pula. Gelombang *triangle* dapat pula dikatakan sebagai bentuk gelombang non-sinusoidal dengan bentuk triangular. Gelombang *triangle* hanya mengandung bilangan harmonik ganjil yang cukup tinggi dibanding gelombang lain seperti gelombang *square*. Fungsi gelombang *triangle* dinyatakan dengan deret *Fourier* yaitu:

$$V = V_0 + \left\{ \frac{8}{\pi^2} \sum_{A=0,1,2,\dots}^{\infty} (-1)^A \frac{\sin \left\{ (2A+1) 2\pi ft \right\}}{(2A+1)^2} \right\} \quad (2.12)$$

### 2.3 Perpindahan Kalor

Perpindahan kalor merupakan suatu bidang ilmu untuk meramalkan perpindahan energi yang terjadi disebabkan adanya gradien suhu pada benda atau suatu material. Energi yang berpindah tersebut disebut kalor atau panas.

Secara umum terdapat tiga cara perpindahan kalor, yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi.

### 2.3.1 Perpindahan kalor konduksi

Jika suatu benda memiliki gradien temperatur maka akan terjadi perpindahan panas dari daerah bersuhu tinggi ke suhu yang lebih rendah. Perpindahan energi tersebut terjadi secara hantaran atau konduksi serta laju perpindahan kalor berbanding dengan gradien suhu normal:

$$\frac{q}{A} \sim \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.12)$$

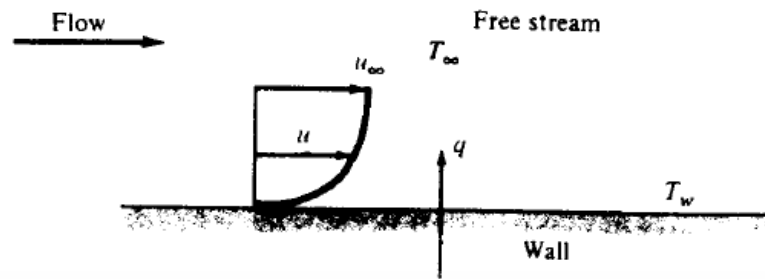
Dengan memasukkan konstanta proporsionalitas atau tetapan kesebandingan:

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.13)$$

di mana  $q$  merupakan laju perpindahan kalor dan  $\partial T/\partial x$  merupakan gradien suhu ke arah perpindahan kalor. Konstanta positif  $k$  merupakan konduktivitas atau kehantaran termal benda, sementara tanda minus merupakan pemenuhan hukum kedua termodinamika bahwa kalor mengalir ke tempat yang lebih rendah dalam skala temperatur. Persamaan di atas merupakan persamaan dasar dari konduktivitas termal dan satuan  $k$  adalah Watt per meter per derajat Celcius.

### 2.3.2 Perpindahan kalor konveksi

Perpindahan kalor konveksi terjadi pada permukaan suatu benda (tidak padat) dengan suatu fluida dikarenakan adanya pergerakan dari partikel-partikel fluida pada dua temperatur yang berbeda. Mekanisme konveksi terdiri atas adanya difusi dan gerakan fluida. Gerak fluida ditimbulkan karena adanya gradien temperatur fluida sehingga terjadi proses perpindahan kalor. Secara skematik proses perpindahan kalor konveksi dapat digambarkan seperti pada gambar 2.10.



Gambar 2.10 Skematik perpindahan kalor konveksi  
(Sumber: JP.Holman, p.11)

Gambar di atas menggambarkan interaksi antara suatu permukaan dinding dengan medan aliran fluida. Medan aliran fluida mewakili aliran fluida sepanjang permukaan panas. Interaksi antara permukaan dengan fluida menghasilkan medan kecepatan yang bervariasi, dimulai dari nol pada daerah dekat permukaan sampai dengan kecepatan maksimum pada aliran. Jika pada permukaan dengan aliran fluida ini memiliki perbedaan temperatur maka akan membentuk suatu daerah batas termal yang besarnya bervariasi (terdapat distribusi temperatur) dari  $T_w$  sampai dengan  $T_{\infty}$ . Jika besar  $T_w > T_{\infty}$  maka konveksi akan terjadi.

Perpindahan kalor konveksi secara alami dapat diklasifikasikan ke dalam dua bagian yaitu konveksi bebas dan konveksi paksa. Konveksi bebas merupakan jenis konveksi di mana fenomena perpindahan kalornya murni terjadi karena adanya perbedaan densitas yang disebabkan perubahan temperatur pada fluida. Sementara konveksi paksa merupakan suatu fenomena perpindahan kalor konveksi yang turut dipengaruhi oleh adanya gaya eksternal terhadap aliran, misalnya karena adanya pengaruh aliran paksa dari fan dan pompa.

### 2.3.3 Perpindahan kalor radiasi

Terdapat mekanisme perpindahan kalor tanpa melalui medium antara seperti pada konduksi dan konveksi yaitu melalui daerah hampa. Mekanisme perpindahan kalor ini disebut dengan radiasi. Dalam termodinamika telah ditunjukkan bahwa setiap benda hitam memiliki

pancaran energi dengan laju sebanding dengan pangkat empat suhu absolute benda tersebut dan berbanding langsung dengan luas permukaan. Persamaan radiasi dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$q_{\text{pancaran}} = \sigma AT^4 \quad (2.14)$$

di mana  $\sigma$  merupakan konstanta proporsionalitas atau konstanta Stefan – Boltzmann dengan nilai  $5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ . Persamaan tersebut berlaku hanya untuk radiasi termal saja.

## 2.4 Aliran Fluida

Aliran fluida dapat dikategorikan menjadi tiga yaitu laminar, transisi, dan turbulen.

### 2.4.1 Aliran Laminar

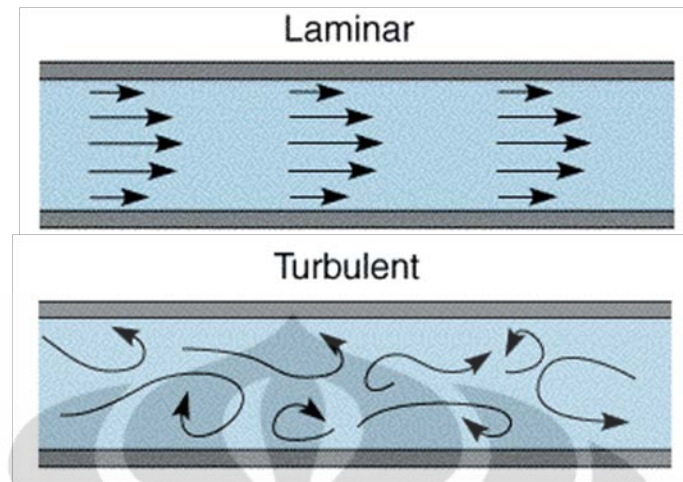
Aliran fluida disebut laminar ketika fluida yang bergerak dalam tiap lapisan mengalir dengan lancar. Viskositas yang terjadi di dalam aliran menyebabkan efek peredaman gerakan antar lapisan. Aliran laminar diperlihatkan seperti pada gambar 2.11.

### 2.4.2 Aliran Transisi

Aliran transisi merupakan aliran antara fase laminar dan turbulen. Aliran ini ditandai dengan adanya fase laminar dan turbulen yang terjadi secara bergantian.

### 2.4.3 Aliran Turbulen

Aliran turbulen ditandai dengan terjadinya gerakan acak partikel pada tiap lapisan sehingga terjadi pertukaran momentum antar lapisan dengan intensitas tinggi. Aliran turbulen diperlihatkan seperti pada gambar 2.11.



Gambar 2.11 Aliran Laminar dan Turbulen

(Sumber: <http://www.ceb.cam.ac.uk/pages/hydrodynamic-voltammetry.html>)

Untuk dapat membedakan antara jenis aliran laminar, transisi, dan turbulen maka dapat ditentukan dengan bilangan Reynolds (sesuai dengan nama penemunya). Bilangan Reynolds merupakan perbandingan antara efek inersia dan viskos dalam aliran. Bilangan Reynolds dinyatakan dengan:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (2.15)$$

di mana,

$\rho$  = massa jenis fluida ( $\text{kg/m}^3$ )

$V$  = kecepatan rata-rata dari fluida yang mengalir (m/s)

$D$  = diameter pipa (m)

$\mu$  = viskositas dinamik fluida ( $\text{kg/m.s}$ )

Dalam aplikasi untuk bidang teknik secara umum untuk aliran di dalam pipa bundar telah ditentukan bahwa jika besar bilangan Reynolds kurang dari 2100 maka aliran laminar dan jika lebih dari 4000 maka aliran turbulen. Nilai di antara keduanya merupakan aliran transisi.

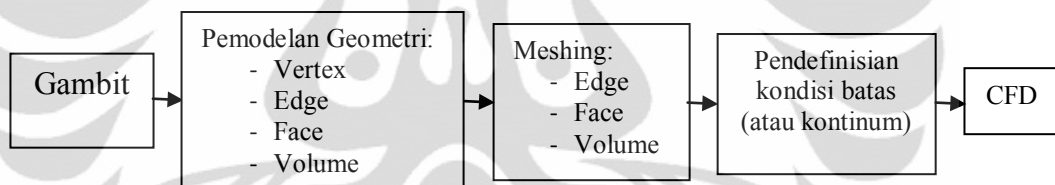
## 2.5 CFD Fluent

Banyak fenomena dalam kehidupan terkait dengan fluida baik dalam bentuk gas maupun cair. Banyak hal yang ingin dikaji terkait dengan penggunaan fluida. Oleh karena itu dibutuhkan suatu alat yang mampu

memprediksi dan menganalisis aliran fluida dengan baik. *Software CFD Fluent* dikembangkan untuk dapat memenuhi kebutuhan tersebut akan ilmu yang dinamakan *Computational Fluid Dynamics* atau CFD. Ilmu CFD dapat diartikan sebagai ilmu yang mempelajari cara memprediksi aliran fluida, perpindahan panas, reaksi kimia dan fenomena-fenomena lain dengan menyelesaikan persamaan Matematika. Prediksi aliran fluida dengan CFD berdasarkan tiga hal yaitu model Matematika (Navier-Stokes), metode numerik, dan *tools* (*Pre-* dan *postprocessing*, *Solvers*).

### 2.5.1 Gambit

Gambit (*Geometry And Mesh Building Intelligent Toolkit*) merupakan alat *preprocessor* yang dibuat untuk membantu menciptakan model dan diskritisasi (*meshing*) untuk analisis CFD. Penggunaan Gambit untuk pemodelan dan analisis CFD secara garis besar digambarkan oleh gambar 2.12.



Gambar 2.12 Skematik proses kerja *step by step* Gambit – CFD

### 2.5.2 *Fluent*

*Fluent* adalah suatu program untuk simulasi perpindahan kalor dan aliran fluida dengan berbagai bentuk geometri. Program *fluent* dapat memecahkan permasalahan aliran fluida dan kalor dengan penggunaan *mesh* geometri, dimana tipe *mesh* yang didukung adalah 2D *triangular-quadrilateral*, 3D *tetrahedral-hexahedral-pyramid-wedge*, dan *mesh* campuran. Langkah-langkah penyelesaian masalah dengan menggunakan *fluent* adalah sebagai berikut:

1. Pembuatan geometri dan *mesh* model
2. Pemilihan *solver* yang tepat pada model (2D atau 3D)
3. Impor *mesh* model
4. Pemeriksaan *mesh* model



5. Pemilihan formulasi *solver*
6. Pemilihan persamaan dasar yang dipakai dalam analisis, apakah aliran laminar, turbulen, reaksi kimia, perpindahan kalor, dan lain-lain
7. Penentuan sifat material yang dipakai
8. Penentuan kondisi batas
9. Pemilihan parameter kontrol solusi
10. Inisialisasi bidang aliran
11. Melakukan perhitungan / proses iterasi
12. Pengecekan hasil iterasi
13. Penyimpanan hasil iterasi
14. Jika perlu, perhalus *grid* kemudian melakukan iterasi ulang untuk mendapatkan hasil yang lebih baik
15. Hasil iterasi dapat ditampilkan baik dalam bentuk kontur, vektor, *pathline*, maupun trek partikel

Jika terdapat fungsi masukan yang tidak dapat didefinisikan oleh program *fluent*, maka *fluent* menyediakan suatu fitur yang memungkinkan pengguna untuk memasukkan fungsi atau formulanya sendiri ke dalam program. Fungsi masukan ini disebut sebagai UDF atau *user define function* dalam *fluent* yang dinyatakan dalam bahasa C. Langkah - langkah pembuatan dan penggunaan *User Define Function* yaitu:

1. Menentukan permasalahan yang ingin dipecahkan
2. Membuat formulasi *solver* dalam bentuk bahasa pemrograman C
3. Menjalankan *fluent* dan membaca *case file*
4. *Interpret* atau *compile* formula *solver* yang dibuat pada langkah 2
5. Masukkan *UDF* ke dalam *Fluent*
6. Menjalankan proses perhitungan
7. Analisis solusi numerik dan perbandingan hasil

Dalam melakukan simulasi model dengan menggunakan *fluent*, maka dibutuhkan *solver* untuk menyelesaikan simulasi tersebut dengan memilih formula *solver* yang tersedia di dalam *fluent*. Salah satu *solver*

tersebut adalah model turbulensi k- $\omega$  SST. Model turbulensi k- $\omega$  SST adalah dua persamaan model eddy-viskositas yang menjadi sangat populer. Model ini menggunakan model 2D *Double Precision*. Penggunaan formula k- $\omega$  di bagian dalam lapisan batas membuat model secara langsung dapat digunakan sepanjang dinding sub-lapisan viskos, maka model turbulensi k- $\omega$  SST dapat digunakan sebagai model turbulensi dengan *Reynold* rendah tanpa fungsi redaman tambahan. Model k- $\omega$  SST mirip dengan model k- $\omega$  standar, tetapi juga meliputi perbaikan sebagai berikut:

1. Model k- $\omega$  standard dan model transform k- $\omega$ , keduanya dikalikan dengan *blending function* dan kedua model ditambahkan bersama-sama. *Blending Function* dirancang menjadi satu di dekat daerah dinding, dimana mengaktifkan model k- $\omega$  standar, dan nol dari permukaan, dimana mengaktifkan model transform k- $\omega$ .
2. Model SST menggabungkan derivatif *cross-diffusion* ke dalam persamaan  $\omega$ .
3. Definisi viskositas turbulen dimodifikasi untuk memperhitungkan transportasi dari *turbulent shear stress*.
4. Konstanta permodelan berbeda.

Model k- $\omega$  SST memiliki bentuk mirip dengan model k- $\omega$  standar seperti dinyatakan dalam persamaan 2.16 dan 2.17

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \tilde{G}_k - Y_k + S_k \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (2.17)$$

Dimana

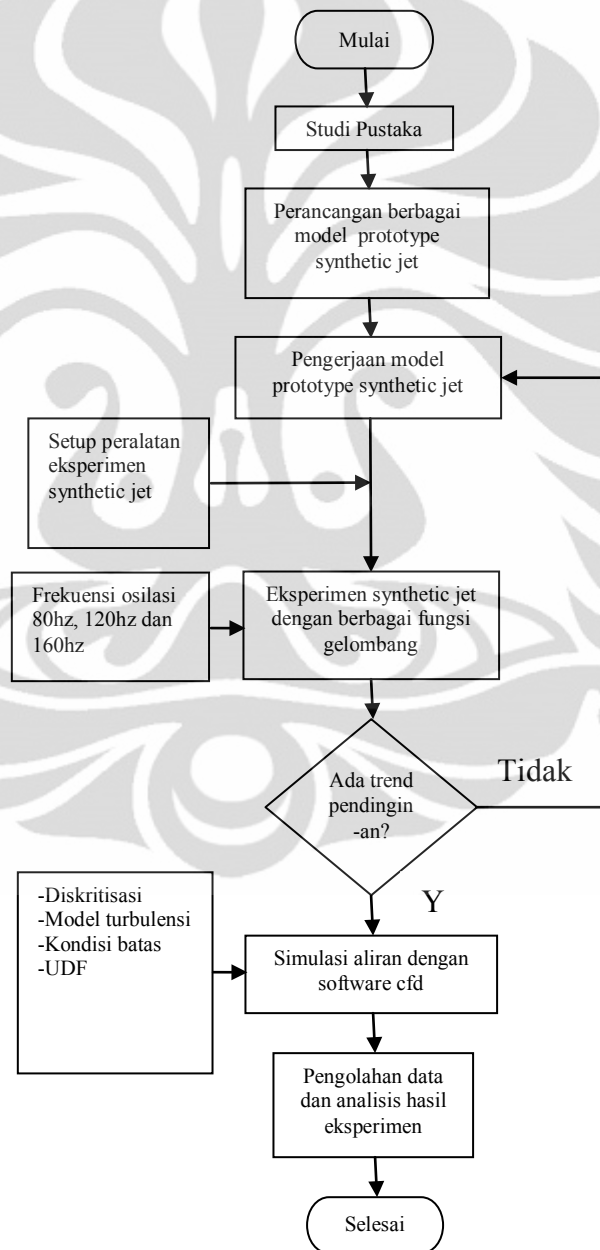
$$\begin{aligned} \alpha_\infty^* &= 1, & \alpha_\infty &= 0.52, & \alpha_0 &= \frac{1}{9}, & \beta_\infty^* &= 0.09, \\ \beta_i &= 0.072, & R_\beta &= 8, & R_k &= 6, & R_\omega &= 2.95, & \zeta^* &= 1.5, \\ M_{t0} &= 0.25, & \sigma k &= 2.0, & \sigma \omega &= 2.0 \end{aligned}$$

## BAB 3

### SISTEM PENDINGIN DENGAN *SYNTHETIC JET*

#### 3.1 Diagram Alir Penelitian

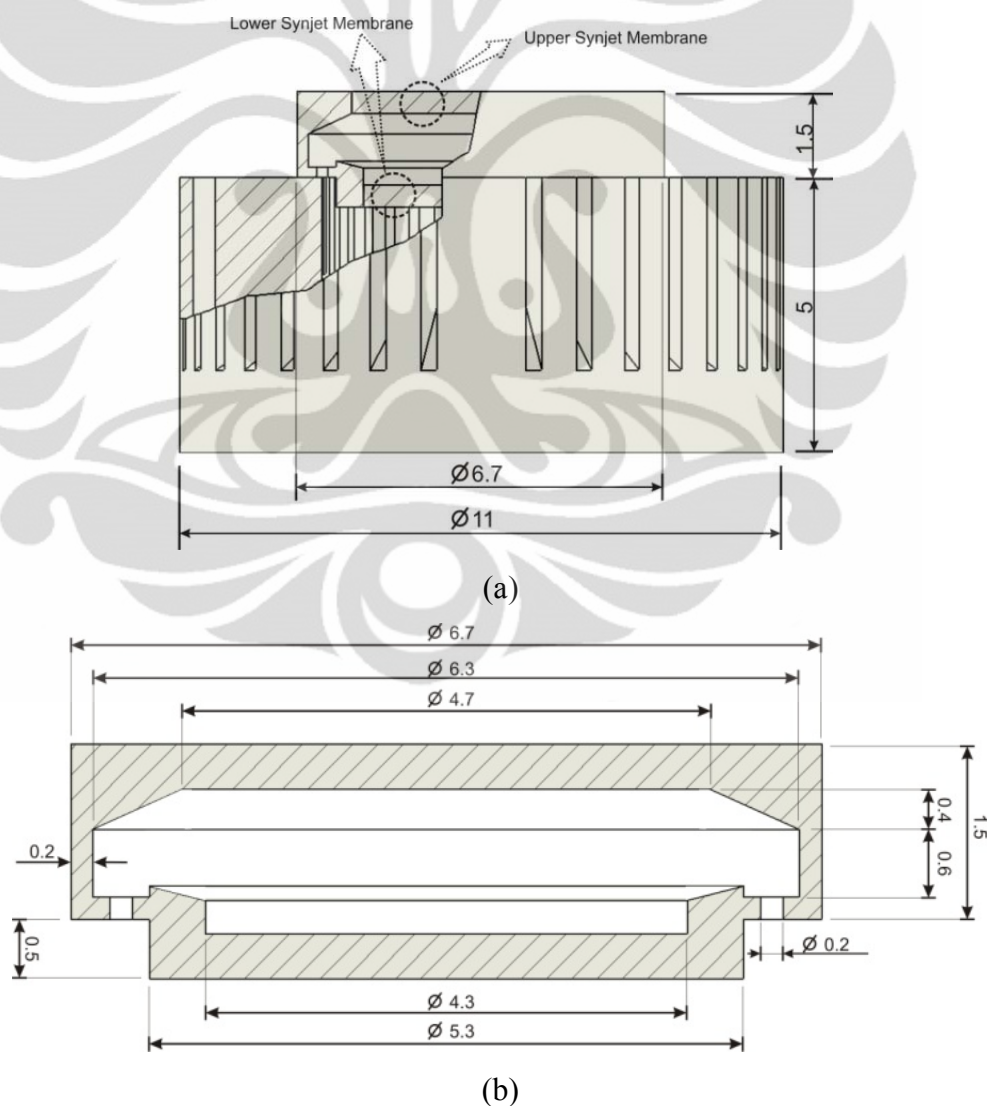
Penelitian dilakukan melalui dua tahapan yaitu tahapan komputasional dan eksperimen. Gambar 3.1 menunjukkan diagram alir penelitian *synthetic jet*.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

### 3.2 Modul *Synthetic Jet*

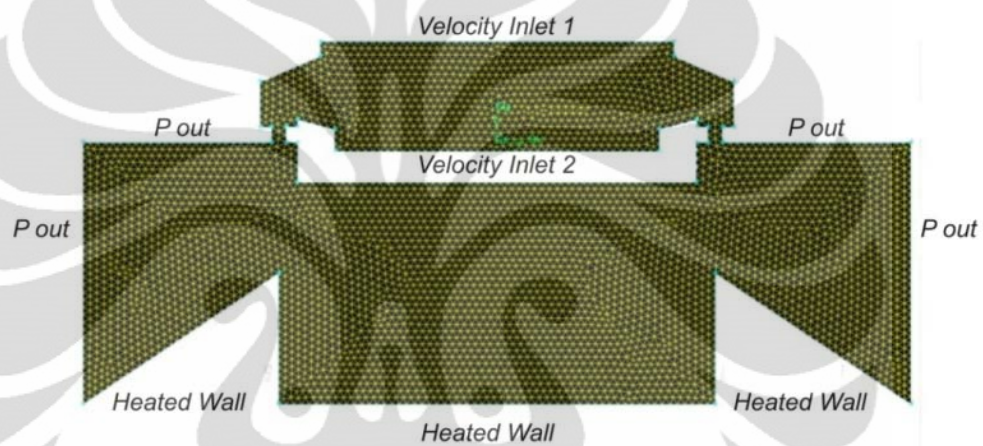
*Synthetic jet* yang ingin diuji membutuhkan rancangan modul *prototype synthetic jet*. Oleh karena itu perlu dibuat suatu modul uji yang mampu menghasilkan aliran *synthetic jet* yang menghasilkan *heat transfer coefficient* yang baik. Rancangan modul uji *synthetic jet* yang dibuat dan dipakai dalam eksperimen digambarkan dalam gambar 3.2(a) dan 3.2(b). Gambar 3.2(a) memperlihatkan detail model fisik susunan modul *synthetic jet* dengan *heat sink*. Gambar 3.2(b) memperlihatkan aktuator *synthetic jet* secara detail. Material aktuator *synthetic jet* diproduksi dengan material nilon.



Gambar 3.2 Model fisik *synthetic jet* (dalam cm) (a) Susunan aktuator *synthetic jet* dengan *heat sink* (b) Detail aktuator *synthetic jet*

### 3.3 Tahap Komputasional

Tahap komputasional merupakan tahapan untuk mendapatkan aliran fluida dan pola bidang termal dari *impinging synthetic jet* secara visual. Tahap komputasional dimulai dengan proses pemodelan modul *synthetic jet* yang telah di-*meshing* menggunakan *software* Gambit (*Computational Fluid Dynamics / CFD*). Model komputasi dan *meshing* dari prototipe *synthetic jet* ditunjukkan pada gambar 3.3.



Gambar 3.3 Gambaran daerah komputasi *synthetic jet*

Model komputasi *synthetic jet* pada gambar 3.3 dipergunakan dalam analisis daerah aliran termal pada *synthetic jet* dengan menggunakan model matematika (model turbulensi) *k- $\omega$  SST (Shear Stress Transport)*. Model turbulensi ini digunakan karena mampu memprediksi daerah aliran dekat dinding dengan baik dan pada aliran *freestream*. Daerah kerja fluida udara diasumsikan bersifat *isothermal* dan *incompressible* (tak mampu mampat). Suhu lingkungan diasumsikan 30°C dan suhu bagian bawah dinding yang dipanaskan berusaha dipertahankan pada suhu *isothermal* 60°C. Dinding batas pada kedua sisi aktuator diasumsikan memiliki tekanan statik konstan dengan tekanan 1 atm. Kondisi komputasi lainnya dituliskan pada tabel kondisi komputasi.

Tabel Kondisi komputasi

Computation Condition		
Model settings		
2D, Unsteady		
Fluid		
Air		
Fluid Properties	Density	1.225 kg/m <sup>3</sup>
	Viscosity	1.7894 e <sup>-05</sup> kg/m-s
	Cp	1006.43 J/kg-k
	Thermal Conductivity	0.0242 w/m-k
Boundary Condition	Velocity Inlet 1,2	UDF
	Pressure Outlet (Gauge pressure)	0 Pascal
	Heater	60°C
	Frequency	80 Hz, 120 Hz, and 160 Hz
	Amplitude	1 m/s

Fungsi paksaan konveksi paksa dengan masukan jenis gelombang *triangle* dimodelkan dengan fluent menggunakan *user defined function* (UDF). UDF akan mendefinisikan pergerakan model membran sesuai dengan fungsi masukan yang diinginkan. Penentuan kondisi batas dengan fungsi masukan diperlukan untuk men-*define* gerakan sisi batas modul. Gambaran aliran laminar dan turbulen yang dihasilkan akan menunjukkan pergerakan aliran fluida yang terjadi dalam modul *synthetic jet*.

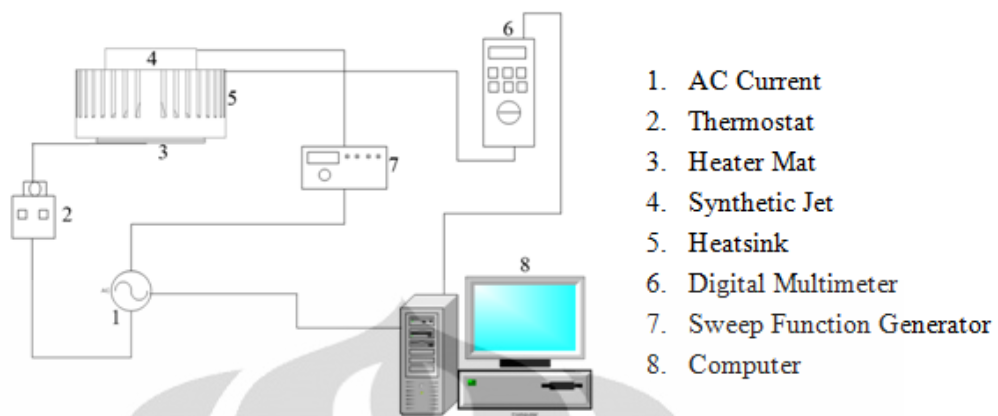
Pada kondisi awal ( $t=0$ ), posisi membran/diafragma diasumsikan berada pada bagian bawah *cavity*. Gerakan membran/diafragma diasumsikan sama dengan gerakan piston di dalam sebuah silinder, dimana diekspresikan sebagai fungsi gelombang *triangle* yaitu:

$$V = V_0 + \left\{ \frac{8}{\pi^2} \sum_{A=0,1,2,\dots}^{\infty} (-1)^A \frac{\sin \{(2A+1)2\pi ft\}}{(2A+1)^2} \right\}$$

dimana A merupakan kecepatan maksimum yang terbentuk akibat gerakan diafragma di dalam *cavity* dan t adalah waktu eksperimen.

### 3.4 Tahap Eksperimen

Tahap eksperimen merupakan tahapan untuk mengukur suhu pada *heatsink* dengan menggunakan *digital multimeter* (DMM). Susunan sistem eksperimen penelitian digambarkan pada gambar 3.4.



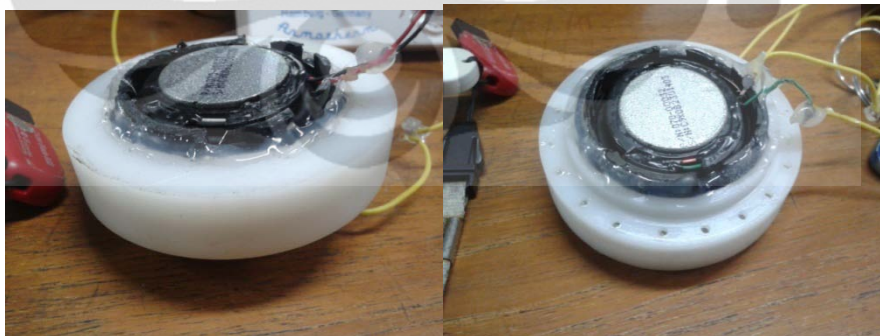
Gambar 3.4 *Experimental Setup*

### 3.4.1 Komponen – komponen eksperimen

Komponen - komponen yang digunakan pada sistem eksperimen adalah:

#### 1. *Synthetic jet*

Modul *synthetic jet* merupakan alat pendingin dan dipergunakan untuk mendinginkan *heatsink*. *Synthetic jet* dibuat dengan menggunakan bahan *nylon* karena mudah dibentuk dan memiliki sifat insulator yang baik. Modul *synthetic jet* yang digunakan terdiri atas dua membran piezoelektrik yang dipasang pada bagian atas dan bawah *cavity*, dimana pada sisi bawah (sisi keluar) terdapat 20 orifis dengan jarak antara 9 mm dan diameter 2 mm.



Gambar 3.5 *Synthetic jet* modul tampak sisi atas dan bawah

#### 2. *Heatsink*

*Heatsink* merupakan benda yang diukur pendinginannya. *Heatsink* yang digunakan dalam eksperimen memiliki bentuk lingkaran

dengan 32 *fin*, berdiameter 11 cm dan tinggi 5 cm. Material pembuatan *heatsink* adalah aluminium.



Gambar 3.6 *Heatsink*

### 3. *Heater Mat*

*Heater mat* merupakan alat yang digunakan sebagai sumber panas dan ditempatkan pada bagian bawah *heatsink*.



Gambar 3.7 *Heater Mat*



#### 4. *Thermostat*

*Thermostat* merupakan alat untuk mengatur suhu pada *heater mat*.

Suhu pada *heater mat* di-setting pada 60°C.



Gambar 3.8 *Thermostat*

#### 5. *Digital Multimeter*

*Digital multimeter* digunakan untuk mengukur dan membaca hasil pengukuran suhu pada *heatsink* dari sebuah *thermocouple* yang dipasang pada ujung *heatsink*.



Gambar 3.9 *Digital Multimeter*

#### 6. Sweep Function Generator

*Sweep function generator* digunakan untuk mengatur bentuk gelombang yang digunakan dan variasi frekuensi gelombang. Pada eksperimen ini digunakan gelombang *triangle* dengan variasi frekuensi gelombangnya 80Hz, 120 Hz dan 160 Hz.



Gambar 3.10 Function Generator

#### 7. Komputer

Komputer digunakan sebagai alat perekam dan penyimpanan data temperatur *heatsink* yang dibaca oleh *digital multimeter*.



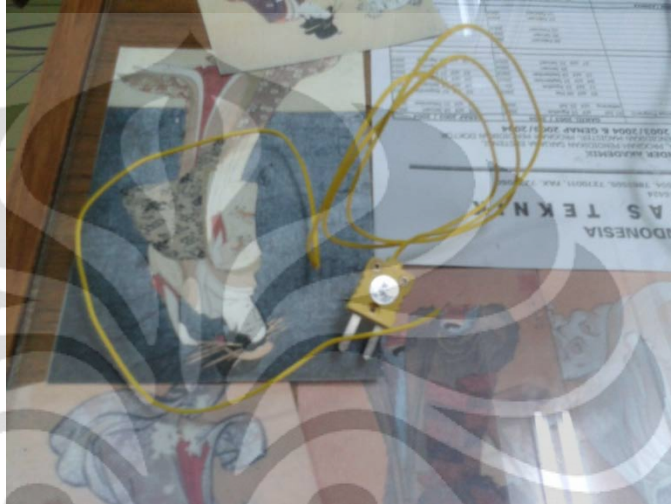
Gambar 3.11 Komputer

### 3.4.2 Komponen dan peralatan tambahan

Komponen dan peralatan tambahan pada eksperimen meliputi:

#### 1. *Thermocouple*

Komponen untuk mengukur temperatur pada suatu titik pengukuran.



Gambar 3.12 *Thermocouple*

#### 2. Lem tembak (*glue gun*)

Berfungsi sebagai *sealant* pada modul *synthetic jet*.



Gambar 3.13 *Glue Gun*

#### 3. Hygrometer

Digunakan untuk mengukur suhu ambient (lingkungan).



Gambar 3.14 Hygrometer

### 3.4.3 Prosedur pengambilan data

Proses pengambilan data eksperimen dilakukan dengan mengukur suhu pada *heatsink* di satu titik dengan menggunakan alat digital multimeter yang terhubung computer dengan tingkat akurasi pengukuran  $\pm 0.05$  °C. Sebelum eksperimen dilakukan, *heatsink* dipanaskan dengan sumber panas. Sumber panas yaitu berupa *heater mat* ditempatkan pada dasar *heatsink* dengan suhu 60°C yang diatur menggunakan *thermostat* dan pengukuran dilakukan pada suhu lingkungan 30°C. Kemudian dilakukan pengaturan bentuk gelombang *triangle* dengan *sweep function generator* beserta pengaturan frekuensi gelombang dengan variasi gelombang 80 Hz, 120 Hz dan 160 Hz. Pengambilan data dilakukan dengan terlebih dahulu meletakkan *thermocouple* di satu titik pada *heatsink* dan kemudian dibaca oleh digital multimeter. Komputer yang terhubung dengan digital multimeter kemudian membaca dan mengambil data pengukuran. Pengambilan data dilakukan selama 2 jam dengan interval data per 1 detik pada setiap frekuensi gelombang (80 hz, 120 hz, dan 160 hz).

## BAB 4

### ANALISIS DATA

#### 4.1 Analisis Komputasional

Tahap komputasional dilakukan dengan menganalisis kontur kecepatan sesaat, vortisitas sesaat dan temperatur sesaat dengan melakukan simulasi menggunakan *software* CFD Fluent. Jenis gelombang *triangle* disimulasikan dengan variasi tiga frekuensi 80 hz, 120 hz dan 160 hz pada waktu sesaat 10 detik, 50 detik dan 120 detik. Kontur hasil simulasi digunakan untuk menunjukkan fenomena yang terjadi di dalam *cavity* modul *synthetic jet* dengan *heat sink*. Selain itu juga ditunjukkan kontur *suction* dan *discharge* membran pada satu fasa untuk menunjukkan fenomena aliran yang terjadi di dalam sistem *heat sink-synthetic jet*.

##### 4.1.1 Analisis Kontur Kecepatan Sesaat

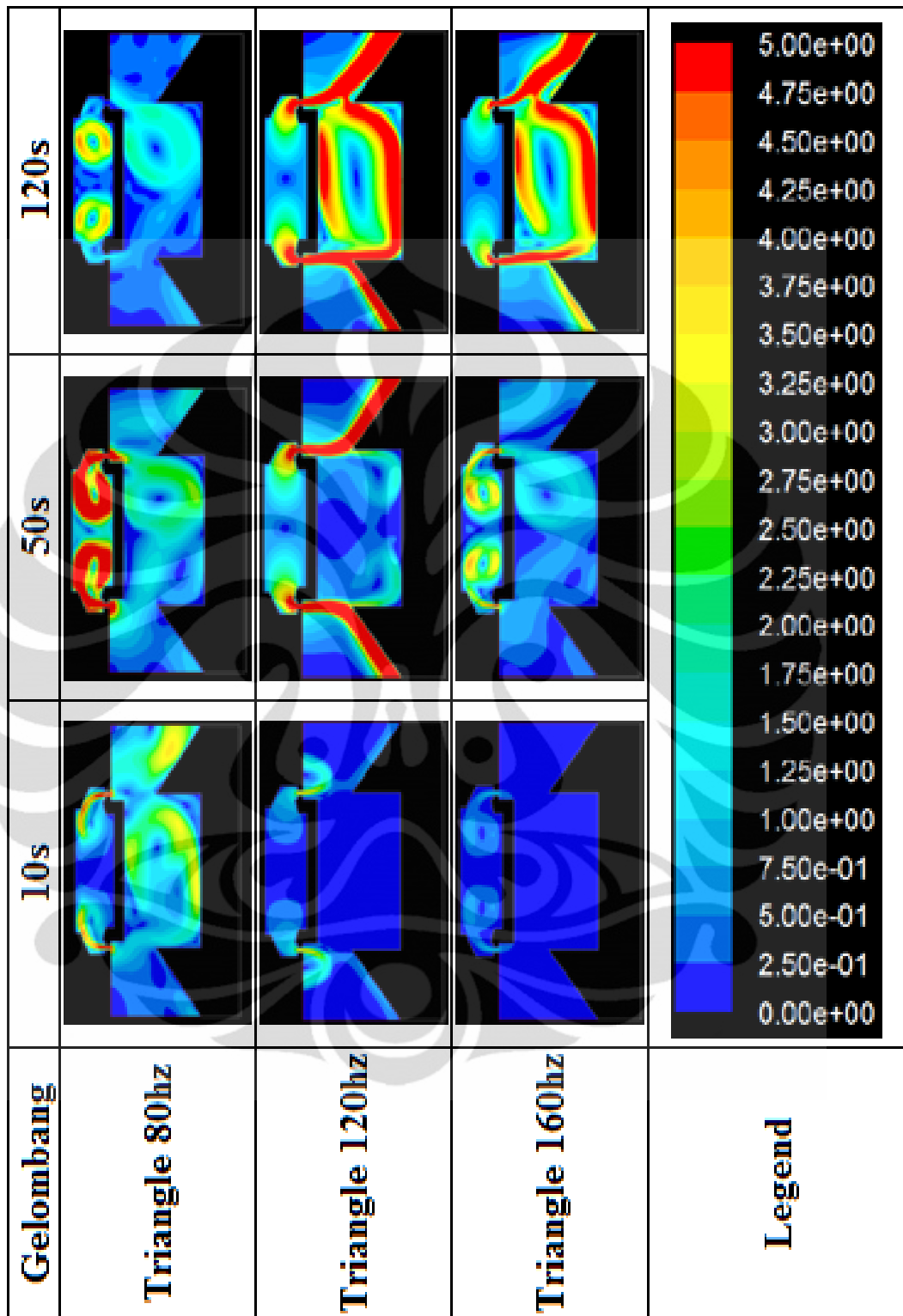
Kontur kecepatan digunakan untuk menunjukkan profil kecepatan pergerakan fluida yang digerakkan oleh membran *synthetic jet* pada waktu sesaat. Perubahan profil kecepatan ini diamati pada waktu-waktu sesaat yaitu ketika membran telah bergerak selama 10 detik, 50 detik dan 120 detik.

Gambar 4.1 menunjukkan kontur kecepatan sesaat fluida dengan gelombang *triangle* pada frekuensi 80 hz. Pada waktu 10 s, terlihat bahwa mulai terjadinya pergerakan udara di sisi dalam *cavity*. Pada waktu 10 s ke 50 s terjadi peningkatan kecepatan terutama pada kedua sisi orifis. Pada detik ke 120 terlihat bahwa sistem mulai mencapai pergerakan (kecepatan) kestabilannya. Pergerakan fluida pada *cavity* dan orifis sangat mempengaruhi sistem disebabkan karena getaran harmonik membran (fase *suction* dan *discharge*). Dari waktu ke waktu terlihat adanya kecepatan yang tinggi dalam *cavity* yang berarti besarnya momentum yang menghasilkan efek pendinginan yang baik.

Gambar 4.1 juga menunjukkan kontur kecepatan sesaat fluida dengan gelombang *triangle* pada frekuensi 120 hz. Pada waktu 10 s, terlihat bahwa mulai terjadinya pergerakan udara terutama pada kedua

sisi orifis. Pada waktu 10 s ke 50 s terlihat terjadi peningkatan kecepatan terutama pada kedua sisi orifis dan sepanjang dasar kisi *heat sink*. Pada detik ke 120 terlihat bahwa sistem terus mengalami peningkatan pergerakan (kecepatan) untuk mencapai kestabilannya. Pergerakan fluida pada *cavity* dan orifis karena getaran membran (fase *suction* dan *discharge*) yang semakin cepat memungkinkan sistem untuk lebih lama mencapai kestabilan pergerakannya. Dari waktu ke waktu terlihat adanya kecepatan yang tinggi dalam *cavity* yang berarti besarnya momentum yang menghasilkan efek pendinginan yang baik.

Gambar 4.1 juga menunjukkan kontur kecepatan sesaat fluida dengan gelombang *triangle* pada frekuensi 160 hz. Pada waktu 10 s, terlihat bahwa mulai terjadinya pergerakan udara terutama pada kedua sisi orifis. Pada waktu 10 s ke 50 s terlihat terjadi peningkatan kecepatan terutama pada kedua sisi orifis dan pada *heat sink*. Pada detik ke 120 terlihat bahwa sistem terus mengalami peningkatan pergerakan (kecepatan) pada sisi keluar orifis dan pada sisi dasar dan kisi *heat sink* untuk mencapai kestabilannya. Pergerakan fluida pada *cavity* dan orifis karena getaran membran (fase *suction* dan *discharge*) yang semakin cepat memungkinkan sistem untuk lebih lama mencapai kestabilan pergerakannya. Dari waktu ke waktu terlihat pula adanya kecepatan yang tinggi dalam *cavity* yang berarti besarnya momentum yang menghasilkan efek pendinginan yang baik.



Gambar 4.1 Kontur kecepatan sesaat synthetic jet gelombang triangle pada frekuensi 80 hz, 120 hz, dan 160 hz

#### 4.1.2 Analisis Kontur Vortisitas Sesaat

Kontur vortisitas digunakan untuk menunjukkan profil besarnya vortisitas (turbulensi) aliran fluida yang terjadi akibat pergerakan membran terhadap sistem pada waktu sesaat. Profil vortisitas ini diamati ketika membran bergerak pada detik ke-10, 50 dan 120. Pergerakan fluida karena adanya efek inersia fluida memungkinkan besarnya vortisitas dan perubahannya dari waktu ke waktu.

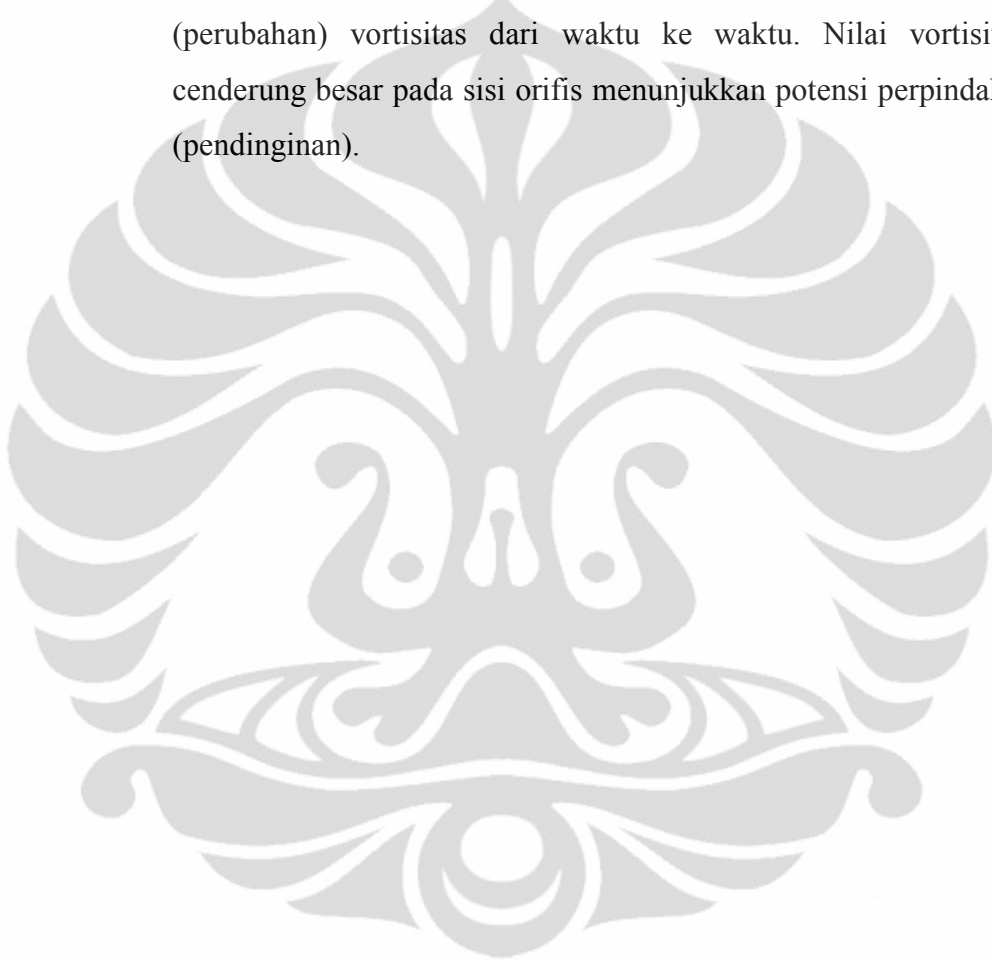
Gambar 4.2 menunjukkan kontur vortisitas sesaat fluida dengan gelombang *triangle* pada frekuensi 80 Hz. Terlihat dari gambar bahwa besarnya vortisitas berubah dari waktu ke waktu. Pada 10 s vortisitas mulai terjadi pada kedua sisi orifis dan berkembang menjadi besar pada detik ke-50. Pada detik ke-120 vortisitas terlihat melemah. Perubahan besarnya vortisitas ini terjadi dikarenakan pergerakan aliran fluida dan getaran membran akibat fungsi paksaan dan amplitudo gelombang yang menyebabkan ketidakstabilan (perubahan) vortisitas dari waktu ke waktu. Nilai vortisitas yang cenderung besar menunjukkan potensi perpindahan kalor (pendinginan) yang cukup baik.

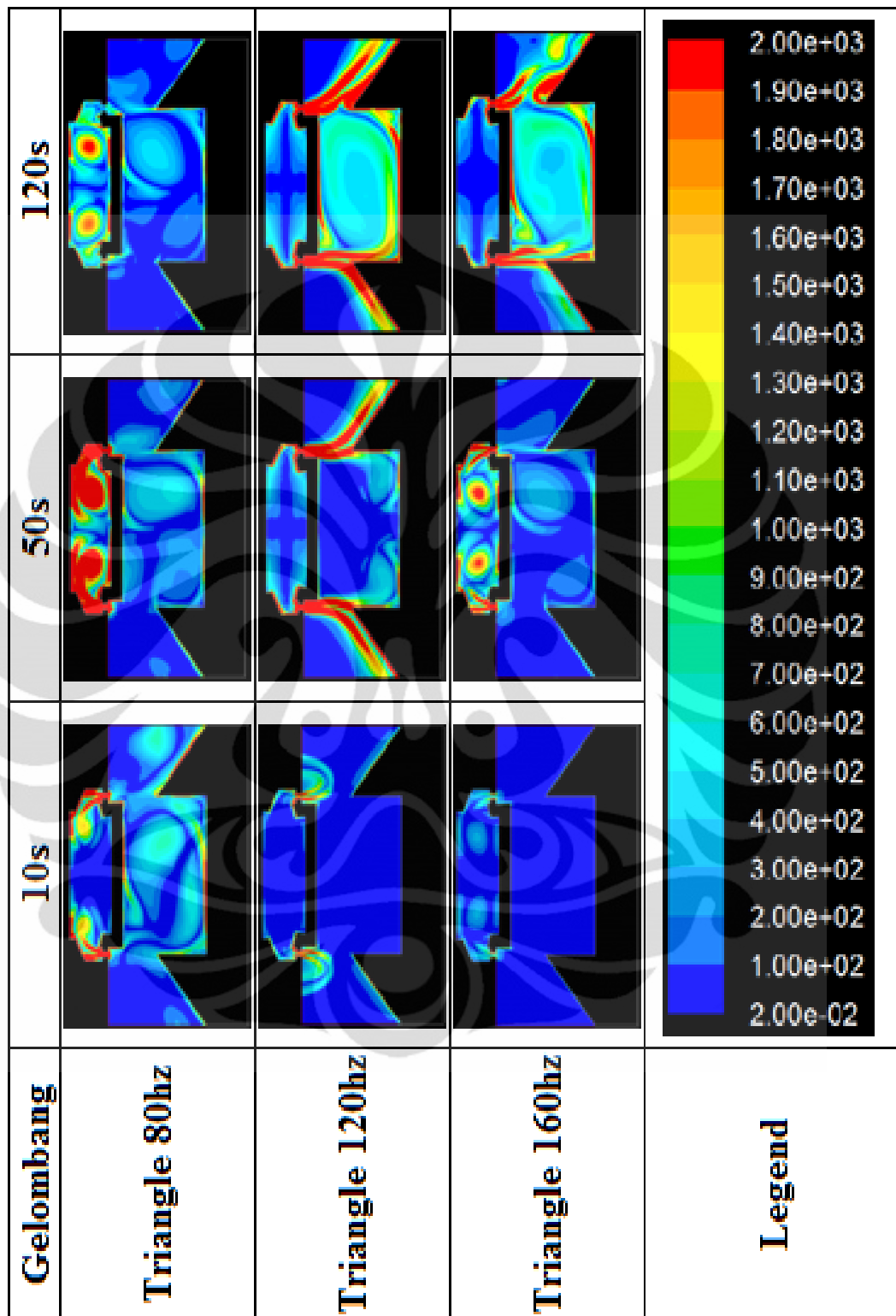
Gambar 4.2 juga menunjukkan kontur vortisitas sesaat fluida dengan gelombang *triangle* pada frekuensi 120 Hz. Terlihat dari gambar bahwa besarnya vortisitas berubah dari waktu ke waktu. Pada 10 s vortisitas mulai terjadi pada kedua sisi orifis dan berkembang menjadi lebih besar secara tiba-tiba pada detik ke-50. Pada detik ke-120 vortisitas terlihat menguat kembali dan mencakup area sepanjang kisi *heat sink*. Perubahan besarnya vortisitas ini terjadi dikarenakan pergerakan aliran fluida dan getaran membran akibat fungsi paksaan dan amplitudo gelombang yang menyebabkan ketidakstabilan (perubahan) vortisitas dari waktu ke waktu. Nilai vortisitas yang cenderung besar menunjukkan potensi perpindahan kalor (pendinginan).

Gambar 4.2 juga menunjukkan kontur vortisitas sesaat fluida dengan gelombang *triangle* pada frekuensi 160 Hz. Terlihat dari gambar bahwa besarnya vortisitas berubah dari waktu ke waktu. Pada 10 s



vortisitas mulai terjadi pada kedua sisi orifis dan berkembang menjadi lebih besar secara tiba-tiba dan terpusat pada *cavity synthetic jet* pada detik ke-50. Pada detik ke-120 vortisitas terlihat pada area keluar orifis dan sepanjang kisi *heat sink*. Perubahan besarnya vortisitas ini terjadi dikarenakan pergerakan aliran fluida dan getaran membran akibat fungsi paksaan dan amplitudo gelombang yang menyebabkan ketakstabilan (perubahan) vortisitas dari waktu ke waktu. Nilai vortisitas yang cenderung besar pada sisi orifis menunjukkan potensi perpindahan kalor (pendinginan).





Gambar 4.2 Kontur vortisitas sesaat synthetic jet gelombang triangle pada frekuensi 80 hz, 120 hz, dan 160 hz

#### 4.1.3 Analisis Kontur Temperatur Sesaat

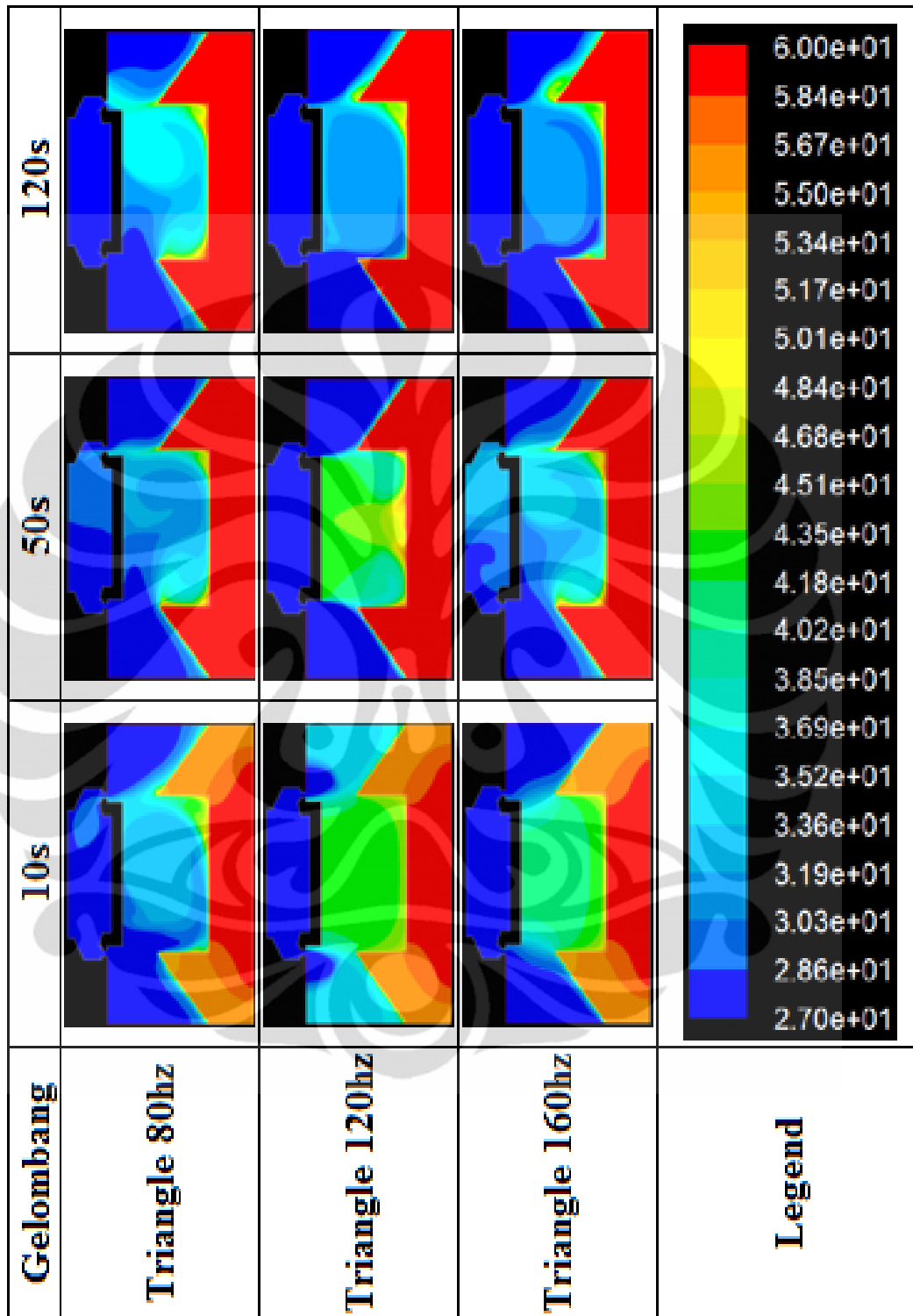
Kontur temperatur digunakan untuk menunjukkan profil suhu pada daerah sistem *synthetic jet – heat sink* yang mengalami proses konduksi dan konveksi pada waktu – waktu sesaat. Profil temperatur diamati ketika membran telah bergerak pada detik ke-10, 50 dan 120.

Gambar 4.3 menunjukkan kontur temperatur sesaat *heat sink* dan fluida dalam sistem dengan gelombang *triangle* pada frekuensi 80 hz. Jika dilihat pada gambar, pada detik ke-10 menunjukkan adanya pemanasan pada *heat sink* akibat efek konduksi dan mulai terjadinya konveksi paksa dalam sistem. Pada detik 10 ke 50 terlihat perubahan temperatur dalam *cavity synthetic jet* di mana terjadi peningkatan temperatur. Penurunan temperatur pada kisi *heat sink* terjadi pada detik ke-50. Akan tetapi pada detik ke-120 terjadi peningkatan temperatur pada sistem. Hal ini dimungkinkan karena ketika membran berada pada fase kerja (*suction* dan *discharge*) udara panas dialirkan dan dibuang keluar sehingga dapat menghasilkan efek pendinginan yang baik.

Gambar 4.3 juga menunjukkan kontur temperatur sesaat *heat sink* dan fluida dalam sistem dengan gelombang *triangle* pada frekuensi 120 hz. Jika dilihat pada gambar, pada detik ke-10 menunjukkan adanya pemanasan pada *heat sink* akibat efek konduksi dan mulai terjadinya konveksi paksa dalam sistem. Pada detik 10 ke 50 terlihat perubahan temperatur dalam *cavity synthetic jet* di mana terjadi peningkatan temperatur pada sisi tengah. Penurunan temperatur pada kisi *heat sink* mulai terjadi pada detik ke-50. Pada detik ke-120 terjadi penurunan temperatur pada sistem. Hal ini dimungkinkan karena ketika membran berada pada fase kerja (*suction* dan *discharge*) udara panas dialirkan dan dibuang keluar sehingga dapat menghasilkan efek pendinginan yang baik. Hal ini juga menunjukkan potensi pendinginan menggunakan *synthetic jet*.

Gambar 4.3 juga menunjukkan kontur temperatur sesaat *heat sink* dan fluida dalam sistem dengan gelombang *triangle* pada frekuensi 160

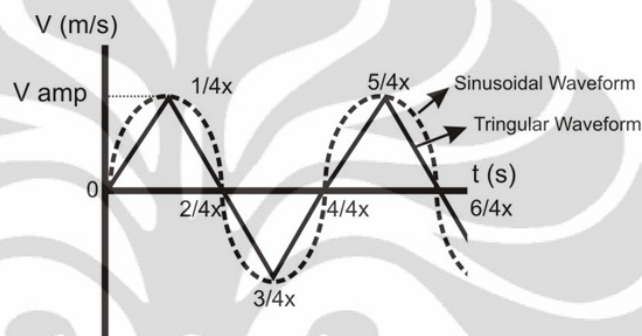
hz. Jika dilihat pada gambar, pada detik ke-10 menunjukkan adanya pemanasan pada *heat sink* akibat efek konduksi dan mulai terjadinya konveksi paksa dalam sistem. Pada detik 10 ke 50 terlihat perubahan temperatur dalam *cavity synthetic jet* di mana terjadi penurunan temperatur pada sisi tengah. Akan tetapi penurunan temperatur pada sisi *heat sink* yang mulai terjadi pada detik ke-50 justru diikuti oleh masuknya banyak panas ke dalam *cavity synthetic jet*. Hal ini dapat berdampak buruk pada sistem karena fluida udara yang dialirkan adalah udara panas yang cukup besar untuk menimbulkan efek buruk yaitu pemanasan terhadap sistem. Pada detik ke-120 terjadi penurunan temperatur pada sistem. Hal ini dimungkinkan karena ketika membran berada pada fase kerja (*suction* dan *discharge*) udara panas dialirkan dan dibuang keluar sehingga dapat menghasilkan efek pendinginan yang baik. Akan tetapi panas bertemperatur cukup tinggi berada pada posisi dekat sisi keluar orifis. Hal ini dapat menimbulkan akibat buruk yaitu penghisapan panas ke dalam *cavity* sehingga udara yang dihembuskan oleh *cavity* adalah udara panas. Udara panas tersebut dapat menimbulkan efek pemanasan dan bukannya pendinginan.



Gambar 4.3 Kontur temperatur sesaat synthetic jet gelombang triangle pada frekuensi 80 hz, 120 hz, dan 160 hz

#### 4.1.4 Kontur *Suction* dan *Discharge*

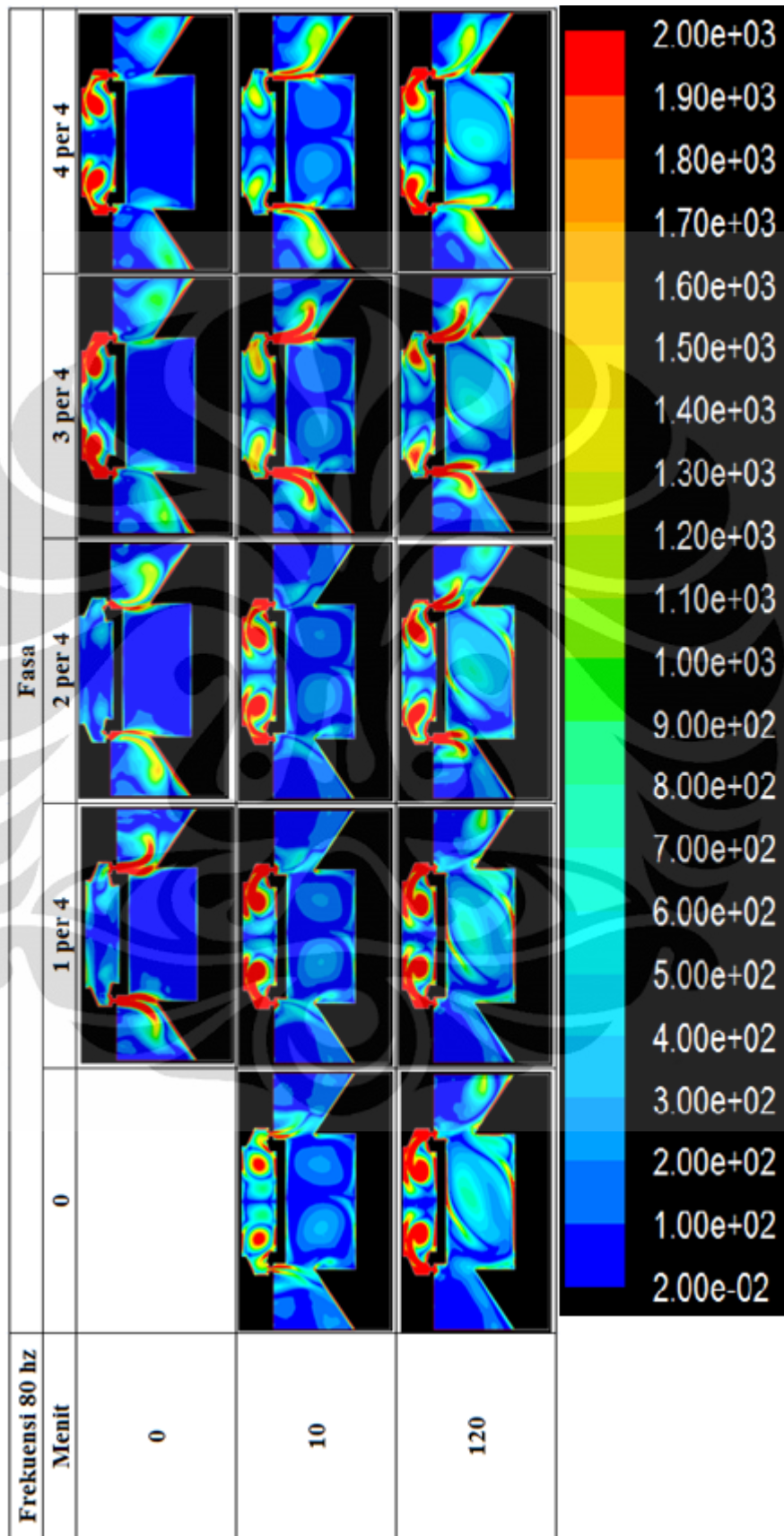
Kontur *suction* dan *discharge* dipergunakan untuk menunjukkan gerakan aliran yang terjadi di dalam sistem *heat sink – synthetic jet* dalam satu fasa. Dalam satu fasa gelombang terdapat empat kedudukan waktu yaitu  $1/4$  fasa,  $2/4$  fasa,  $3/4$  fasa, dan  $4/4$  fasa seperti ditunjukkan dalam gambar 4.4:



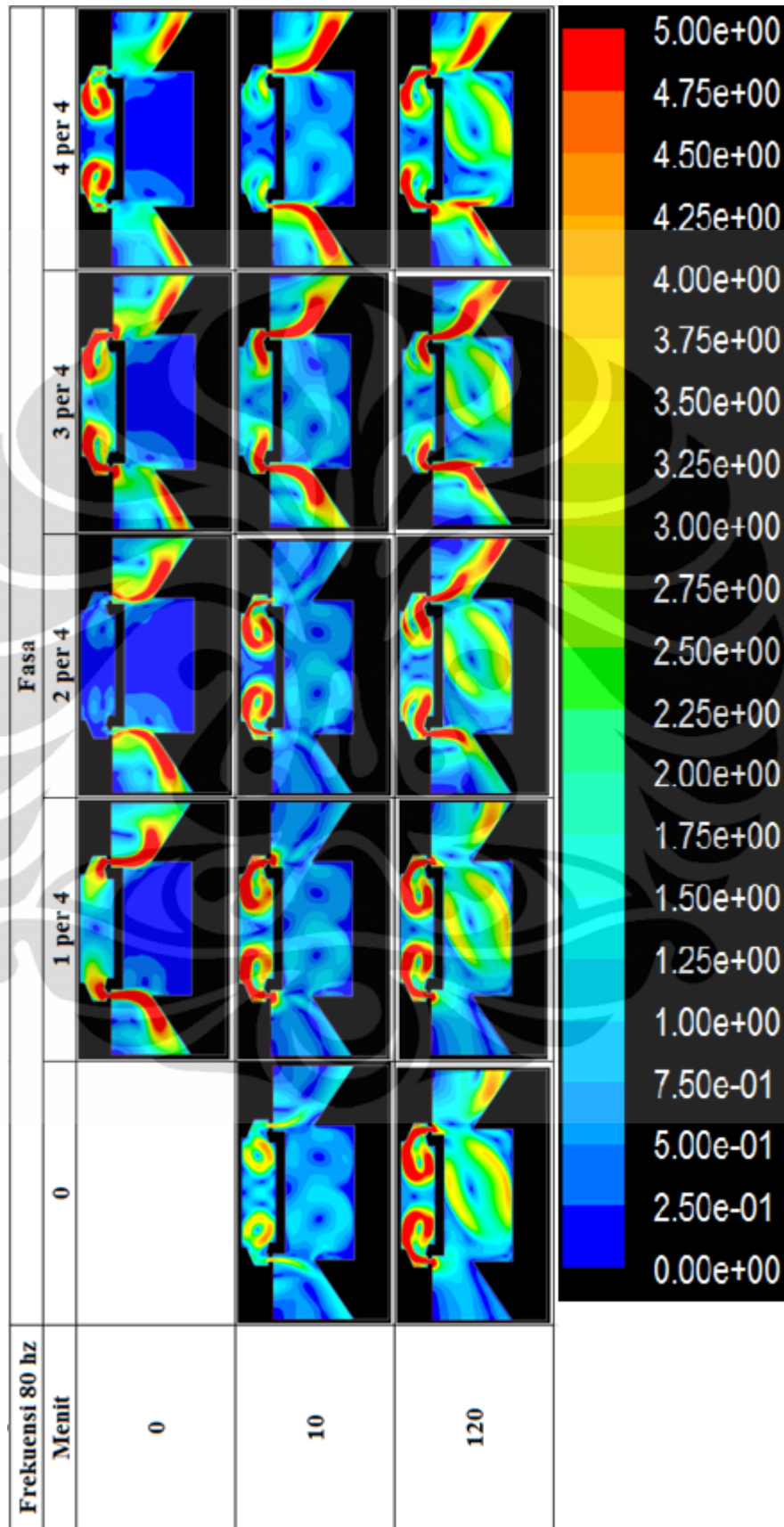
Gambar 4.4 Skema Bentuk Gelombang

Pada gelombang *triangle* bentuk kontur *suction* dan *discharge* ditunjukkan pada tiap kedudukan waktu pada menit ke-0, 10, dan 120.

Kontur vortisitas pada kondisi *suction* dan *discharge* pada gambar 4.5 memperlihatkan distribusi dan gerak vortisitas dalam satu fasa. Pada menit ke-0, fasa  $1/4$  memperlihatkan aliran *discharge* yang ditandai dengan besarnya vortisitas pada sisi keluar membran. Pada fasa  $2/4$  vortisitas yang keluar melemah karena masih berada pada waktu awal. Pada fasa  $3/4$  mulai terbentuk vortisitas yang kuat pada sisi dalam *cavity* membran. Hal ini disebabkan karena membran berada pada fasa peralihan dari *discharge* ke *suction*. Pada fasa  $4/4$  memperlihatkan vortisitas yang kuat dalam *cavity* membran karena berada dalam fasa *suction*. Pada menit ke-10 dan 120 terlihat vortisitas yang kuat terbentuk pada sisi dalam *cavity* membran. Pada menit ke-10 terjadi fasa *discharge* dari  $1/4$  ke  $3/4$  tetapi tidak terlalu terlihat kuat karena visualisasi penggambaran kontur pada sisi dalam membran yang masih kuat. Pada menit ke-120 terlihat kontur vortisitas *discharge* yang kuat dari  $1/4$

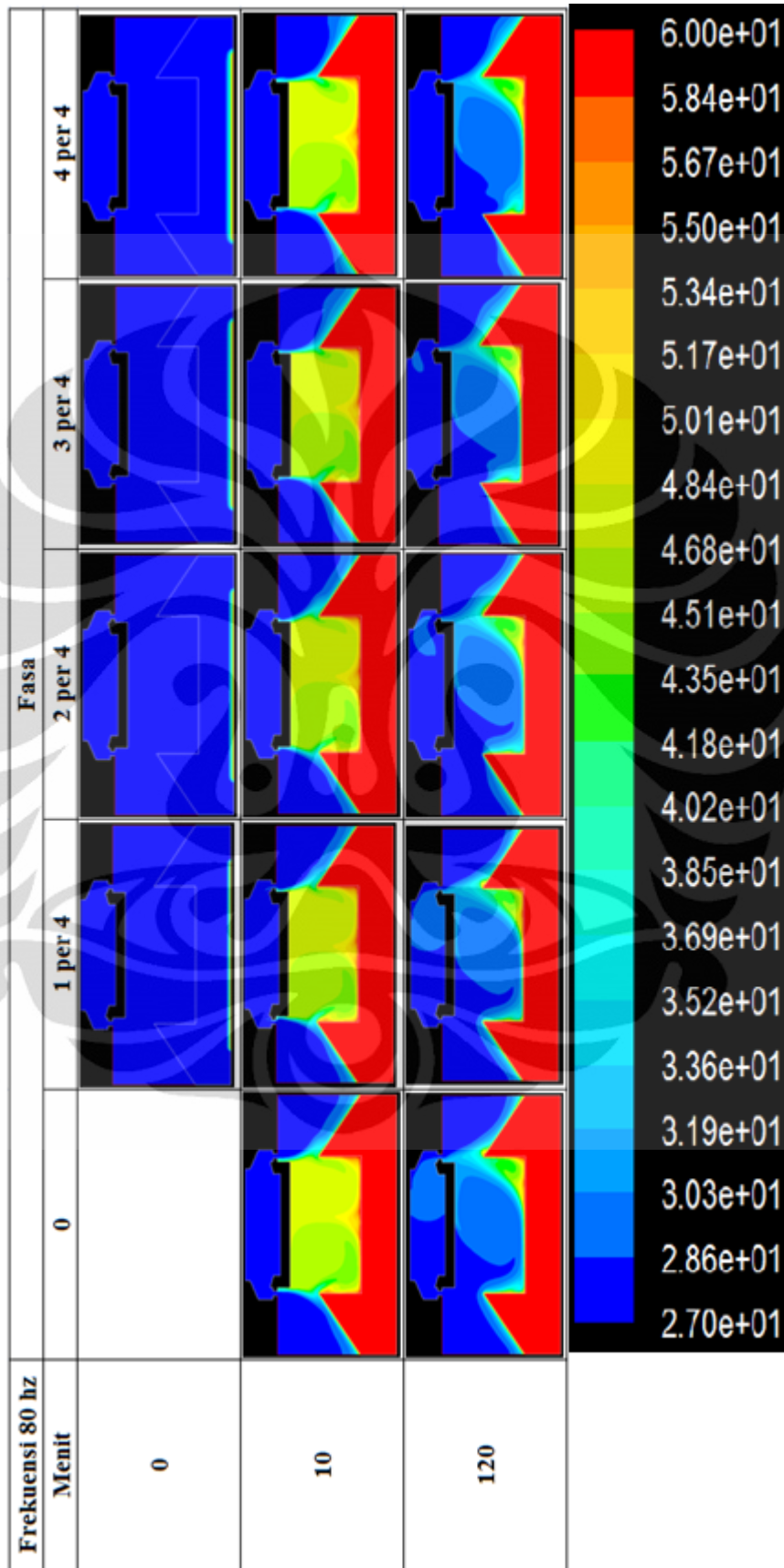


Gambar 4.5 Kontur Vortisitas pada Fase Suction dan Discharge dari 1/4 sampai 4/4



Gambar 4.6 Kontur Kecepatan pada Fase Suction pada Fase *Suction* dan *Discharge* dari 1/4 sampai 4/4





Gambar 4.7 Kontur Temperatur pada Fase Suction dan Discharge dari 1/4 sampai 4/4

sampai ke  $3/4$  dan *suction* pada  $4/4$ . Gambar 4.6 memperlihatkan kontur kecepatan pada kondisi *suction* dan *discharge* dalam satu fasa gelombang *triangle*. Kontur kecepatan juga memperlihatkan hubungan antara kontur vortisitas dan kecepatan yang linear. Apabila kontur kecepatan dan vortisitas dibandingkan terlihat bahwa kontur yang terbentuk antara keduanya hampir sama. Semakin tinggi kecepatannya, semakin kuat pula vortisitas yang terbentuk.

Pada gambar 4.7 memperlihatkan kontur temperatur pada sistem saat mengalami *suction* dan *discharge*. Terlihat pada menit ke-0 belum ada pengaruh fase *suction* dan *discharge* pada aliran karena baru mulai terjadi efek konduksi. Pada menit 10 terlihat adanya pengaruh panas yang dibuang pada sisi *heat sink* dan temperatur yang tinggi pada sisi tengah *heat sink*. Pada menit 120 terlihat adanya akumulasi panas pada sisi dalam *cavity* membran akibat *suction* dan *discharge*. Akumulasi panas dari  $1/4$  ke  $4/4$  terus berkurang disebabkan karena fase *discharge* membran.

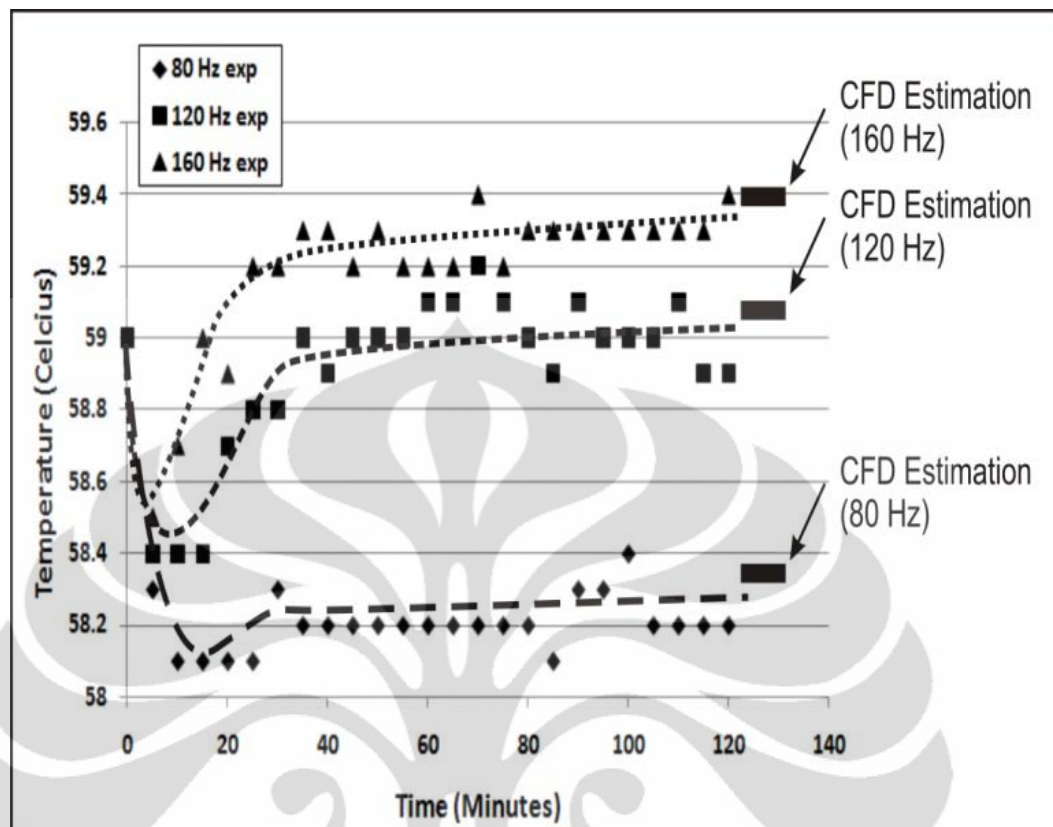
## 4.2 Analisis Eksperimental

Tahap eksperimen dilakukan dengan mengamati perubahan temperatur pada satu titik *heat sink* pada kondisi ruang terbuka selama 120 menit. Pengambilan data dilakukan pada variasi frekuensi 80 hz, 120 hz, dan 160 hz dengan amplitudo tetap 1 m/s serta temperatur ambient / lingkungan +/- 28-30°C. Hasil pengambilan data disajikan dan dianalisis ke dalam dua grafik yaitu grafik perubahan temperatur terhadap waktu dan grafik koefisien perpindahan kalor konveksi terhadap waktu.

### 4.2.1 Analisis Perubahan Temperatur terhadap Waktu

Gambar 4.8 menunjukkan karakteristik temperatur *synthetic jet* terhadap waktu. Terlihat pada grafik bahwa variasi frekuensi gelombang *triangle* memiliki pengaruh terhadap pendinginan *heat sink*. Berdasarkan bentuk grafik, karakteristik pendinginan *synthetic jet* terhadap *heat sink* dengan gelombang *triangle* menunjukkan penurunan temperatur yang cepat pada awal pendinginan sampai pada titik tertinggi kemudian secara

perlahan kembali mengalami kenaikan temperatur sampai pada titik tertentu di mana terjadi kestabilan temperatur terhadap waktu. Kecenderungan awal penurunan temperatur *heat sink* yang cepat semakin cepat mencapai temperatur terendah pada frekuensi yang semakin tinggi. Pada frekuensi 80 hz penurunan temperatur puncak dicapai pada waktu sekitar 15 menit dan kenaikan temperatur sebelum stabil dicapai pada waktu sekitar 30 menit setelah osilasi membran. Temperatur stabil modul *synthetic jet* dengan gelombang *triangle* frekuensi 80 hz yaitu sekitar 58,3°C atau menunjukkan trend pendinginan. Pada frekuensi 120 hz penurunan temperatur puncak dicapai pada waktu sekitar 10 menit dan kenaikan temperatur sebelum stabil dicapai pada waktu sekitar 30 menit setelah osilasi membran. Temperatur stabil modul *synthetic jet* dengan gelombang *triangle* frekuensi 120 hz yaitu sekitar 59,0°C atau dapat dikatakan tidak memiliki efek pendinginan yang baik. Pada frekuensi 160 hz penurunan temperatur puncak dicapai pada waktu sekitar 5 menit dan kenaikan temperatur sebelum stabil dicapai pada waktu sekitar 30 menit setelah osilasi membran. Temperatur stabil modul *synthetic jet* dengan gelombang *triangle* frekuensi 160 hz yaitu sekitar 59,3°C atau dapat dikatakan memiliki efek pendinginan yang buruk.



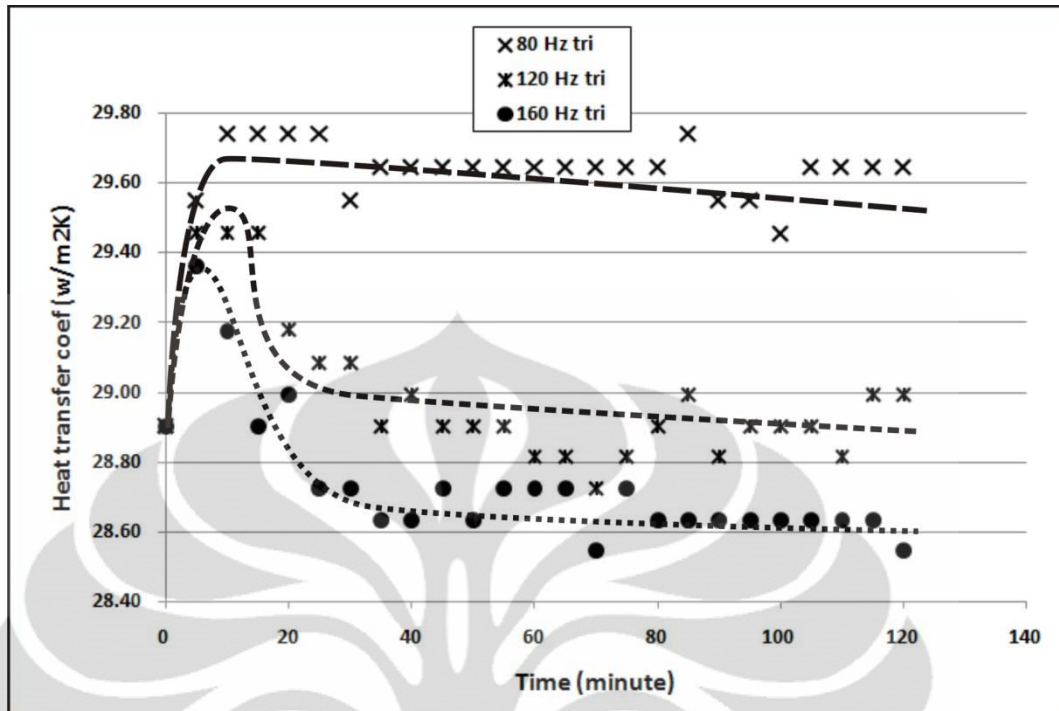
Gambar 4.8 Grafik temperatur pendinginan *synthetic jet* terhadap waktu

Gambar 4.8 juga memperlihatkan kecenderungan efek pendinginan yang jauh semakin baik pada frekuensi yang lebih rendah. Hal ini dimungkinkan karena adanya gerak osilasi membran dan pengaruh inersia aliran terhadap gerakan fluida. Estimasi temperatur CFD dengan eksperimen menunjukkan hasil yang tidak jauh berbeda.

#### 4.2.2 Analisis Koefisien Perpindahan Kalor Konveksi terhadap Waktu

Gambar 4.9 memperlihatkan karakteristik koefisien perpindahan panas gelombang *triangle* dengan variasi 3 frekuensi terhadap waktu. Terlihat pada grafik bahwa dibutuhkan waktu untuk mencapai kestabilan koefisien *heat transfer* pada berbagai frekuensi *synthetic jet*. Trend pada grafik memperlihatkan kecenderungan naiknya koefisien perpindahan panas pada tahap awal pendinginan menggunakan fungsi gelombang *triangle*. Trend koefisien perpindahan kalor gelombang *triangle* meningkat sampai pada suatu nilai puncak kemudian mengalami

penurunan. Penurunan koefisien perpindahan panas ini mulai terjadi pada waktu sekitar 10 menit setelah membran bergetar. Pada frekuensi 80 hz, koefisien perpindahan kalor mencapai nilai puncak sekitar 29.7 W/m<sup>2</sup>K dan setelah itu mengalami kecenderungan penurunan secara perlahan. Pada frekuensi 120 hz, koefisien perpindahan kalor mencapai nilai puncak yaitu sekitar 29.5 W/m<sup>2</sup>K dan setelah itu mengalami penurunan drastis sampai sekitar 28.9 W/m<sup>2</sup>K setelah 50 menit. Pada menit ke 50 dan seterusnya nilai koefisien perpindahan kalor cenderung stabil. Pada frekuensi 160 hz, koefisien perpindahan kalor mencapai nilai puncak yaitu sekitar 29.4 W/m<sup>2</sup>K dan setelah itu juga mengalami penurunan drastis seperti halnya pada frekuensi 120 hz serta mencapai kecenderungan kestabilan setelah sekitar 50 menit membran berosilasi. Grafik koefisien perpindahan kalor juga menunjukkan bahwa gelombang *triangle* dengan frekuensi 80 hz memiliki efek pendinginan yang terbaik dibanding pada frekuensi 120 hz dan 160 hz. Bahkan pada frekuensi 120 dan 160 hz nilai koefisien perpindahan kalor setelah 50 menit berada di bawah nilai awalnya. Hal tersebut menunjukkan buruknya efek pendinginan pada kedua frekuensi. Hal tersebut disebabkan karena akumulasi panas yang terjadi di dalam *cavity synthetic jet* yang tidak mampu diimbangi dengan pembuangan panas di dalamnya seiring dengan terus berjalannya fase *suction* dan *discharge*.



Gambar 4.9 Grafik koefisien perpindahan kalor *synthetic jet* terhadap waktu

### 4.3 Tingkat Kepercayaan (*Level of Confidence*) dan Persentase Error Pengukuran Penelitian

Dalam statistik ketika menduga suatu hal selalu dikenakan tingkat kepercayaan terhadap interval yang ada. Tingkat kepercayaan dapat dikatakan pula sebagai seberapa benar atau meyakinkan hasil pengukuran atau dugaan interval. Besarnya tingkat kepercayaan yang digunakan dalam penelitian ini adalah 95%.

Untuk menentukan besarnya error pengukuran diperlukan nilai *error standard* dan *mean* pengukuran. *Mean* pengukuran dapat dinyatakan:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i$$

Sedangkan *error standard* didapat dari nilai standard deviasi dibagi dengan akar pangkat dua dari jumlah pengukuran atau dapat dinyatakan:

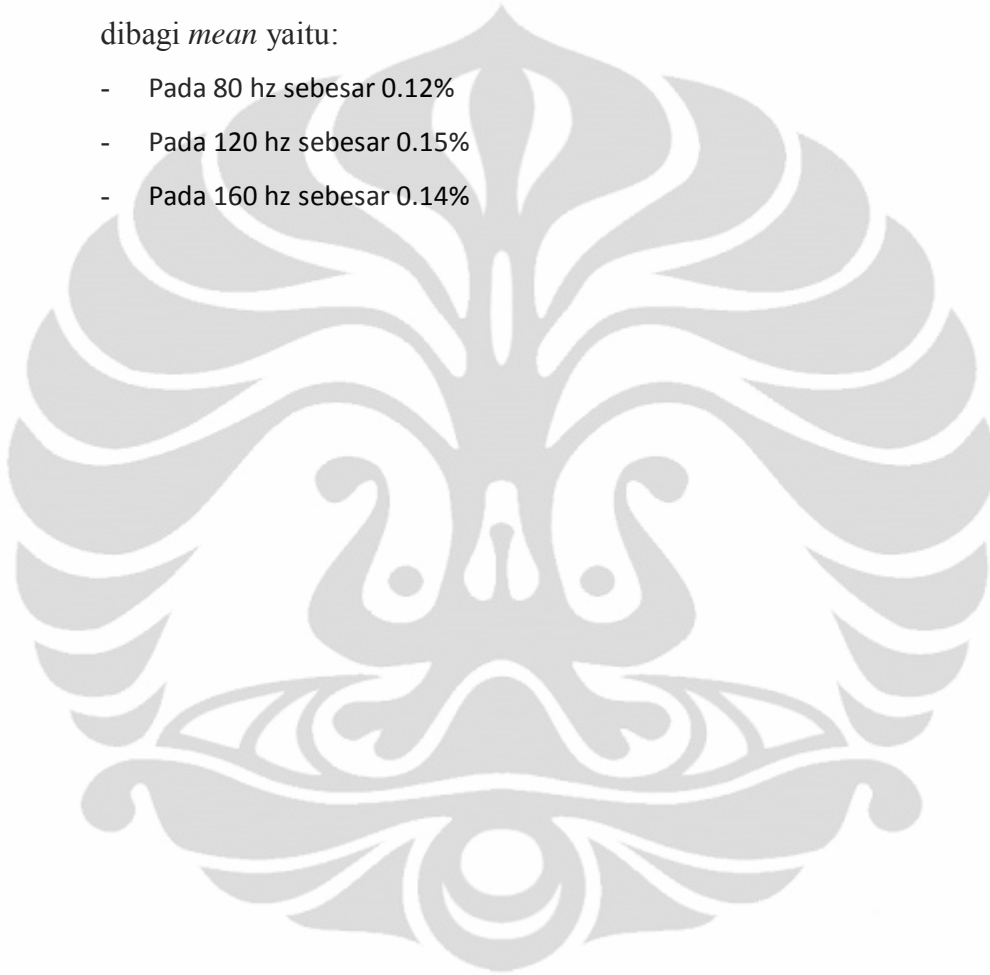
$$SD_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Hasil pengukuran *error standard* dan standard deviasi serta ketakpastian pengukuran yaitu:

<b>Frekuensi</b>	<b>Mean</b>	<b>Standard Deviasi</b>	<b>Standard Error</b>	<b>Uncertainty</b>
80	58.2	0.18	0.04	0.07
120	58.9	0.22	0.05	0.09
160	59.2	0.21	0.04	0.09

Besarnya persentase error pada tiap frekuensi adalah besarnya *uncertainty* dibagi *mean* yaitu:

- Pada 80 hz sebesar 0.12%
- Pada 120 hz sebesar 0.15%
- Pada 160 hz sebesar 0.14%



## BAB 5

### PENUTUP

#### 5.1 Kesimpulan

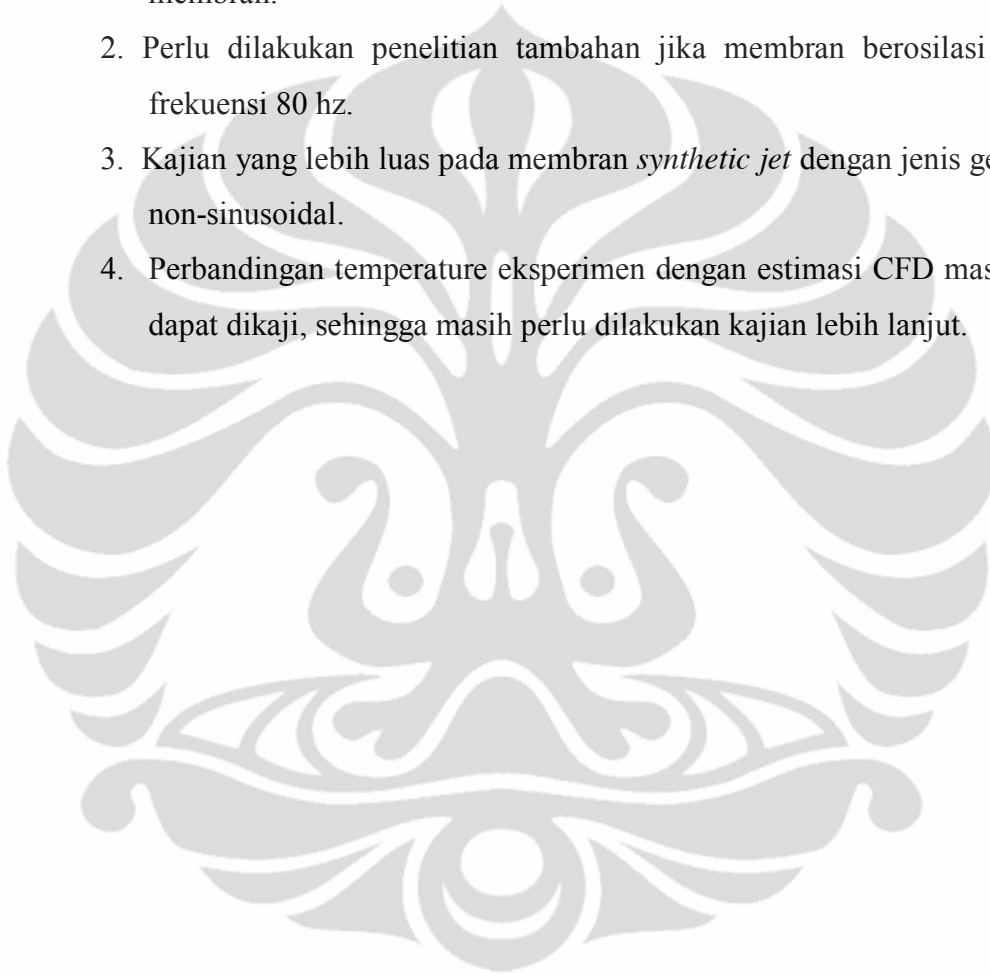
Penelitian mengenai *synthetic jet* dengan gelombang *triangle* telah berhasil menunjukkan karakteristik dan efek pendinginan yang menjanjikan. Sebuah studi komputasional dan eksperimental telah dilakukan pada sebuah modul *synthetic jet* dengan desain orisinal. Dua buah membran piezoelektrik bergetar dan menggerakkan udara dalam *cavity synthetic jet*. Hasil studi menunjukkan adanya pengaruh jumlah fase *suction* dan *discharge* akibat variasi frekuensi osilasi terhadap efek pendinginan. Hasil studi komputasional dengan visualisasi aliran udara menggunakan *software CFD Fluent* memperlihatkan bahwa pergerakan membran berhasil menciptakan aliran udara dengan efek pendinginan (diperlihatkan dengan distribusi kontur kecepatan, vortisitas, dan waktu). Kontur kecepatan menunjukkan momentum yang cukup bagi *synthetic jet* untuk menghasilkan efek pendinginan. Kontur vortisitas menunjukkan potensi aliran *synthetic jet* untuk mengambil dan membuang kalor. Kontur temperatur menunjukkan efek penurunan temperatur akibat adanya *synthetic jet*. Hasil studi eksperimental menunjukkan bahwa terjadinya efek pendinginan oleh *synthetic jet*. Efek pendinginan dengan gelombang *triangle* frekuensi 80 hz menunjukkan adanya penurunan temperatur, tetapi pada frekuensi 120 dan 160 hz memperlihatkan hasil yang buruk. Hal tersebut berarti bahwa pada frekuensi osilasi yang lebih rendah menunjukkan potensi pendinginan yang lebih baik. Koefisien perpindahan kalor pada frekuensi 80 hz juga menunjukkan peningkatan sehingga dapat menghasilkan pendinginan yang baik sedangkan pada frekuensi 120 dan 160 hz menunjukkan adanya kecenderungan penurunan nilai koefisien perpindahan kalor.



## 5.2 Saran

Terdapat beberapa hal yang masih dapat dikembangkan dan dikaji dalam penelitian mengenai *synthetic jet*, yaitu:

1. Perlu dilakukan kajian lebih lanjut mengenai variasi detail desain modul *synthetic jet* seperti ukuran lubang orifis, jumlah orifis, dan jarak antar membran.
2. Perlu dilakukan penelitian tambahan jika membran berosilasi dibawah frekuensi 80 hz.
3. Kajian yang lebih luas pada membran *synthetic jet* dengan jenis gelombang non-sinusoidal.
4. Perbandingan temperature eksperimen dengan estimasi CFD masih belum dapat dikaji, sehingga masih perlu dilakukan kajian lebih lanjut.



## DAFTAR REFERENSI

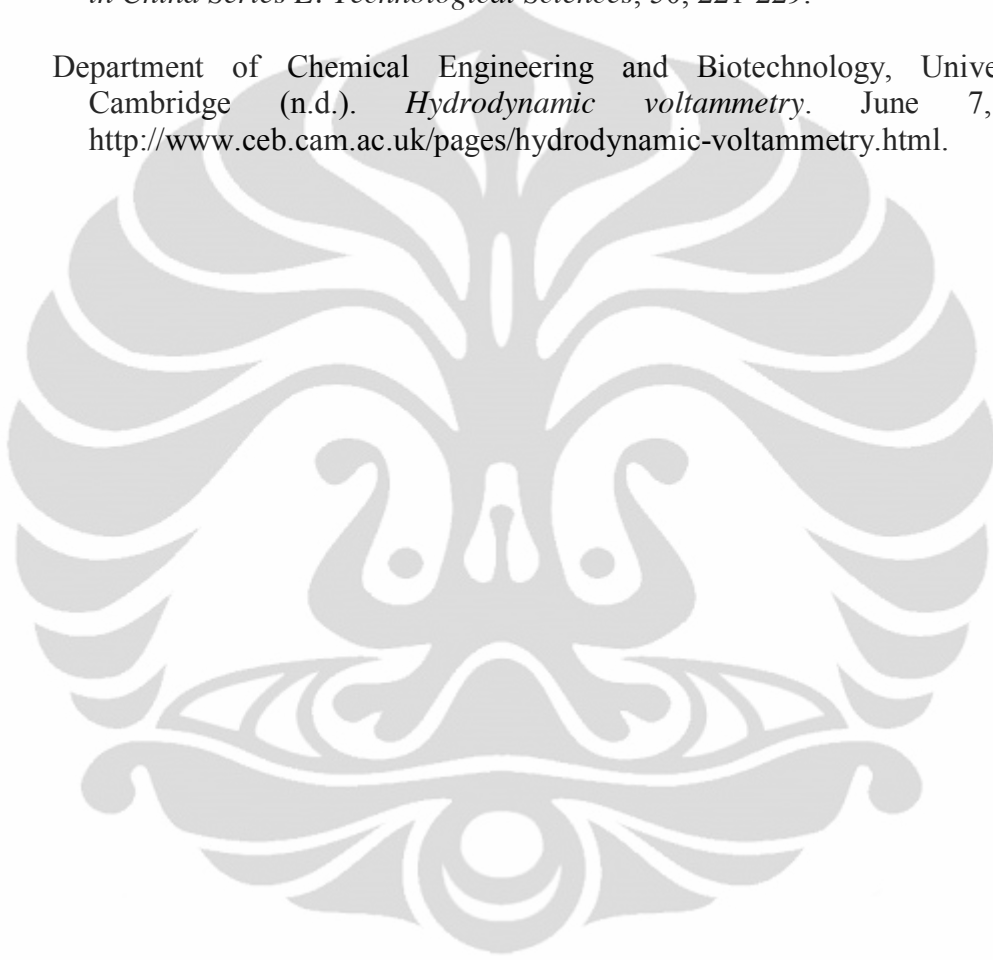
- Haliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2000). *Fundamental of Physics* (6th ed.). New York: John Willey & Sons, Inc.
- Harinaldi, Rhakasywi, D., & Defriadi, R. (2011). Flow and heat transefer characteristics of an impinging synthetic air jet under sinusoidal and triangular wave forcing. *IJET-IJENS: 2011*.
- Holman, J.P. (1986). *Heat Transfer* (6th ed.). New York: McGraw-Hill.
- Jagannatha, D., Narayanaswamy, R., & Chandratilleke, T.T. (2007). Performance characteristics of a synthetic jet module for electronic cooling. pp. 1-10.
- King, A.J.C., & Jagannatha, D. (2009, July). *Simulation of synthetic jets with non-sinusoidal forcing functions for heat transfer applications*. Paper presented at the 18<sup>th</sup> World IMACS / MODSIM Congress, Cairns, Australia.
- Lasance, C.J.M., & Aarts, R.M. (2008). *Synthetic jet cooling partI: Overview of heat transfer and acoustics*. Paper presented at the 24<sup>th</sup> IEEE SEMI-THERM Symposium.
- Mahalingam, Raghav (2007). *Modeling of synthetic jet ejectors for electronics cooling*. Paper presented at the 23<sup>rd</sup> IEEE SEMI-THERM Symposium.
- Mahalingam, R., Heffington, S., Lee, J., & Schwickert, M. (2006). Newisys server processor cooling augmentation using synthetic jet ejectors. *IEEE*, pp. 705-709.
- McGuinn, A., Persoons, T., Valiorgue, P., O'Donovan, T.S., & Murray, D.B. (2008). *Heat transfer measurements of an impinging synthetic air jet with constant stroke length*. Paper presented at the 5<sup>th</sup> European Thermal-Sciences Conference, Netherlands.
- Munson, Bruce R., Young, Donald F., Okiishi, Theodore H. (2004). *Mekanika Fluida* (Harinaldi & Budiarmo, Penerjemah). Jakarta: Erlangga.
- Persoons, T., O'Donovan, T.S., & Murray, D.B. (2008, July). *Improving the measurement accuracy of PIV in a synthetic jet flow*. Paper presented at the 14<sup>th</sup> International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal.
- Sharma, R.N. (2007, December). *Some insights into synthetic jet actuation from analytical modelling*. Paper presented at the 16<sup>th</sup> Australasian Fluid Mechanics Conference.

Tesar, V., Chuan, H.H., & Zimmerman, W.B. (2005). No-moving-part hybrid-synthetic jet actuator. *SNA-4850*, pp. 1-11.

Tuakia, Firman. (2008). *Dasar - Dasar CFD menggunakan FLUENT*. Bandung: Informatika.

Zhang, JingZhou, & Tan, XiaoMing (2007). Experimental study on flow and heat transfer characteristics of synthetic jet driven by piezoelectric actuator. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 50, 221-229.

Department of Chemical Engineering and Biotechnology, University of Cambridge (n.d.). *Hydrodynamic voltammetry*. June 7, 2011. <http://www.ceb.cam.ac.uk/pages/hydrodynamic-voltammetry.html>.





Data Temperatur *Synthetic Jet* Gelombang *Triangle*  
pada Frekuensi 80 hz, 120 hz, dan 160 hz

Menit ke-	80 hz	120 hz	160 hz
0	59	59	59
5	58.3	58.4	58.5
10	58.1	58.4	58.7
15	58.1	58.4	59
20	58.1	58.7	58.9
25	58.1	58.8	59.2
30	58.3	58.8	59.2
35	58.2	59	59.3
40	58.2	58.9	59.3
45	58.2	59	59.2
50	58.2	59	59.3
55	58.2	59	59.2
60	58.2	59.1	59.2
65	58.2	59.1	59.2
70	58.2	59.2	59.4
75	58.2	59.1	59.2
80	58.2	59	59.3
85	58.1	58.9	59.3
90	58.3	59.1	59.3
95	58.3	59	59.3
100	58.4	59	59.3
105	58.2	59	59.3
110	58.2	59.1	59.3
115	58.2	58.9	59.3
120	58.2	58.9	59.4

\*Catatan: Satuan temperatur dalam °C

Data *Heat Transfer Coefficient Synthetic Jet Gelombang Triangle*  
pada Frekuensi 80 hz, 120 hz, dan 160 hz

Menit ke-	80 hz	120 hz	160 hz
0	29.84	29.84	29.84
5	30.53	30.42	30.33
10	30.73	30.42	30.13
15	30.73	30.42	29.84
20	30.73	30.13	29.93
25	30.73	30.03	29.64
30	30.53	30.03	29.64
35	30.63	29.84	29.55
40	30.63	29.93	29.55
45	30.63	29.84	29.64
50	30.63	29.84	29.55
55	30.63	29.84	29.64
60	30.63	29.74	29.64
65	30.63	29.74	29.64
70	30.63	29.64	29.46
75	30.63	29.74	29.64
80	30.63	29.84	29.55
85	30.73	29.93	29.55
90	30.53	29.74	29.55
95	30.53	29.84	29.55
100	30.42	29.84	29.55
105	30.63	29.84	29.55
110	30.63	29.74	29.55
115	30.63	29.93	29.55
120	30.63	29.93	29.46

\*Catatan: Satuan *heat transfer coefficient* dalam  $W/m^2K$