



**UNIVERSITAS INDONESIA**

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

**SKRIPSI**

**KENFERY  
0706267130**

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



**UNIVERSITAS INDONESIA**

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

**SKRIPSI**

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

**KENFERY  
0706267130**

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

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Kenfery  
NPM : 0706267130  
Tanda Tangan :   
Tanggal : 28 Juni 2011

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Kenfery  
NPM : 0706267130  
Program Studi : Teknik Mesin  
Judul Skripsi : Karakteristik Pendinginan pada *Heat Sink*  
menggunakan *Synthetic Jet* dengan Fungsi  
Gelombang Sinusoidal

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



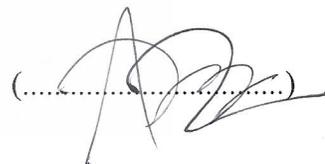
Penguji : Prof. Dr. Ir. Budiarmo, M.Eng



Penguji : Dr. Ir. Warjito, M.Eng



Penguji : Ardiansyah, ST. M.Eng



Ditetapkan di : Depok (Universitas Indonesia)

Tanggal : 28 Juni 2011

## UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas 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. Dalam penulisan skripsi ini, saya sangat berterima kasih kepada berbagai pihak atas bantuan dan bimbingannya karena sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini tanpa bantuan dan bimbingan tersebut. Oleh karena itu saya mengucapkan terima kasih kepada :

1. Dr. Ir. Harinaldi, M.Eng, atas segala waktu, tenaga dan kesabaran dalam membimbing dan mengarahkan dari awal sampai akhir pembuatan skripsi ini.
2. Damora Rhakasywi ST., M.T dan Rikko Defriadi ST. selaku mahasiswa S3 dan S2 yang telah memberikan banyak ilmu dan pengalamannya dalam pembuatan alat pengujian skripsi.
3. Orang tua dan keluarga yang telah memberikan doa dan dukungannya kepada saya untuk tetap semangat.
4. Edward sebagai rekan satu tim yang selalu bersemangat, kreatif dan aktif untuk mengerjakan skripsi ini.
5. Teman – teman lab mekanika fluida dan lab pendingin yang banyak memberikan bantuan, saran dan motivasinya dalam mengerjakan skripsi.
6. Teman – teman teknik mesin 2007 yang telah berkontribusi membantu dan mendukung skripsi ini.
7. Serta pihak-pihak yang tidak bisa saya sebutkan satu-persatu

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa 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 : Kenfery  
NPM : 0706267130  
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 SINUSOIDAL**

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 mempublikasikan 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



(Kenfery)

## ABSTRAK

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

Alat pendingin merupakan hal yang sangat penting dalam suatu sistem elektronik. Beban panas yang semakin besar akibat miniaturisasi produk elektronik menyebabkan diperlukannya sistem pendingin baru yang lebih efisien atau mempunyai efisiensi termal yang tinggi. Penelitian ini akan membahas karakteristik aliran dan perpindahan panas konveksi pada *impinging jet* sintetik yang akan diosilasikan dengan menggunakan gelombang sinusoidal. Penelitian ini dilakukan dalam dua tahapan yaitu tahap komputasional dan eksperimental.

Tahap komputasional pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan software *CFD Fluent* dengan model turbulensi *k- $\omega$  SST* dengan elemen *meshing* Tet/Hybrid tipe Tgrid untuk melihat distribusi aliran pada jet sintetik, sedangkan pada tahap eksperimental akan dilihat karakteristik perpindahan panas konveksi dengan menggerakkan membran jet sintetik pada gelombang sinusoidal dengan variasi frekuensi 80 Hz, 120 Hz dan 160 Hz dan amplitudo 1 m/s dengan menggunakan *function generator*. Hasil penelitian menunjukkan adanya pengaruh gelombang dan frekuensi yang signifikan terhadap laju perpindahan panas yang didapat. Pada penelitian ini juga terlihat, laju perpindahan panas konveksi yang terbaik terjadi ketika membran jet sintetik diosilasikan pada frekuensi rendah yaitu pada frekuensi 80 Hz.

***Kata Kunci : Efisiensi, Impinging Jet Sintetik, Gelombang Sinusoidal, CFD Fluent, Model Turbulensi k- $\omega$  SST, Meshing, Function Generator, Laju Perpindahan Panas Konveksi.***

## ABSTRACT

Name : Kenfery  
Study Program : Mechanical Engineering  
Title : **Cooling Characteristic on Heat Sink with Synthetic Jet using Sine Wave Function**

Cooling system is very important in an electronic system. A greater heat load due to miniaturization of electronic products causes the need for a new cooling system that works more efficient and has a high thermal efficiency. This research will discuss the characteristics of flow and convective heat transfer in the impinging synthetic jet that will oscillate using sinusoidal wave. This research was conducted in two stages, computational and experimental stage.

Computational stage was conducted by Fluent CFD software with turbulence model of  $k-\omega$  SST with meshing elements Tet / Hybrid Tgrid type to see the flow distribution in synthetic jet. In the experimental phase, it will be seen the characteristics of convective heat transfer by moving the synthetic jet membrane using sinusoidal wave with a variation frequency 80 Hz, 120 Hz dan 160 Hz and amplitude of 1 m / s by using a function generator. The results showed the significant influence of waves mode and frequencies to the heat transfer rate that obtained. In this research, the best convective heat transfer rate was occurred when the synthetic jet membrane was oscillated at low frequency of 80 Hz.

***Key Words : Efficiency, Impinging Synthetic Jet, Sine Wave, CFD Fluent, Turbulance Model  $k-\omega$  SST, Meshing, Function Generator, Convective Heat Transfer Rate***

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
UCAPAN TERIMA KASIH.....	iv
LEMBAR 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 Pembatasan Masalah.....	1
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 Jet Sintetik.....	4
2.2 Gelombang.....	8
2.3 Perpindahan Kalor.....	13
2.3.1 Perpindahan Kalor Konduksi.....	13
2.3.2 Perpindahan Kalor Konveksi.....	14
2.3.3 Perpindahan Kalor Radiasi.....	15
2.4 Aliran Fluida.....	16
2.4.1 Aliran Laminar.....	16
2.4.2 Aliran Transisi.....	16
2.4.3 Aliran Turbulen.....	17
2.5 CFD Fluent.....	18
2.5.1 Gambit.....	18

2.5.2 Fluent .....	19
<b>BAB 3. SISTEM PENDINGINAN DENGAN JET SINTETIK.....</b>	<b>22</b>
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	22
3.2 Modul Jet Sintetik.....	23
3.3 Tahap Komputasional.....	24
3.4 Tahap Eksperimen .....	25
3.4.1 Komponen dan Peralatan Tambahan .....	30
3.4.2 Prosedur Pengambilan Data.....	32
<b>BAB 4. ANALISA DATA .....</b>	<b>33</b>
4.1 Analisa Data Komputasional.....	33
4.1.1 <i>Instantaneous Vorticity Contours</i> .....	33
4.1.2 <i>Instantaneous Velocity Contours</i> .....	36
4.1.3 <i>Instantaneous Temperature Contours</i> .....	38
4.1.4 <i>Suction and Discharge Contours</i> .....	40
4.2 Analisa Data Eksperimental .....	45
4.2.1 Analisa Perubahan Temperatur terhadap Waktu .....	45
4.2.2 Analisa Koefisien Perpindahan Panas Konveksi terhadap Waktu .....	46
4.3 TingkatKepercayaan ( <i>Level of Confidence</i> ) dan Persentase Error Pengukuran Penelitian.....	48
<b>BAB 5. KESIMPULAN .....</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 .....	10
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 $v$ .....	12
Gambar 2.10	Skematik perpindahan kalor konveksi .....	14
Gambar 2.11	Aliran Laminar .....	16
Gambar 2.12	Aliran Turbulen.....	17
Gambar 2.13	Skematik proses kerja step by step <i>Gambit-CFD</i> .....	18
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian .....	22
Gambar 3.2	Model fisik <i>synthetic jet</i> .....	23
Gambar 3.3	Gambaran daerah komputasi jet sintetik .....	24
Gambar 3.4	<i>Experimental setup</i> .....	26
Gambar 3.5	<i>Thermostat</i> .....	26
Gambar 3.6	<i>Heater Mat</i> .....	27
Gambar 3.7	Jet sintetik tampak atas dan tampak bawah.....	27
Gambar 3.8	Digital multimeter .....	28
Gambar 3.9	<i>Heat sink</i> .....	29
Gambar 3.10	<i>Function Generator</i> .....	29

Gambar 3.11	Komputer.....	30
Gambar 3.12	<i>Thermocouple</i> .....	31
Gambar 3.13	<i>Glue Gun</i> .....	31
Gambar 3.14	<i>Hygrometer</i> .....	32
Gambar 4.1	<i>Instantaneous Vorticity Contours</i> yang diosilasikan pada gelombang sinusoidal dengan frekuensi 80 Hz, 120 Hz dan 160 Hz.....	35
Gambar 4.2	<i>Instantaneous Velocity Contours</i> yang diosilasikan pada gelombang sinusoidal dengan frekuensi 80 Hz, 120 Hz dan 160 Hz.....	37
Gambar 4.3	<i>Instantaneous Temperature Contours</i> yang diosilasikan pada gelombang sinusoidal dengan frekuensi 80 Hz, 120 Hz dan 160 Hz.....	39
Gambar 4.4	Skema pergerakan <i>synthetic jet</i> .....	40
Gambar 4.5	Kontur vortisitas pada fase <i>suction</i> dan <i>discharge</i> dari 1/4 sampai 4/4.....	42
Gambar 4.6	Kontur kecepatan pada fase <i>suction</i> dan <i>discharge</i> dari 1/4 sampai 4/4.....	43
Gambar 4.7	Kontur temperatur pada fase <i>suction</i> dan <i>discharge</i> dari 1/4 sampai 4/4.....	44
Gambar 4.8	Temperatur pendinginan jet sintetik terhadap waktu.....	45
Gambar 4.9	Koefisien perpindahan panas konveksi jet sintetik terhadap waktu.....	47

## DAFTAR TABEL

Tabel Kondisi Komputasi .....	24
-------------------------------	----

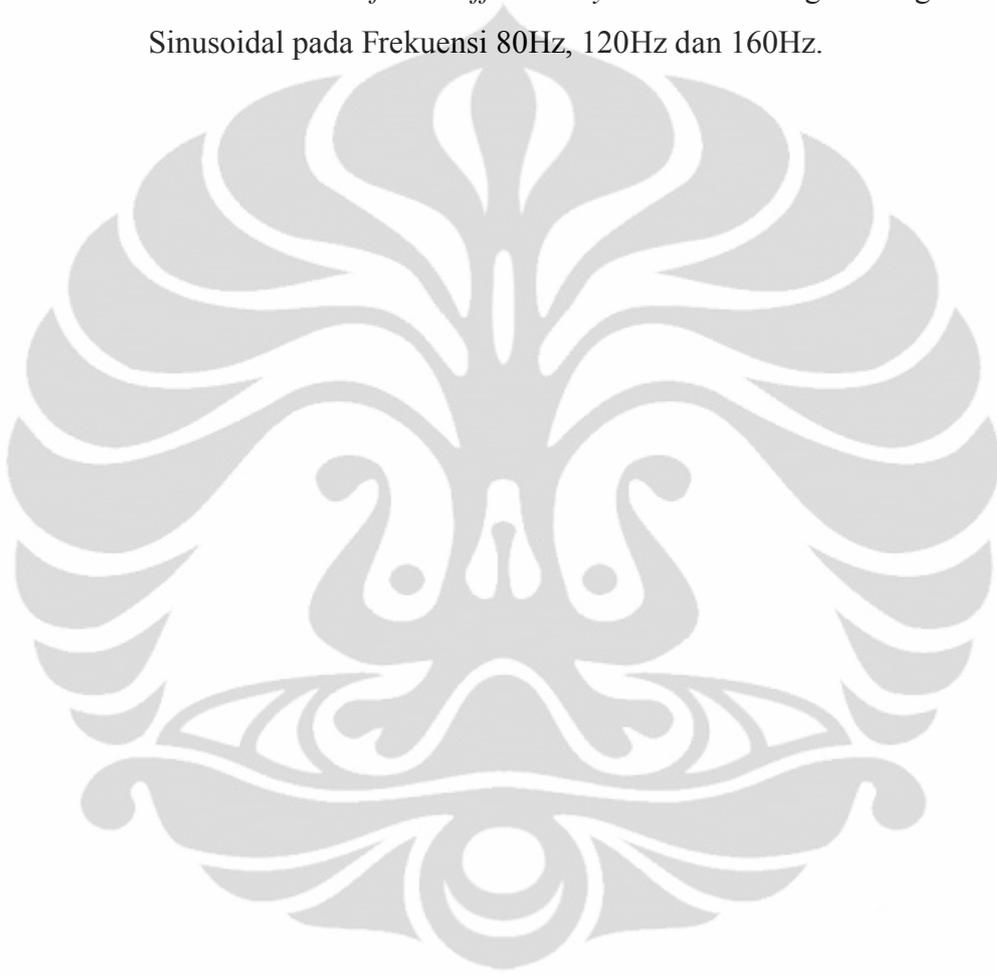


## DAFTAR NOTASI

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 freestream (°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-Boltzman (5,669x10 <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* dengan Fungsi Gelombang Sinusoidal pada Frekuensi 80Hz, 120Hz dan 160Hz.
- L2 Data *Heat Transfer Coefficient Synthetic Jet* dengan Fungsi Gelombang Sinusoidal pada Frekuensi 80Hz, 120Hz dan 160Hz.



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Di dunia saat ini, teknologi pada elektronik berkembang pesat. Produk-produk elektronik semakin berukuran kecil dan menggunakan daya yang rendah untuk menjalankannya seperti pada komputer portabel dan juga alat telekomunikasi. Sejalan dengan perkembangan tersebut, dibutuhkan sistem pendingin pada produk elektronik tersebut karena banyak konsumen mengeluh tentang banyaknya masalah pada produk mereka mengenai sistem pendinginannya, dimana konsumen menginginkan sistem pendingin yang efisien dan juga tidak bising. Saat ini alat-alat elektronik dijalankan menggunakan sumber daya kering (*dry cell*). Ini menjadi tinjauan lain karena sistem pendingin diharapkan mengkonsumsi daya yang kecil untuk menghemat daya pada alat elektronik tersebut. Salah satu sistem pendinginan saat ini pada alat elektronik masih menggunakan sebuah kipas dan untuk menjawab permasalahan di atas maka dipilihlah jet sintetik untuk menggantikan kipas dimana diharapkan jet sintetik mempunyai efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan kipas konvensional saat ini.

Jet sintetik merupakan sebuah jet seperti aliran gerak fluida yang dibentuk oleh perubahan waktu ke waktu, penghisapan dan penyemburan fluida yang berulang melewati lubang keluar, dengan gerakan diafragma per periode waktu yang dibangun menjadi satu kesatuan dengan dinding ruangan.

### 1.2 Pembatasan Masalah

Pada laporan ini akan dibahas mengenai sistem pendinginan pada heat sink menggunakan jet sintetik yang telah di desain sebelumnya dan kemudian dikontrol menggunakan function generator. Pada percobaan ini menggunakan gelombang sinusoidal untuk menggerakkan membran pada jet sintetik agar berosilasi dengan variasi frekuensi gelombangnya 80Hz, 120Hz dan 160Hz dan dengan amplitudo 1m/s pada suhu temperatur lingkungan +/-

28 °C – 30 °C. Kemudian dilakukan simulasi aliran dan analisa data perubahan panas dari waktu ke waktu serta analisa terhadap koefisien perpindahan panas pada sintetik jet dengan variasi frekuensi gelombang tersebut.

### 1.3 Metodologi

Dalam pengerjaan laporan ini dilakukan pengumpulan data dengan menggunakan

1. Studi Literatur

Digunakan referensi dari buku dan penelusuran internet sebagai informasi tambahan mengenai dasar sistem pendinginan pada sintetik jet dan perhitungan yang ada

2. Software CFD FLUENT

Software ini digunakan untuk mensimulasikan aliran udara yang terjadi di dalam *Synthetic Jet*.

3. Software Autodesk Inventor

Software ini digunakan untuk mendesain *Synthetic Jet*.

### 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini secara umum adalah mengembangkan sistem pendinginan pada mikroelektronik menggunakan teknologi jet sintetik. Diharapkan sistem pendinginan menggunakan jet sintetik ini mempunyai efisiensi termal yang tinggi dengan melihat karakteristik perpindahan panas pada setiap variasi frekuensi gelombang sinusoidal yang diberikan pada jet sintetik, dimana variasi frekuensi gelombang sinusoidal itu adalah 80 Hz, 120 Hz dan 160 Hz dengan amplitudo yang tetap. Karakteristik perpindahan panas pada jet sintetik dapat dikaji dengan melihat koefisien perpindahan panas konveksi dari waktu ke waktu.

### 1.5 Sistematika Penulisan

Penulisan hasil penelitian ini dibagi dalam beberapa bab yang saling berhubungan. Adapun urutan dalam penulisan laporan ini terlihat pada uraian dibawah ini :

**BAB 1** :Pada bab ini dijelaskan tentang latar belakang penelitian, tujuan, batasan masalah, dan sistematika penulisan penelitian.

**BAB 2** :Pada bab ini diuraikan tentang studi literatur yang berkaitan dengan penelitian skripsi ini.

**BAB 3** :Pada bab ini berisi prosedur penelitian, daftar alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian.

**BAB 4** :Bab ini berisi data-data hasil penelitian dan analisa dari hasil penelitian tersebut yang dibandingkan dengan hasil dari studi literatur

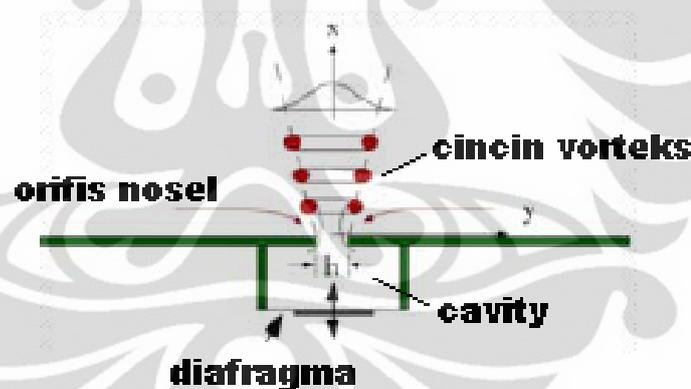
**BAB 5** :Bab ini berisikan kesimpulan akhir berdasarkan hasil dan pembahasan penelitian ini

## BAB 2

### DASAR TEORI

#### 2.1 Jet Sintetik

Jet Sintetik adalah jet seperti aliran gerak fluida yang dibentuk oleh perubahan waktu ke waktu, suction dan ejection fluida yang berulang melewati orifis, dengan gerakan diafragma per periode waktu yang dibangun menjadi satu kesatuan dengan dinding ruangan (Zhang & Tan, 2007). Jet sintetik digerakkan oleh sebuah aktuator berupa membran *piezoelektrik* yang memiliki input *massa netto* nol tetapi menghasilkan output momentum *netto* tidak nol. Jet sintetik secara visual dapat digambarkan seperti pada gambar 2.1.



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

Proses terbentuknya jet sintetik telah diteliti dan ditunjukkan dalam beberapa hasil penelitian yang diantaranya telah dilakukan oleh Jagannatha dkk. (2007) dan Zhang & Tan (2007). Proses-proses terbentuknya jet sintetik secara garis besar terbentuk sebagai berikut. Di dalam *cavity* jet sintetik terdapat suatu diafragma atau membran dimana membran tersebut akan

digerakkan secara periodik. Pada saat membran tersebut berosilasi, akan terbentuk getaran yang mengakibatkan udara di dalam *cavity* ikut digerakkan. Kemudian fluida udara di dalam *cavity* dipaksa bergerak melalui dua fase yaitu fase hisap (*suction*) dan fase semburan (*ejection*). Kedua fase ini terbentuk karena adanya lubang orifis pada sisi *cavity* dan gerakan dari membran jet sintetik. Pada saat aliran fluida keluar dari *cavity* jet sintetik, aliran fluida mengalami separasi yang dikarenakan adanya fase hisap (*suction*) dan fase semburan (*ejection*) sehingga terbentuk pasangan cincin *vortex*. Separasi aliran ini terjadi karena amplitudo getaran membran yang cukup besar sehingga aliran fluida saat keluar melalui orifis membentuk lapisan geser dengan udara sekitar. Lapisan geser dan turbulensi pada sisi luar mengakibatkan terbentuknya pasangan cincin *vortex* dan kemudian cincin-cincin *vortex* ini dipergunakan untuk menghasilkan efek perpindahan panas konvektif kontrol aliran termal yang lebih baik terhadap suatu *heat sink* yang dipasang.

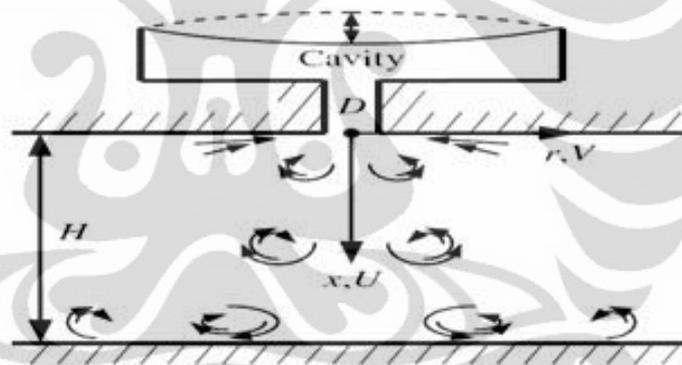
Setiap tahunnya, jet sintetik dikembangkan terus menerus dimana diharapkan jet sintetik dapat menggantikan pendinginan konvensional saat ini seperti fan. Jet sintetik memiliki beberapa keuntungan dibandingkan dengan sistem pendinginan konvensional fan. Pada sistem fan kebutuhan suplai udara dipenuhi dengan mengalirkan fluida udara dari satu tempat ke tempat lainnya, sedangkan sistem jet sintetik menawarkan keuntungan utama yaitu hanya menggunakan udara yang sama yang terus diputar oleh sistemnya (Sharma, 2007). Selain itu fan dinilai kurang efisien pada besarnya panas yang dibuang terhadap besarnya volume aliran (Mahalingam dkk, 2006). Keuntungan lain dari sistem pendinginan menggunakan jet sintetik 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

- Masalah *fouling* yang lebih rendah, komponen bergerak dapat dilindungi dari ambient
- Miniaturisasi produk lebih mudah dibanding fan
- Memiliki kemungkinan peredaman kebisingan yang lebih simple

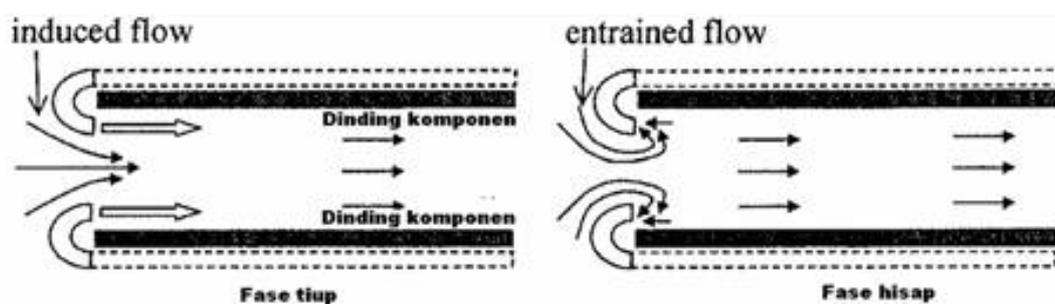
Jet sintetik juga memiliki kelemahan, terutama pada jenis *impinging*. Hal ini terlihat pada fluida udara yang dihisap kembali pada fase *suction* saat membran jet sintetik berosilasi. Jika udara yang dibuang pada fase *discharge* terdapat udara panas dan dihisap kembali ke dalam *cavity* maka akan timbul akumulasi panas dalam *cavity* jet sintetik (Tesar, 2005).

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

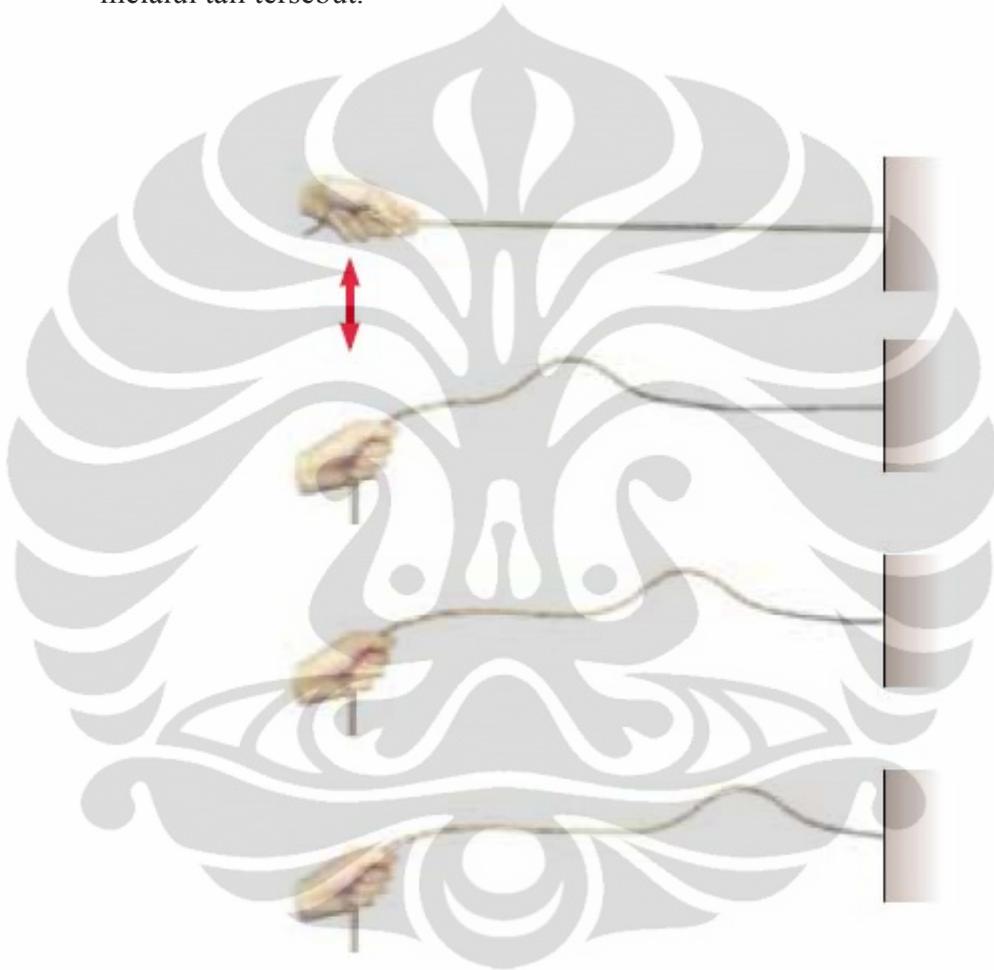
Model *impinging* dan *cross-flow* jet memiliki perbedaan pada bagian bidang aliran fluida yang dituju. Pada *Impinging* jet, arah aliran *vortex* diarahkan menuju *heated wall* sehingga aliran *vortex* membentur *heated wall* dan kemudian aliran *vortex* bergerak sepanjang dinding, sementara *cross-flow* jet mengarahkan *vortex* yang keluar dari 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).

Jet sintetik telah diteliti oleh banyak orang, akan tetapi pengetahuan mengenai jet sintetik sebenarnya masih sangat terbatas. Seperti pada penelitian jet sintetik yang diteliti oleh King & Jagannatha(2009) dimana mereka mengatakan bahwa perbandingan bilangan Nusselt pada jet sintetik dengan menggunakan gelombang sinusoidal dan non-sinusoidal menunjukkan koefisien *heat transfer* yang lebih baik sekitar 5-10% lebih baik untuk gelombang non-sinusoidal. King dan Jagannatha telah menunjukkan bahwa penelitian mengenai jet sintetik menggunakan gelombang non-sinusoidal masih sangat kurang, padahal penggunaan gelombang non-sinusoidal untuk jet sintetik menunjukkan koefisien *heat transfer* yang lebih baik. Oleh karena itu, penggunaan gelombang lain yang umum seperti triangle dan square perlu dilakukan.

Jet sintetik sendiri saat ini dikembangkan agar dapat menggantikan sistem pendinginan konvensional saat ini seperti fan. Akan tetapi sebelum perkembangan ini, pada awalnya jet sintetik digunakan dalam bidang aerodinamika untuk memodifikasi lapisan batas agar dapat mengurangi *drag* atau gaya hambat dan kemudian jet sintetik berkembang dan kemudian dipakai dalam bidang perpindahan kalor untuk kontrol aliran termal konvektif, sehingga penerapannya masih relatif baru.

## 2.2 Gelombang

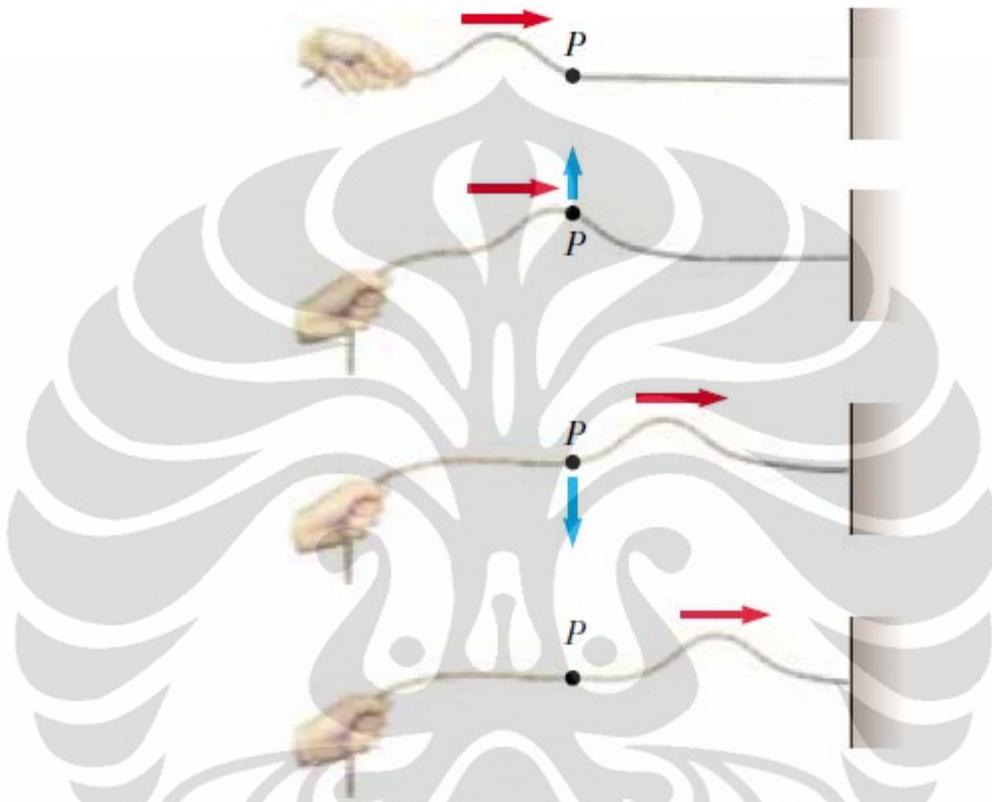
Gelombang merupakan perubahan energi dan momentum dari satu titik di dalam ruang ke titik lain tanpa perpindahan materi. Contohnya pada sebuah tali yang digerakkan dimana ujungnya diikat di sebuah dinding, maka ketika tali itu digerakkan, energi dan momentum yang diberikan akan menjalar melalui tali tersebut.



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

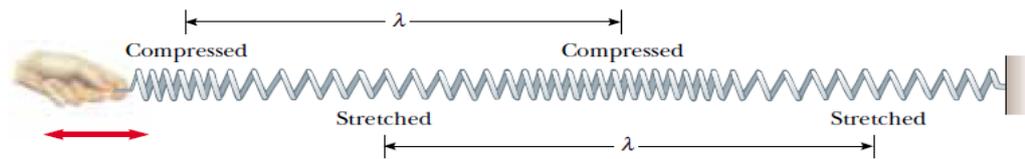
Di alam semesta ini terdapat banyak gelombang. Gelombang dibedakan menjadi dua jenis yaitu: 1) berdasarkan arah rambat gelombang, 2) berdasarkan mediumnya. Berdasarkan arah rambat gelombang, gelombang dibedakan lagi menjadi dua yaitu gelombang transversal dan gelombang longitudinal. Gelombang transversal merupakan gelombang yang arah gerak

partikelnya tegak lurus dengan arah rambatannya. Contoh gelombang transversal adalah gelombang cahaya dan gelombang pada tali.



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

Sedangkan gelombang longitudinal merupakan gelombang yang arah gerak partikelnya sejajar dengan arah rambatannya. Contoh gelombang ini adalah gelombang bunyi di udara. Gelombang longitudinal ini memiliki rapatan dan regangan tertentu pada bentuk gelombangnya.



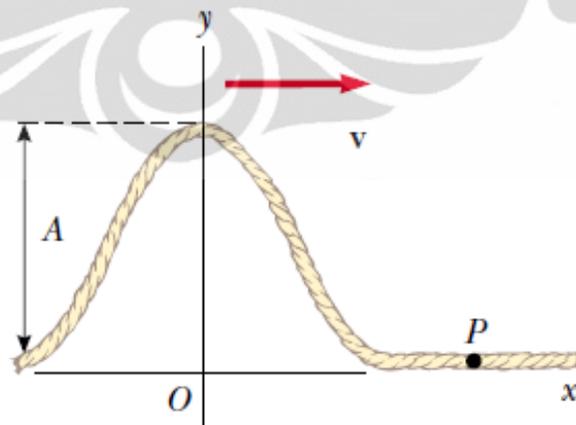
Gambar 2.6 Gelombang Longitudinal

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

Selanjutnya adalah gelombang berdasarkan mediumnya. Gelombang jenis ini dibagi dua yaitu gelombang mekanik dan gelombang elektromagnetik. Gelombang mekanik merupakan gelombang yang energi dan momentumnya dipindahkan melalui suatu medium. Contoh gelombang ini adalah gelombang pada tali dan gelombang bunyi di udara. Gelombang elektromagnetik adalah gelombang yang energi dan momentumnya dibawa oleh medan listrik dan magnet yang dapat menjalar di dalam ruang vakum. Contoh gelombang ini adalah gelombang cahaya, gelombang radio dan sinar X.

Jika kita tinjau sebuah tali yang panjang yang diregangkan pada sumbu  $x$  dan sebuah gelombang transversal bergerak sepanjang tali tersebut, maka pada suatu saat  $t=0$ , bentuk persamaan pada tali tersebut dapat dinyatakan oleh

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

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

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

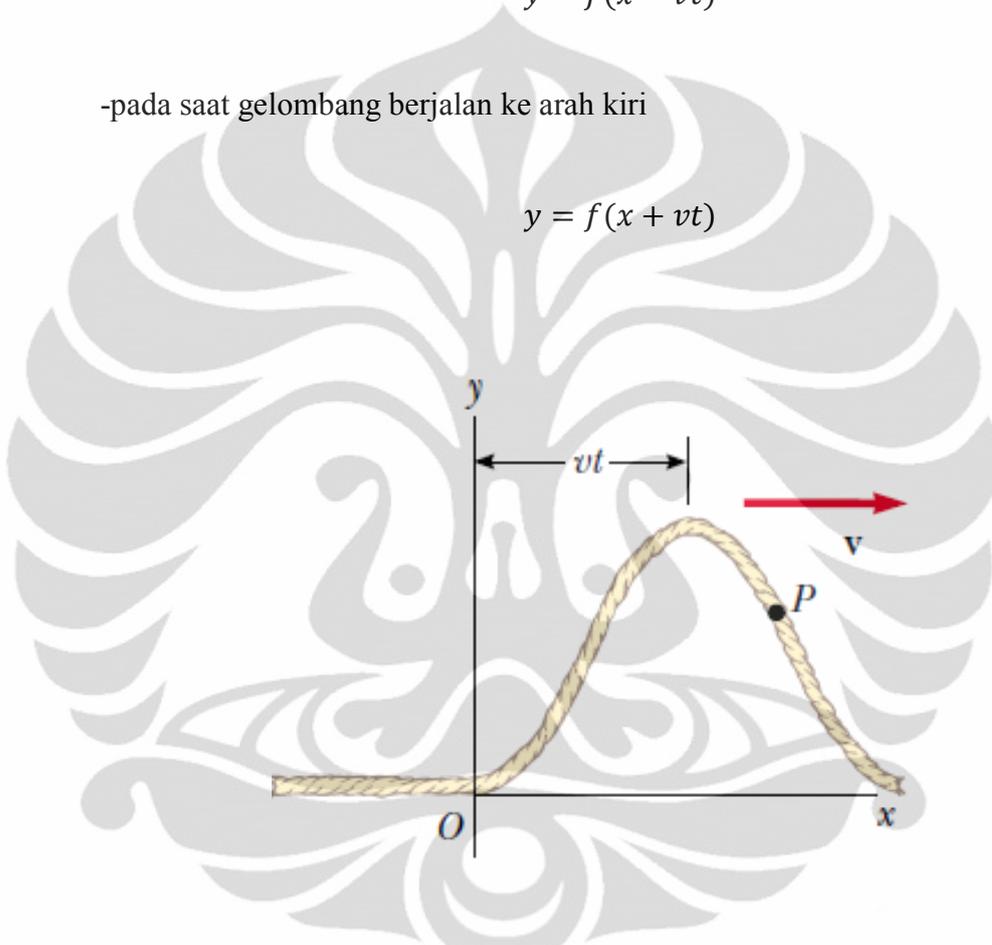
Setelah gelombang berjalan selama  $t$  detik sejauh  $vt$ , dimana  $v$  adalah besarnya kecepatan gelombang yang dianggap konstan maka persamaan pada tali tersebut dapat dinyatakan oleh

-pada saat gelombang berjalan ke arah kanan

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

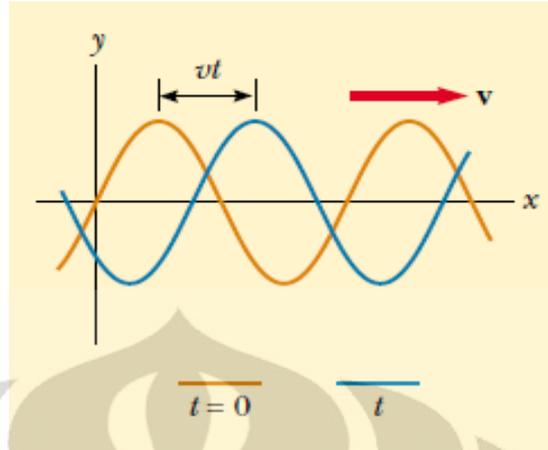
-pada saat gelombang berjalan ke arah kiri

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



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 terdiri dari berbagai macam di antaranya adalah gelombang sinusoidal dan gelombang segitiga. Gelombang sinusoidal merupakan gelombang yang mempunyai bentuk kurva yang sama dengan kurva fungsi  $\sin \theta$  terhadap  $\theta$ . Jika kita lihat gambar 2.9, kurva merah menandakan sebuah gelombang sinusoidal berjalan pada  $t=0$  dan kurva biru menandakan gelombang sinusoidal tersebut berjalan setelah  $t$  detik, maka fungsi yang menggambarkan posisi dari partikel medium dimana gelombang sinusoidal berjalan dapat ditulis

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

dimana  $A$  adalah amplitude,  $\lambda$  adalah panjang gelombang. Jika gelombang bergerak ke arah 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 menjadi,

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

Selain persamaan di atas, kita juga dapat menulis fungsi gelombang dengan mendefinisikan *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 segitiga juga cukup penting karena banyak diaplikasikan pula. Gelombang segitiga dapat pula dikatakan sebagai bentuk gelombang non-sinusoidal dengan bentuk triangular. Gelombang triangle hanya mengandung bilangan harmonic ganjil yang cukup tinggi dibanding gelombang lain seperti gelombang square. Fungsi gelombang triangle dinyatakan dengan deret *Fourier* yaitu:

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

### 2.3 Perpindahan Kalor

Perpindahan kalor adalah suatu bidang ilmu yang menganalisa perpindahan energi akibat terjadinya gradien suhu pada benda atau suatu material. Energi yang berpindah tersebut disebut kalor atau panas dan secara umum perpindahan kalor dibagi menjadi tiga, yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi.

#### 2.3.1 Perpindahan kalor konduksi

Perpindahan kalor konduksi merupakan perpindahan panas dari temperatur tinggi ke temperatur rendah dimana perpindahan kalor tersebut terjadi secara hantaran melalui benda padat dan laju perpindahan kalor berbanding dengan gradient suhu normal:

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

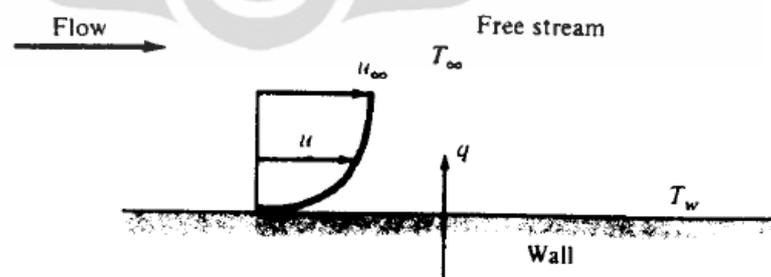
Dengan memasukkan konstanta proporsionalitas atau tetapan kesebandingan:

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

di mana  $q$  merupakan laju perpindahan kalor dan  $\partial T/\partial x$  merupakan gradient suhu dari perpindahan kalor. Konstanta positif  $k$  merupakan konduktivitas atau kehantaran termal benda, sementara tanda minus menandakan pemenuhan hukum kedua termodinamika dimana hukum kedua termodinamika menyebutkan 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 merupakan perpindahan kalor yang terjadi pada permukaan suatu benda (tidak padat) dengan suatu fluida dikarenakan adanya pergerakan dari partikel-partikel fluida pada dua temperature yang berbeda. Mekanisme perpindahan kalor konveksi terdiri atas dua yaitu difusi dan gerakan fluida. Gerakan fluida ditimbulkan karena adanya perbedaan temperatur pada fluida sehingga terjadi proses perpindahan kalor. Proses perpindahan kalor konveksi dapat digambarkan seperti pada gambar 2.10 di bawah ini.



Gambar 2.10 Skematik perpindahan kalor konveksi

(Sumber: JP.Holman, p.11)

Gambar 2.10 menggambarkan interaksi permukaan suatu dinding dengan medan aliran fluida dimana medan aliran fluida mewakili aliran fluida sepanjang permukaan panas. Interaksi antara permukaan dinding dengan fluida akan menghasilkan medan kecepatan yang bervariasi, dimulai dari nol pada daerah dekat permukaan sampai dengan kecepatan maksimum pada aliran. Jika pada permukaan dinding dengan aliran fluida ini memiliki perbedaan temperatur maka akan membentuk suatu daerah batas termal yang besarnya bervariasi (terdapat distribusi temperature) dari  $T_w$  sampai dengan  $T_\infty$ . Jika besar  $T_w > T_\infty$  maka konveksi akan terjadi.

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

### 2.3.3 Perpindahan kalor radiasi

Mekanisme perpindahan kalor tanpa melalui medium antara disebut radiasi. Radiasi merupakan perpindahan kalor melalui daerah hampa dimana konduksi dan konveksi melakukan perpindahan kalor melalui suatu medium. Dalam termodinamika ditunjukkan bahwa setiap benda hitam memiliki pancaran energi dengan laju sebanding dengan pangkat empat suhu absolut benda tersebut dan berbanding langsung dengan luas permukaan. Persamaan radiasi dapat dinyatakan sebagai berikut:

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

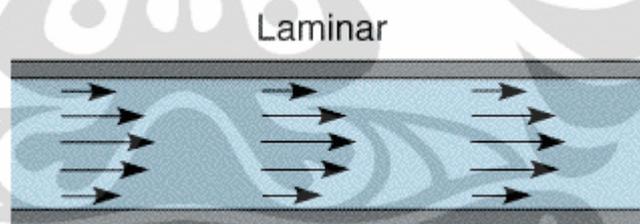
di mana  $\sigma$  merupakan konstanta proporsionalitas atau konstanta Stefan – Boltzmann dengan nilai  $5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ . Persamaan tersebut berlaku hanya untuk radiasi termal saja.

## 2.4 Aliran Fluida

Aliran fluida dibedakan menjadi tiga macam yaitu laminar, transisi, dan turbulen.

### 2.4.1 Aliran Laminar

Aliran fluida yang mengalir dengan lancar pada setiap lapisan disebut aliran laminar. Viskositas yang terjadi di dalam aliran menyebabkan efek peredaman gerakan antar lapisan fluida dengan dinding. Aliran laminar ini dapat digambarkan pada gambar 2.11.



Gambar 2.11 Aliran Laminar

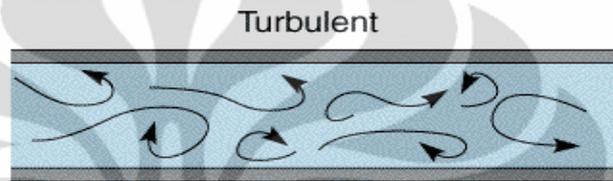
(Sumber: <http://www.ceb.cam.ac.uk/pages/hydrodynamic-voltammetry.html>)

### 2.4.2 Aliran Transisi

Aliran transisi adalah aliran antara dua fase yaitu fase laminar dan fase turbulen dimana aliran laminar mengalami transisi ke aliran turbulen. Aliran ini ditandai dengan adanya fase laminar dan turbulen yang terjadi secara bergantian.

### 2.4.3 Aliran Turbulen

Aliran turbulen merupakan aliran acak pada suatu partikel atau fluida pada suatu lapisan dimana partikel atau fluida tersebut mengalami olakan sehingga terjadi pertukaran momentum antar lapisan dengan intensitas tinggi.



Gambar 2.12 Aliran Turbulen

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

Dalam 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:

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

dimana,

$\rho$  = 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 ( $\text{kg/m.s}$ )

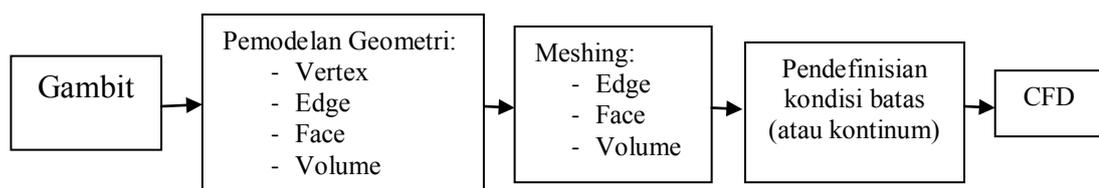
Secara umum untuk aliran di dalam pipa bundar, jika besar bilangan *Reynolds* kurang dari 2100 maka aliran laminar dan jika lebih dari 4000 maka aliran turbulen. Nilai di antara keduanya merupakan aliran transisi.

## 2.5 CFD Fluent

Dalam kehidupan sehari-hari banyak fenomena yang terjadi seperti contohnya fenomena fluida baik dalam bentuk gas maupun cair. Fenomena-fenomena fluida tersebut bisa terjadi dalam bentuk sederhana maupun dalam bentuk kompleks. Dalam mempelajari fenomena fluida yang kompleks tersebut dibutuhkan sebuah *tools* yang dapat memprediksi dan menganalisa aliran fluida yang terjadi pada suatu benda. Salah satu *tools* yang dapat digunakan untuk mempermudah dalam mempelajari fenomena fluida tersebut adalah *software CFD Fluent*. *Software CFD Fluent* ini dikembangkan agar dapat memenuhi kebutuhan 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*) adalah alat *preprocessor* yang dibuat untuk membantu menciptakan model dan diskritisasi (*meshing*) yang selanjutnya dianalisis menggunakan program CFD. Penggunaan Gambit untuk pemodelan dan analisis CFD secara garis besar digambarkan oleh gambar 2.11.



Gambar 2.11 Skematik proses kerja *step by step* Gambit – CFD

### 2.5.2 Fluent

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

1. Membuat geometri dan *mesh* pada model
2. Memilih *solver* yang tepat untuk model tersebut (2D atau 3D)
3. Mengimpor *mesh* model
4. Melakukan pemeriksaan pada *mesh* model
5. Memilih formulasi *solver*
6. Memilih persamaan dasar yang akan dipakai dalam analisis. Misalnya: laminar, turbulen, reaksi kimia, perpindahan kalor, dan lain-lain
7. Menentukan sifat material yang akan dipakai
8. Menentukan kondisi batas
9. Mengatur parameter kontrol solusi
10. *Initialize the flow field*
11. Melakukan perhitungan/iterasi
12. Memeriksa hasil iterasi
13. Menyimpan hasil iterasi
14. Jika perlu, memperhalus *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

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 bersamaan. *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

$$\alpha_\infty^* = 1, \quad \alpha_\infty = 0.52, \quad \alpha_0 = \frac{1}{9}, \quad \beta_\infty^* = 0.09,$$

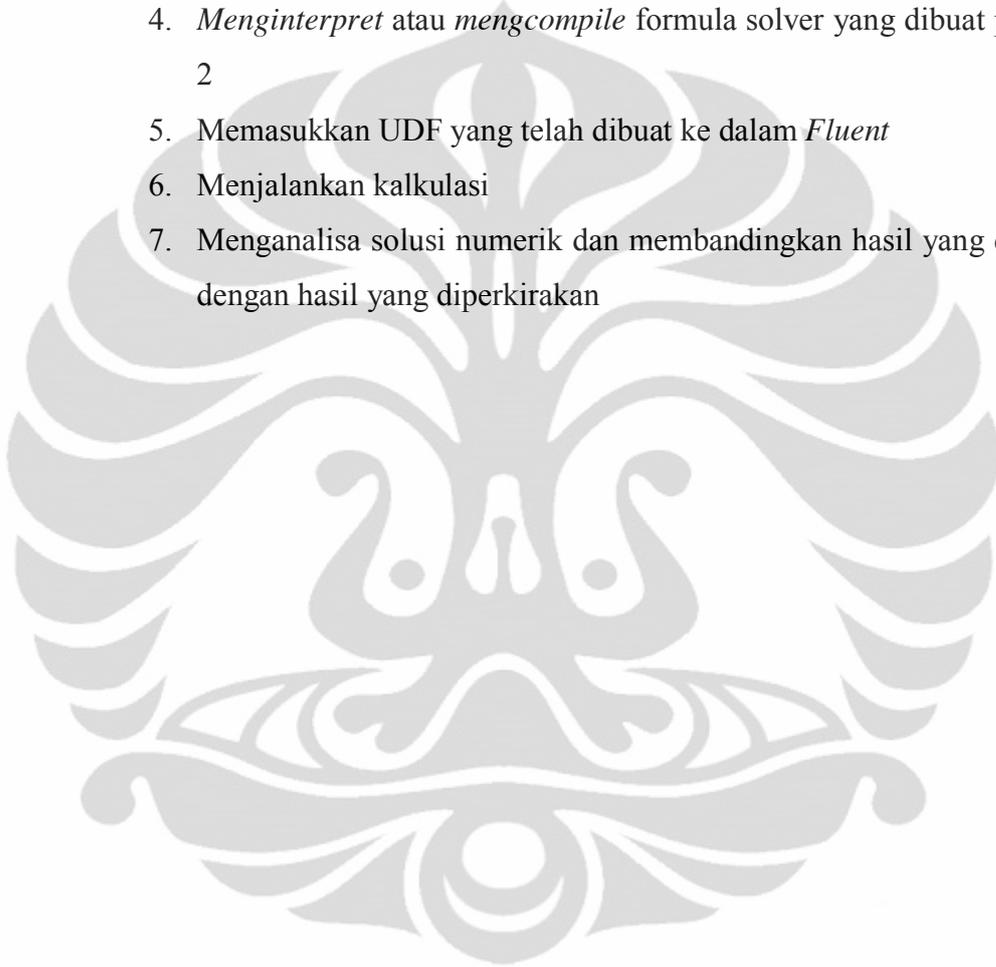
$$\beta_i = 0.072, \quad R_\beta = 8, \quad R_k = 6, \quad R_\omega = 2.95, \quad \zeta^* = 1.5,$$

$$M_{t0} = 0.25, \quad \sigma_k = 2.0, \quad \sigma_\omega = 2.0$$

Selain solver k- $\omega$  SST, jika ingin menyelesaikan permasalahan yang lebih kompleks dan detail, maka diperlukan formula *solver* yang dibuat sendiri. Hal ini dapat dilakukan dengan menggunakan *software fluent* dimana formula *solver* dapat dimasukkan dalam bentuk bahasa pemrograman C yang disebut

*User Define Function*(UDF). Langkah-langkah dalam pembuatan *User Define Function* adalah sebagai berikut:

1. Menentukan permasalahan yang ingin diselesaikan
2. Membuat formula *solver* dalam bentuk bahasa pemrograman
3. Menjalankan *Fluent* dan membaca *case file* yang telah dibuat.
4. *Menginterpret* atau *mengcompile* formula *solver* yang dibuat pada step 2
5. Memasukkan UDF yang telah dibuat ke dalam *Fluent*
6. Menjalankan kalkulasi
7. Menganalisa solusi numerik dan membandingkan hasil yang diperoleh dengan hasil yang diperkirakan

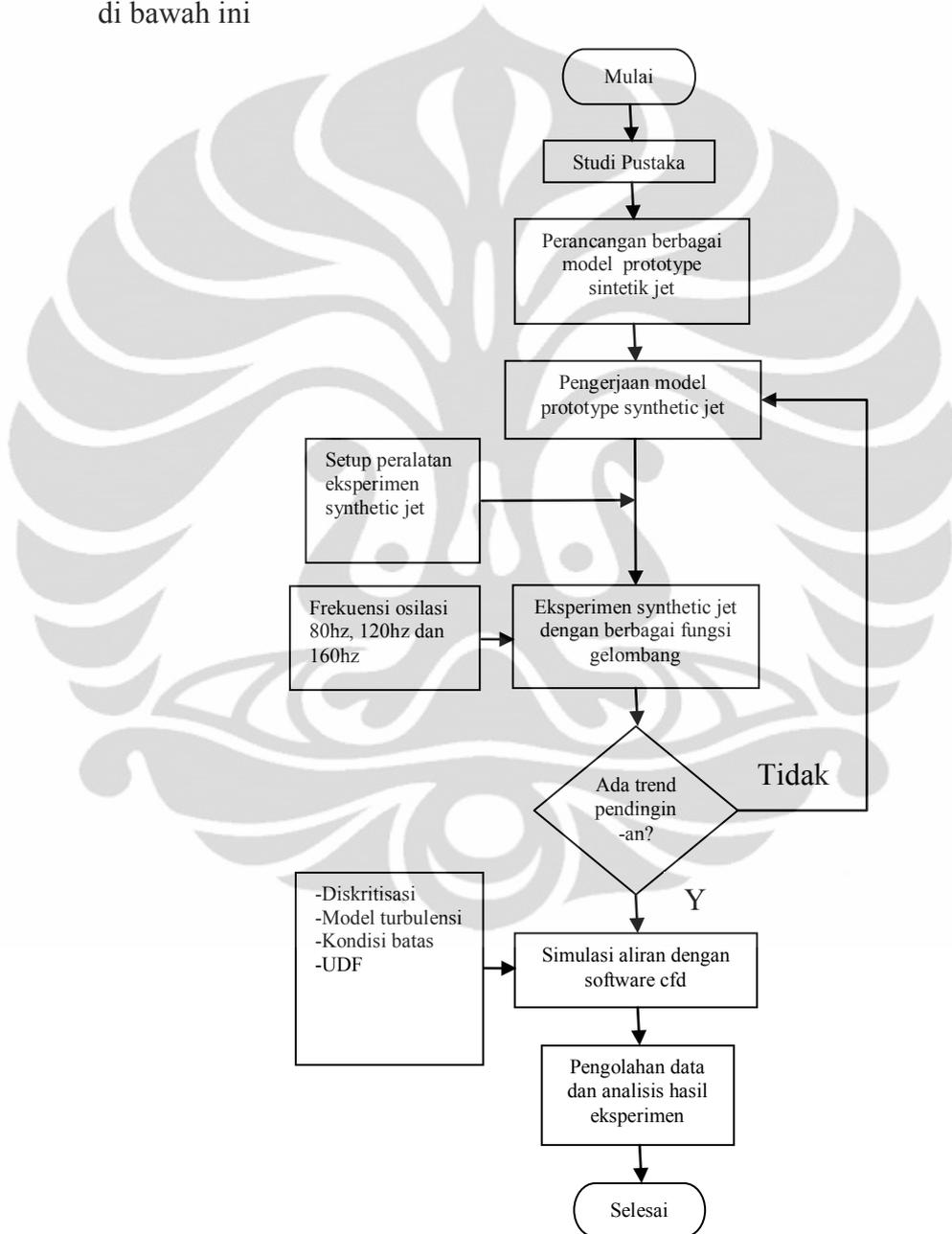


## BAB 3

### Sistem Pendinginan dengan Jet Sintetik

#### 3.1 Diagram Alir Penelitian

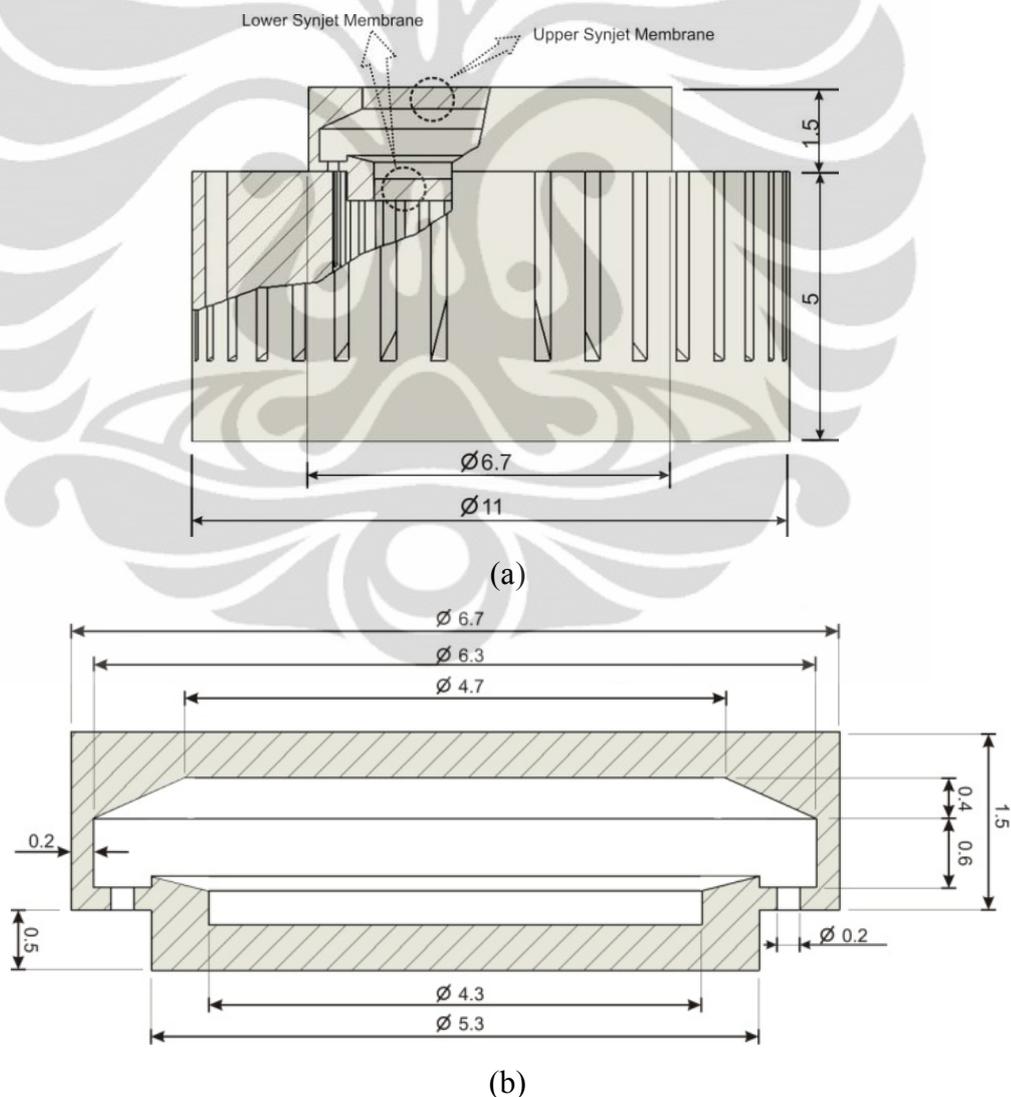
Pada penelitian ini, jalannya eksperimen dapat dijabarkan melalui gambar 3.1 di bawah ini



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

### 3.2 Modul Jet Sintetik

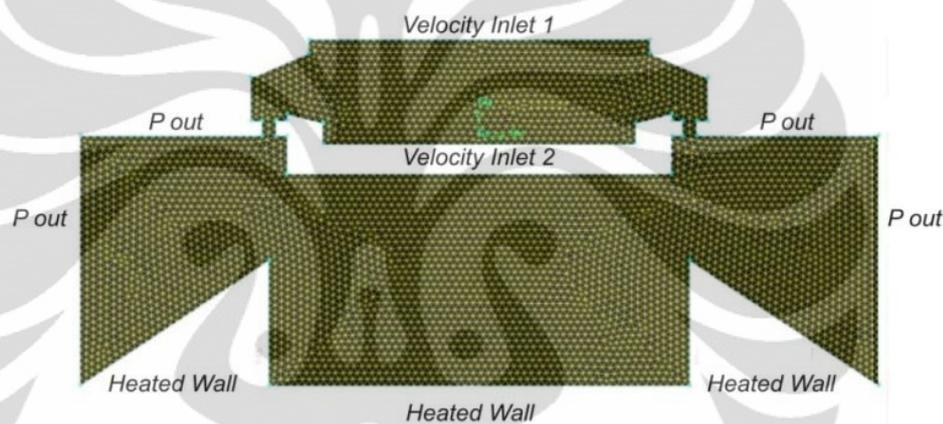
Pada penelitian ini dibutuhkan jet sintetik untuk melakukan percobaan sehingga dirancanglah sebuah *prototype* jet sintetik dimana diharapkan rancangan *prototype* jet sintetik yang telah dirancang mampu menghasilkan aliran jet sintetik yang memiliki *heat transfer coefficient* yang baik. Rancangan *prototype* jet sintetik yang dibuat dan dipakai dalam eksperimen digambarkan dalam gambar 3.2. Gambar 3.2(a) memperlihatkan detail model fisik susunan modul jet sintetik dengan *heat sink*. Gambar 3.2(b) memperlihatkan aktuator jet sintetik secara detail.



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 pada penelitian ini dilakukan agar mendapatkan gambaran aliran dan pola bidang termal pada aliran *impinging jet* sintetik. Hal ini dilakukan dengan menggunakan *software Computational Fluid Dynamics* (CFD). Model komputasional ini di desain terlebih dahulu sebelumnya dan kemudian dilakukan *meshing* dengan menggunakan *software Gambit* seperti pada gambar 3.1



Gambar 3.3 Gambaran daerah komputasi jet sintetik

Model komputasi ini digunakan untuk menganalisis daerah aliran termal pada jet sintetik dengan menggunakan model matematika  $k-\omega$  SST (*Shear Stress Transport*). Pada daerah kerja, udara diasumsikan *isothermal* dan juga *incompressible*. Suhu lingkungan diasumsikan  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  dan suhu bagian bawah dari dinding yang dipanaskan, dipertahankan pada suhu *isothermal*  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Dinding batas di kedua sisi actuator diasumsikan memiliki tekanan statik konstan dengan tekanan 1 atm. Detail lain dari kondisi komputasi dituliskan pada tabel di bawah ini.

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

Setelah itu, gerakan diafragma dimodelkan dengan *user defined function* (UDF). Pada permodelan ini akan terlihat beberapa daerah aliran turbulen, sementara aliran lain tetap pada kondisi laminar yang diindikasikan dengan nilai *Reynolds* yang rendah. Parameter yang digunakan pada simulasi ini adalah pengaturan model, sifat fluida dan nilai kondisi batas.

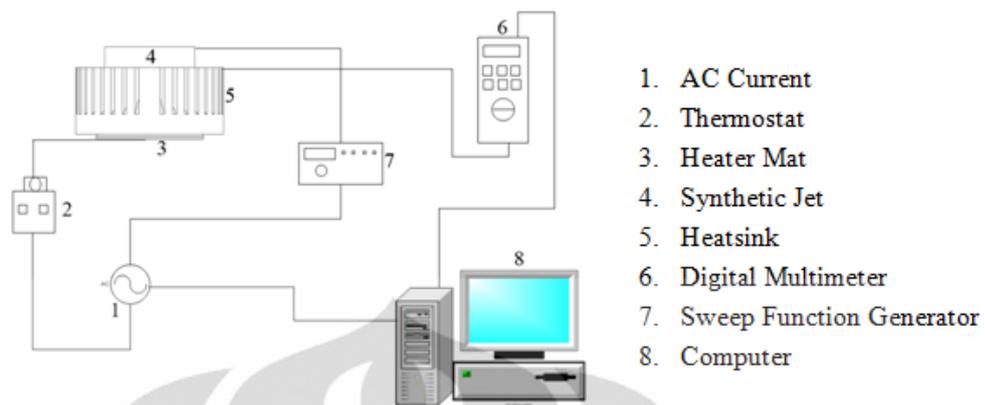
Pada saat awal ( $t=0$ ), posisi diafragma berada pada bagian bawah *cavity*. Gerakan diafragma diasumsikan sama dengan gerakan piston di dalam sebuah silinder, dimana diekspresikan sebagai fungsi gelombang sinusoidal di bawah ini.

$$V = V_0 + A \sin(2\pi f) t \quad (3.1)$$

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

### 3.4 Tahap Eksperimen

Tahap eksperimen ini dilakukan untuk mendapatkan data temperatur sebuah *heatsink* yang didinginkan menggunakan jet sintetik. Sistem eksperimen yang dibuat pada penelitian ini dapat dijabarkan pada gambar 3.2



Gambar 3.4 *Experimental Setup*

Komponen yang digunakan pada sistem eksperimen tersebut ialah sebagai berikut:

1. *Thermostat*

*Thermostat* merupakan alat yang digunakan sebagai pengatur suhu pada *heater mat*. Suhu yang diset pada *heater mat* ini adalah  $60^{\circ}\text{C}$ .



Gambar 3.5 *Thermostat*

2. *Heater Mat*

*Heater mat* merupakan alat yang digunakan sebagai sumber panas yang ditempatkan di bawah *heatsink*.



Gambar 3.6 Heater Mat

### 3. Jet Sintetik

Jet sintetik merupakan alat pendingin pada penelitian ini yang telah di desain sebelumnya yang digunakan untuk mendinginkan heatsink. Jet sintetik ini dibuat dengan menggunakan bahan nilon karena bahan ini mudah dibentuk dan juga mempunyai sifat insulator yang baik. Pada jet sintetik ini memakai 2 membran piezoelektrik yang dipasang di atas dan bawah cavity, dimana pada bagian bawahnya terdapat 20 orifis dengan jarak antar orifis 9 mm dan diameter orifisnya 2 mm.



Gambar 3.7 Jet Sintetik tampak atas dan tampak bawah

#### 4. Digital Multimeter

Digital multimeter dipakai untuk mengukur suhu pada *heatsink* dimana sebuah *thermocouple* dipasang pada ujung *heatsink*.



Gambar 3.8 Digital Multimeter

#### 5. Heat sink

*Heat sink* merupakan benda yang digunakan sebagai sumber pengukuran temperatur. *Heat sink* yang digunakan pada eksperimen ini mempunyai bentuk lingkaran dengan 32 *fin*, dengan diameter 11 cm dan tinggi 5 cm. Bahan yang digunakan untuk membuat *heat sink* ini adalah aluminium.



Gambar 3.9 *Heat sink*

#### 6. *Sweep Function Generator*

Alat ini digunakan untuk mengatur bentuk gelombang yang digunakan dan juga mengatur variasi frekuensi gelombang. Pada penelitian ini digunakan gelombang sinusoidal dengan variasi frekuensi gelombangnya 80Hz, 120 Hz dan 160 Hz.



Gambar 3.10 *Function Generator*

## 7. Komputer

Komputer digunakan sebagai penyimpan data temperatur *heatsink* yang dibaca menggunakan digital multimeter, dimana digital multimeter ini dihubungkan dengan komputer sebelumnya.



Gambar 3.11 Komputer

### 3.4.1 Komponen dan peralatan tambahan

Komponen dan peralatan tambahan pada eksperimen ini meliputi:

#### 1. Thermocouple

Merupakan komponen untuk mengukur temperatur di suatu titik pada system



Gambar 3.12 *Thermocouple*

2. Lem tembak(*glue gun*)

Alat ini digunakan sebagai *sealant* pada jet sintetik.



Gambar 3.13 *Glue Gun*

3. Hygrometer

Alat ini digunakan untuk mengukur suhu lingkungan.



Gambar 3.14 Hygrometer

#### 3.4.2 Prosedur pengambilan data

Pengambilan data dilakukan dengan mengukur suhu pada *heat sink* di satu titik dengan menggunakan digital multimeter dengan akurasi pengukuran  $\pm 0.05$  °C. Sebelum dilakukan eksperimen, dilakukan pengaturan suhu pada *heat sink*. Sumber panas pada *heat sink* didapatkan dengan menempatkan *heater mat* pada bagian bawah *heat sink* dengan suhu 60 °C yang diatur menggunakan *thermostat* dan pengukuran dilakukan pada suhu lingkungan 30 °C. Kemudian dilakukan pengaturan bentuk gelombang sinusoidal yang dipakai pada eksperimen ini, serta pengaturan frekuensi gelombang dengan variasi gelombang 80 Hz, 120 Hz dan 160 Hz menggunakan *function generator*. Setelah semua pengaturan dilakukan, maka dilakukan pengambilan data dengan meletakkan *thermocouple* di satu titik pada *heatsink* yang kemudian dibaca menggunakan digital multimeter. Setelah itu digital multimeter dihubungkan dengan komputer dan kemudian pengambilan data dimulai. Pengambilan data pada eksperimen ini dilakukan selama 2 jam dengan interval data per 1 detik.

## BAB 4

### Analisa Data

#### 4.1 Analisa Data Komputasional

Pada tahap komputasional, analisa yang dilakukan adalah analisa terhadap *instantaneous vorticity contours*, *instantaneous velocity contours*, *instantaneous temperature contour* dan *suction and discharge contours*. Dengan tahap komputasional yang telah dilakukan, maka akan didapatkan hasil simulasi seperti yang disebutkan sebelumnya dimana tahap komputasional dilakukan dengan menggunakan *software fluent*. Dengan memasukkan persamaan 3.1, model UDF untuk sintetik jet dapat dibuat dengan memasukkan frekuensi 80 Hz, 120 Hz dan 160 Hz ke dalam persamaan tersebut dimana UDF tersebut dibuat dalam bahasa pemrograman C. Pada simulasi ini, simulasi dilakukan dengan melihat kondisi aliran saat membran jet sintetik telah berosilasi selama 10, 50 dan 120 detik setelah fungsi paksa osilasi dimasukkan.

##### 4.1.1 *Instantaneous Vorticity Contours*

Pada simulasi ini, hal yang dilihat adalah profil vortisitas yang terbentuk akibat membran jet sintetik yang berosilasi. Setelah dilakukan simulasi aliran dengan menggunakan *software fluent*, maka dapat dilihat *instantaneous vorticity contours* yang dihasilkan seperti pada gambar 4.1.

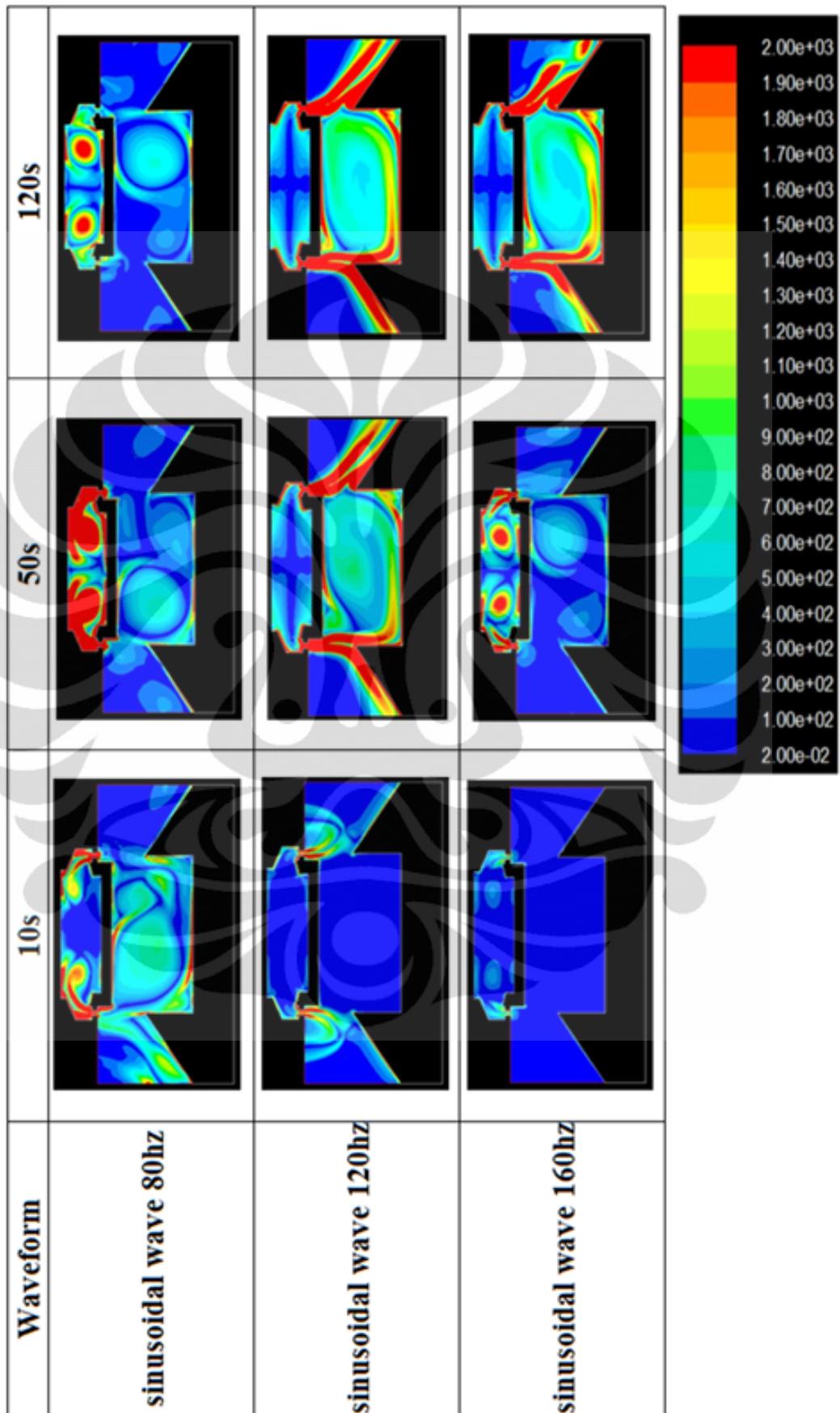
Dari gambar 4.1, terlihat bahwa saat frekuensi 80 Hz vortisitas yang terjadi pada saat detik ke-10 terbentuk di dalam *cavity* jet sintetik di dekat orifisnya dan kemudian akan keluar ke dalam sebuah *channel* antara jet sintetik dan *heat sink*. Pada saat detik ke-50 vortisitas yang terjadi semakin besar, ini ditandai dengan warna merah pekat di dalam *cavity* jet sintetik. Hal ini disebabkan karena terakumulasinya vortisitas-vortisitas yang terbentuk sebelumnya pada saat *suction* dan *discharge* dari jet sintetik. Kemudian pada saat detik ke-120 vortisitas mulai melemah. Hal ini terjadi mungkin disebabkan karena terjadinya keseimbangan antara *suction* dan *discharge* dari

jet sintetik. Pada saat 50 dan 120 detik, terlihat juga vortisitas yang muncul di antara ruang kosong antara jet sintetik dan *heated wall* dikarenakan vortisitas di dalam *cavity* jet sintetik keluar melalui orifis dan memasuki ruang kosong tersebut.

Pada frekuensi 120 hz saat membrane berosilasi selama 10 detik setelah fungsi paksa osilasi dimasukkan, terlihat bahwa vortisitas yang muncul kecil. Ini terlihat pada gambar 4.1 dimana vortisitas yang muncul lebih lemah dibandingkan membran jet sintetik yang berosilasi pada frekuensi 80 Hz. Hal ini mungkin disebabkan karena adanya inersia fluida di dalam *cavity* terhadap osilasi membran jet sintetik. Ketika gerakan osilasi membran bergerak cepat atas dan bawah, aliran fluida di dalam *cavity* tidak mampu mengikuti gerakan tersebut dikarenakan adanya efek inersia sehingga jet sintetik menghasilkan vortisitas yang lemah. Kemudian saat detik ke-50 sampai detik ke-120, vortisitas yang terjadi semakin kuat dibandingkan sebelumnya. Hal ini disebabkan sama seperti yang terjadi pada saat membrane diosilasikan pada frekuensi 80 Hz dimana dikarenakan terakumulasinya vortisitas-vortisitas yang terbentuk sebelumnya pada saat *suction* dan *discharge* dari jet sintetik.

Pada gambar 4.1, terlihat bahwa *contour* vortisitas gelombang sinusoidal dengan frekuensi 160 Hz hampir sama dengan *contour* vortisitas gelombang sinusoidal dengan gelombang 120 Hz. Akan tetapi terdapat perbedaan sedikit antara kedua *contour* vortisitas tersebut yaitu *contour* vortisitas pada saat 50 s, dimana *contour* vortisitas pada frekuensi 160 Hz menunjukkan vortisitas yang cukup kuat berada di dalam *cavity* jet sintetik sedangkan pada frekuensi 120 Hz terdapat vortisitas yang keluar dari orifis dan membentur kisi dari *heat sink*.

Dari gambar 4.1, terlihat bahwa gerakan membran jet sintetik dipengaruhi oleh besarnya nilai frekuensi dan juga nilai amplitudo yang diberikan. Pada simulasi ini terlihat bahwa besarnya vortisitas pada berbagai frekuensi sangat mempengaruhi perpindahan panas konveksi yang terjadi pada *heat sink*.



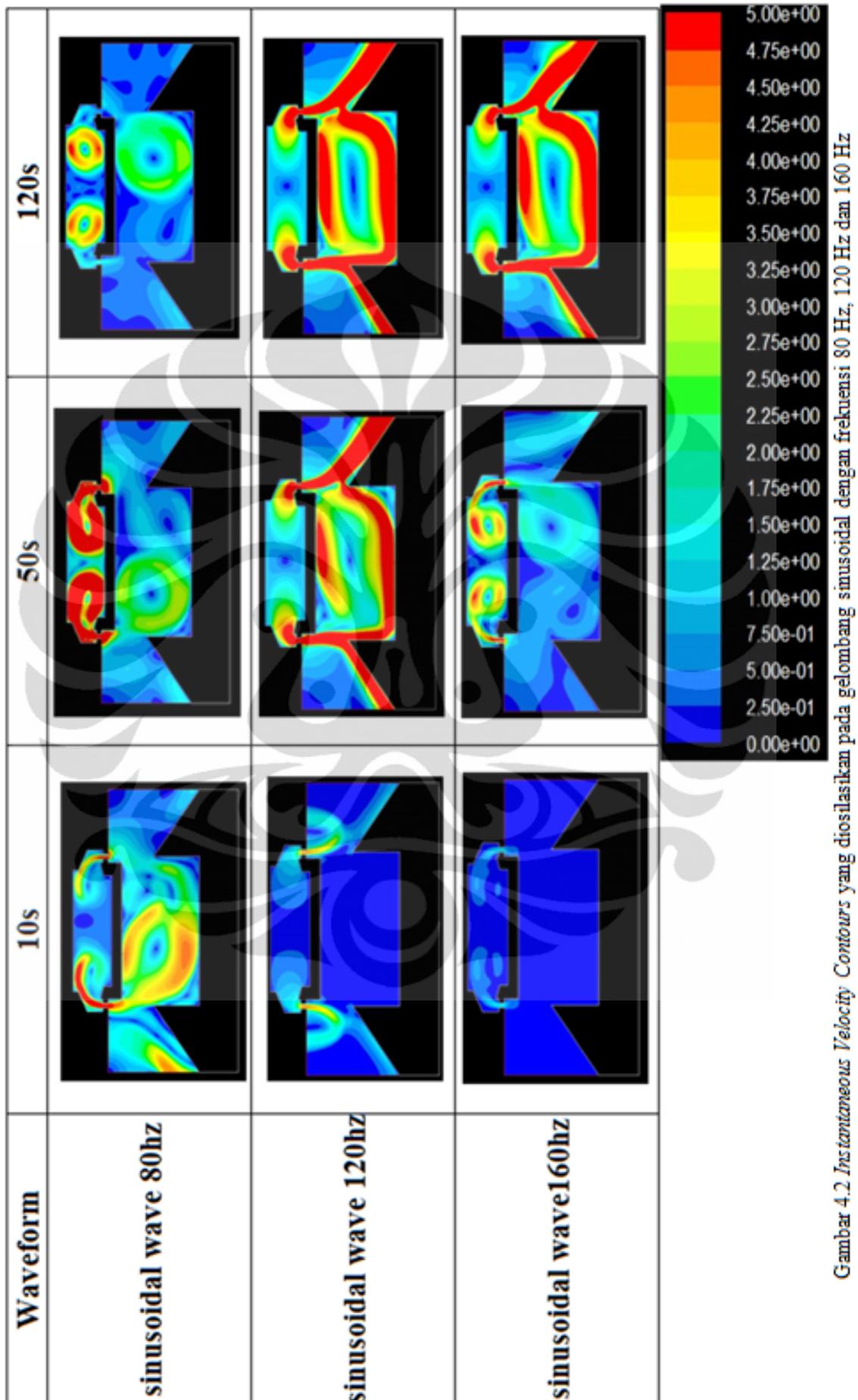
Gambar 4.1 *Instantaneous Vorticity Contours* yang diosilasikan pada gelombang sinusoidal dengan frekuensi 80 Hz, 120 Hz dan 160 Hz

#### 4.1.2 *Instantaneous Velocity Contours*

Pada simulasi ini akan dilihat besarnya kecepatan aliran fluida yang terjadi akibat membran jet sintetis yang berosilasi setelah fungsi paksa osilasi diberikan. Gambaran *contour* kecepatan sesaat saat membran dioasilasikan pada gelombang sinusoidal dengan frekuensi 80 Hz, 120 Hz dan 160 Hz dapat diperlihatkan seperti pada gambar 4.2.

Pada gambar 4.2, terlihat bahwa kecepatan aliran fluida meningkat dari detik ke-10 sampai detik ke-50 saat membran jet sintetis dioasilasikan pada frekuensi 80 Hz. Hal ini terjadi karena pengaruh terakumulasinya *suction* dan *discharge* dari jet sintetis. Kemudian ketika pada saat detik ke-120 kecepatan dari aliran fluida melemah, ini mungkin dikarenakan keseimbangan antara *suction* dan *discharge* dari jet sintetis mulai tercapai.

Pada saat membran dioasilasikan pada frekuensi 120 Hz dan 160 Hz, kecepatan aliran fluida lemah pada saat 10 s dibandingkan dengan ketika membran dioasilasikan pada frekuensi 80 Hz saat detik ke-10. Hal ini mungkin disebabkan karena adanya inersia fluida di dalam *cavity* terhadap osilasi membran jet sintetis. Ketika gerakan osilasi membran bergerak cepat atas dan bawah, aliran fluida di dalam *cavity* tidak mampu mengikuti gerakan tersebut dikarenakan adanya efek inersia. Jika dilihat *contour* antara *countour vorticity* dan *countour velocity* maka terlihat pola yang sama. Ini menandakan bahwa besarnya kecepatan berbanding lurus dengan besarnya vortisitas yang terjadi pada jet sintetis.



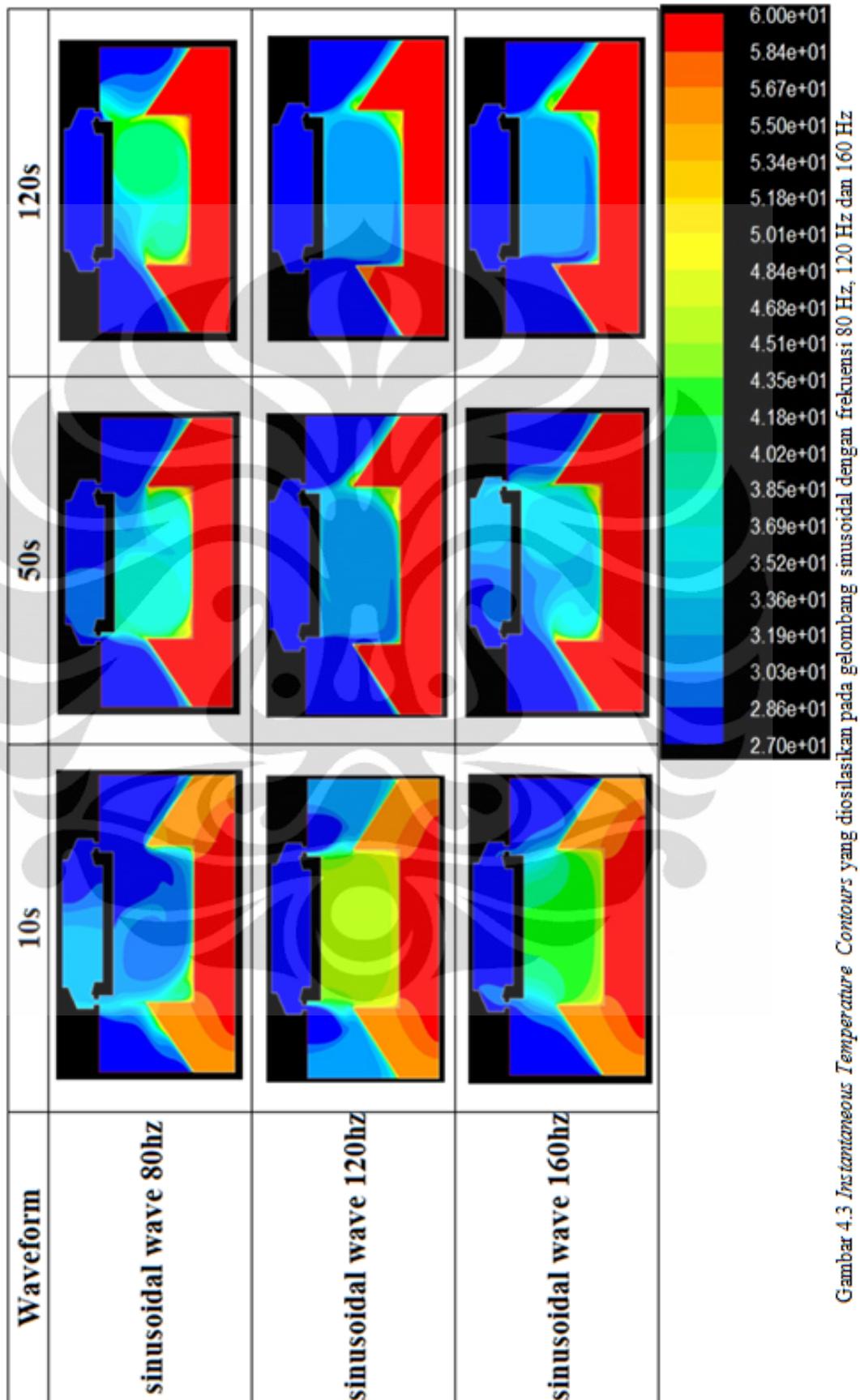
Gambar 4.2. *Instantaneous Velocity Contours* yang diosilasikan pada gelombang sinusoidal dengan frekuensi 80 Hz, 120 Hz dan 160 Hz

#### 4.1.3 *Instantaneous Temperature Contours*

Analisa yang dilakukan pada tahap ini adalah analisa terhadap profil temperatur yang terbentuk akibat gerakan membran jet sintetik. Pada gambar 4.3 terlihat *contour* temperatur saat membran jet sintetik diosilasikan pada frekuensi 80 Hz, 120 Hz dan 160 Hz. Saat membran jet sintetik berosilasi pada detik ke-10 setelah fungsi paksa osilasi dimasukkan, terlihat *contour* temperatur yang beragam pada *heat sink*. Hal ini ditandai dengan warna merah menyala pada bagian dasar diikuti dengan warna kekuningan pada bagian atasnya dan ini mungkin disebabkan karena adanya efek konduksi yang terjadi antara *heater mat* dan *heat sink*. Selain itu mungkin juga dikarenakan simulasi membutuhkan waktu untuk mencapai kestabilan. Hal tersebut dapat diperlihatkan pada gambar 4.3 saat membran jet sintetik berosilasi pada detik ke-10.

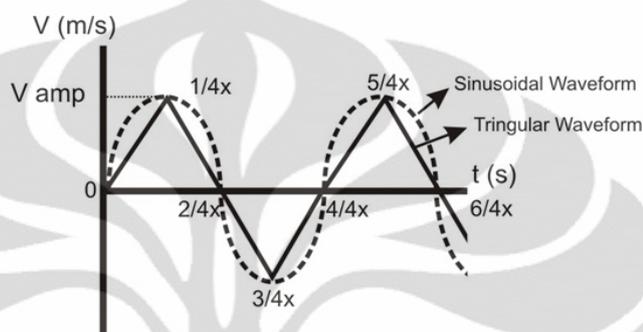
Ketika membran jet sintetik berosilasi pada frekuensi 80 Hz saat detik ke-50 seperti pada gambar 4.3, terlihat sebagian udara panas memasuki *cavity*. Hal ini mungkin disebabkan karena keseimbangan antara *suction* dan *discharge* dari jet sintetik belum tercapai. Fenomena yang terjadi pada detik ke-50 berkebalikan dengan apa yang terjadi ketika membran berosilasi pada detik ke-120 dimana tidak terlihatnya udara panas memasuki *cavity*, ini mungkin dikarenakan keseimbangan antara *suction* dan *discharge* dari jet sintetik mulai tercapai.

Pada saat detik ke-50 dan detik ke-120 dimana membran diosilasikan pada frekuensi 120 Hz dan saat detik ke-120 ketika membran diosilasikan pada frekuensi 160 Hz seperti pada gambar 4.3, terlihat *contour* temperatur yang berbeda pada *heat sink*. Hal ini ditandai dengan warna *orange* pada ujung *heat sink*. Ini mungkin dikarenakan terdapat vortisitas dari jet sintetik yang cukup kuat keluar dari orifis dan membentur kisi *heat sink* sehingga terlihat penurunan temperatur pada ujung *heat sink*. Jika kita lihat *contour* temperatur dari gambar 4.3, maka akan terlihat bahwa pendinginan pada kondisi membran jet sintetik diosilasikan pada frekuensi 80 Hz lebih baik dibandingkan dengan ketika membran jet sintetik diosilasikan pada frekuensi 120 Hz dan 160 Hz.



#### 4.1.4 Suction and Discharge Contours

Pada simulasi ini akan dilihat gerakan aliran fluida yang terjadi pada sistem *heat sink* dengan *synthetic jet* dalam satu fasa yaitu pada fasa  $1/4$ ,  $2/4$ ,  $3/4$  dan  $4/4$  seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.4 berikut.



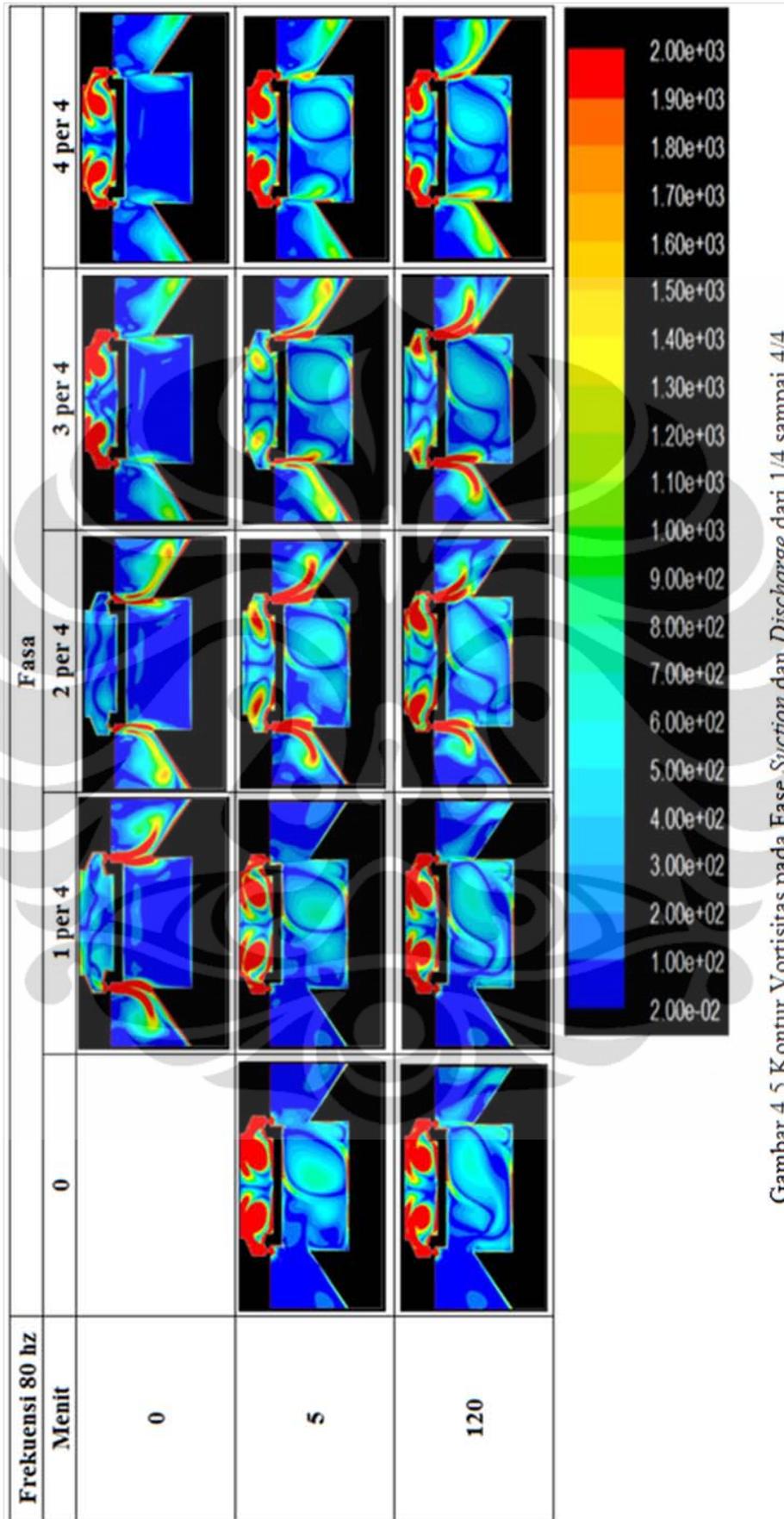
Gambar 4.4 skema pergerakan *synthetic jet*

Pada gambar 4.5 terlihat kontur vortisitas pada fasa 0 sampai  $4/4$  ketika membran jet sintetik diosilasikan pada frekuensi 80 hz. Pada menit ke-0 pada fasa  $1/4$  ke  $2/4$  terlihat discharge dari jet sintetik keluar melalui orifis. Akan tetapi pada fasa  $2/4$  terlihat vortisitas yang keluar lebih kecil daripada fasa  $1/4$ , hal ini mungkin disebabkan karena membran jet sintetik belum cukup lama berosilasi. Dari fasa  $3/4$  sampai  $4/4$  terlihat *suction* dari jet sintetik. Hal ini ditandai dengan vortisitas yang semakin membesar pada *cavity* jet sintetik. Pada menit ke-5 dan 120 pada fasa 0 terlihat vortisitas di dalam *cavity* jet sintetik, ini dikarenakan fasa 0 masih merupakan fasa *suction*. Pada fasa  $1/4$  sampai  $2/4$  merupakan fasa *discharge* yang ditandai dengan vortisitas mulai keluar melalui orifis. Fasa  $3/4$  merupakan fasa peralihan antara *suction* dan *discharge* sehingga masih terlihat aliran jet sintetik yang ada sekitar orifis jet sintetik. Pada fasa  $4/4$  aliran fluida mengalami *suction* kembali.

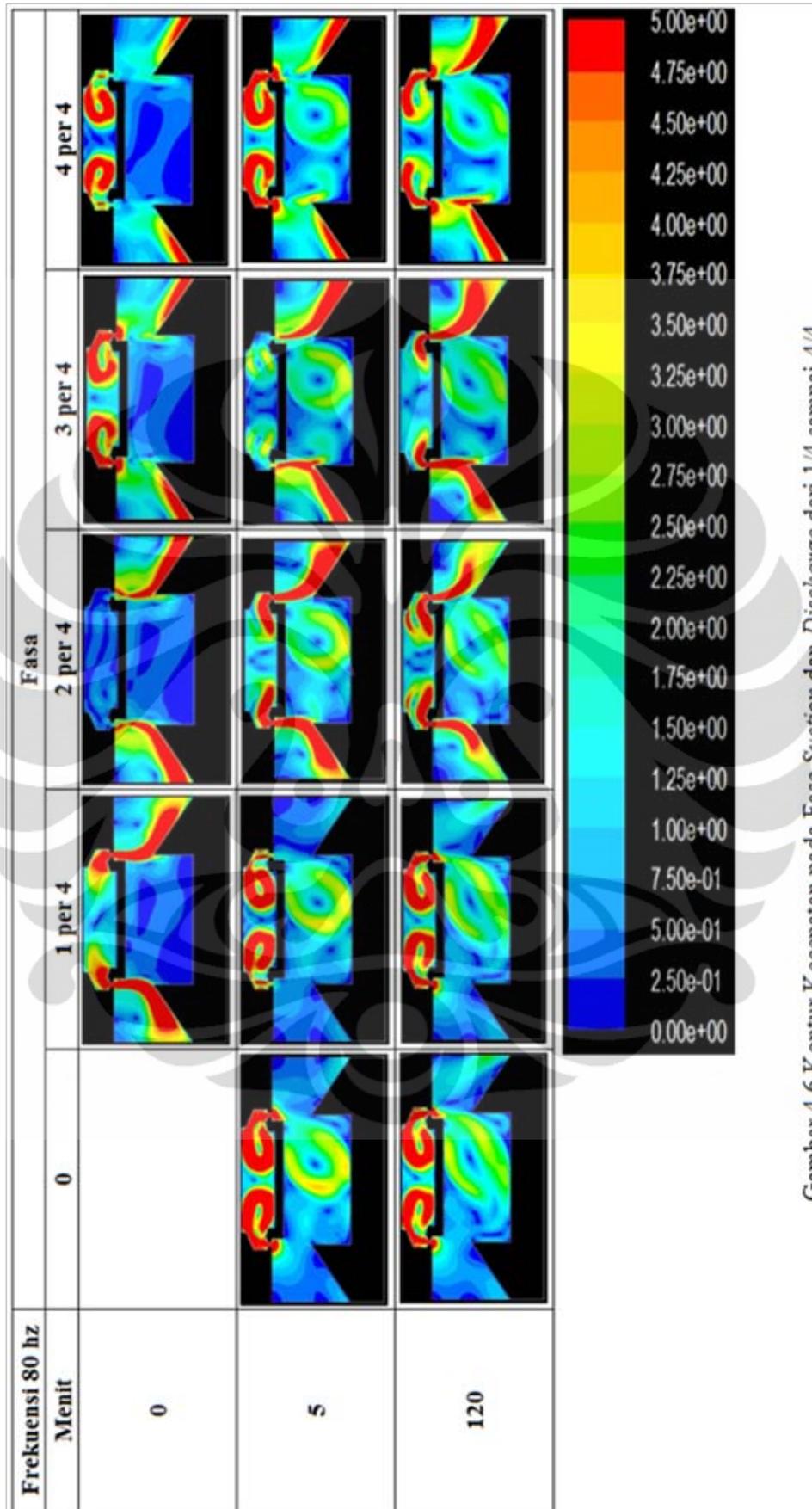
Pada gambar 4.6 terlihat kontur kecepatan pada fasa 0 sampai  $4/4$ . Kontur kecepatan memiliki kontur yang hampir sama dengan kontur vortisitas. Hal ini ditandai dengan pergerakan aliran fluida yang terjadi pada kontur kecepatan seperti pada menit ke 0 pada fasa  $1/4$  sampai  $2/4$  terlihat *discharge* dari jet

sintetik yang keluar melalui orifis. Akan tetapi pada fasa  $2/4$  terlihat vortisitas yang keluar lebih kecil daripada fasa  $1/4$ , hal ini mungkin disebabkan karena membran jet sintetik belum cukup lama berosilasi.

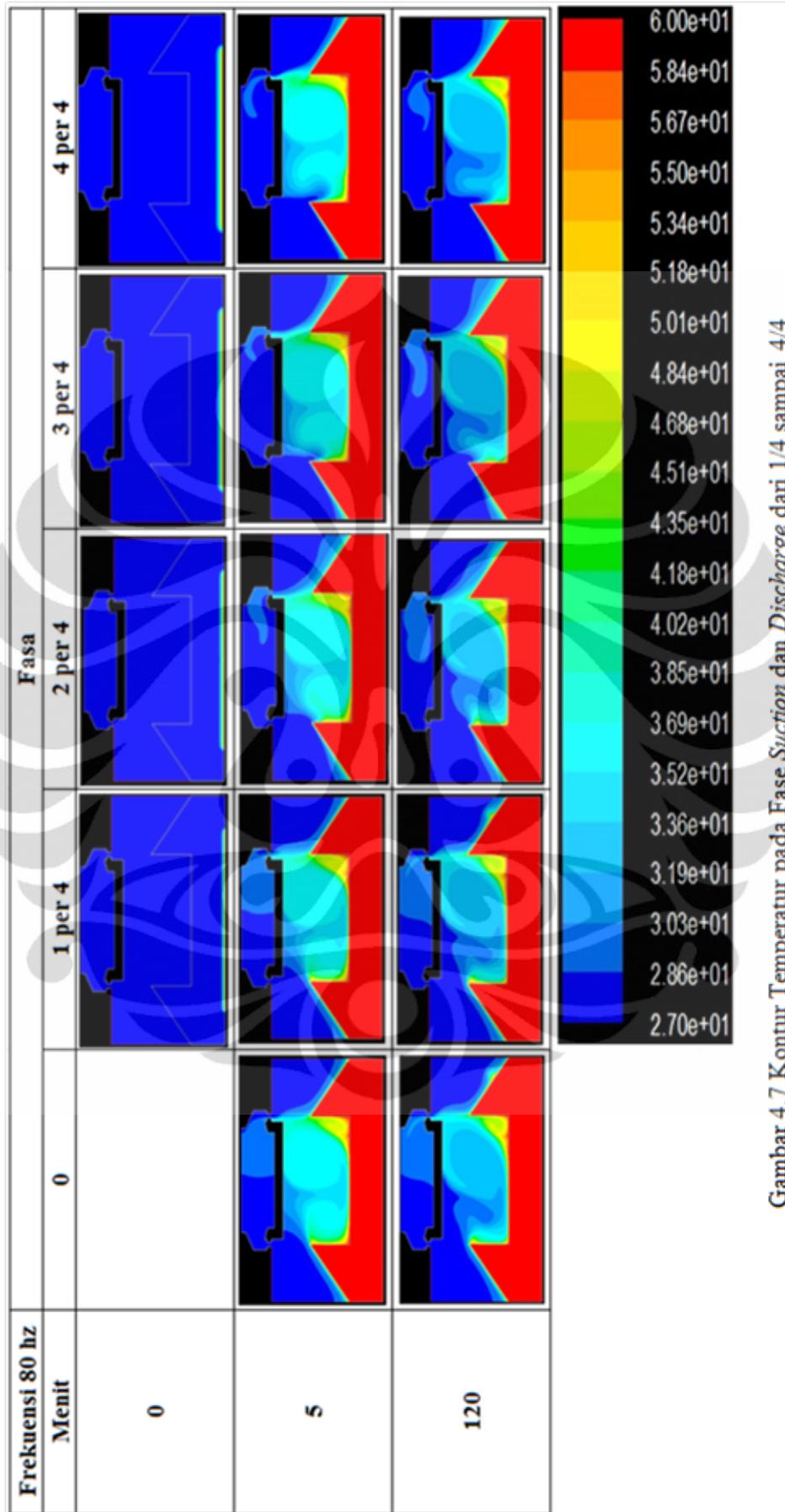
Pada gambar 4.7 terlihat kontur temperatur pada fasa 0 sampai  $4/4$  ketika membran jet sintetik diosilasikan pada frekuensi 80 hz. Pada menit ke-0, temperature heat sink masih terlihat dingin. Ini ditandai dengan warna biru yang menyebar pada sistem *heat sink-synthetic jet*. Hal ini mungkin diakibatkan efek konduksi antara *heat sink* dan *heater mat* masih belum mencapai batas maksimalnya. Pada menit ke-5 dan ke-120 pada fasa 0 terlihat udara panas memasuki *cavity* jet sintetik. Hal ini mungkin diakibatkan karena pada fasa 0 merupakan fasa *suction* sehingga terlihat udara panas memasuki *cavity* jet sintetik. Kemudian pada fasa  $1/4$  sampai  $2/4$  terlihat udara panas di dalam *cavity* semakin kecil. Ini dikarenakan fasa  $1/4$  sampai  $2/4$  merupakan fasa *discharge* sehingga udara panas di dalam *cavity* jet sintetik terdorong keluar melalui orifis. Pada fasa  $3/4$  sampai  $4/4$  terlihat udara panas kembali memasuki *cavity* jet sintetik. Hal ini mungkin disebabkan fasa  $3/4$  dan  $4/4$  merupakan fasa *discharge* sehingga udara panas kembali ditarik masuk ke dalam *cavity* jet sintetik.



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



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



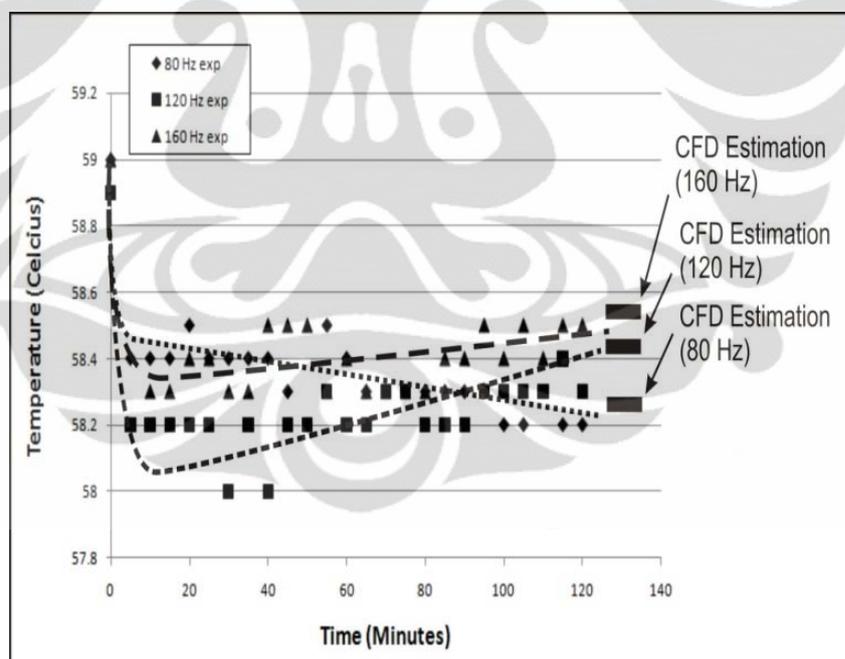
Gambar 4.7 Kontur Temperatur pada Fase Suction dan Discharge dari 1/4 sampai 4/4

## 4.2 Analisa Data Eksperimental

Tahap eksperimental dilakukan untuk menganalisa efek pendinginan pada *heat sink* menggunakan jet sintetik dengan gelombang sinusoidal pada frekuensi 80 Hz, 120 Hz dan 160 Hz. Analisa efek pendinginan pada *heat sink* ini direpresentasikan pada sebuah grafik perubahan temperature terhadap waktu dan juga grafik koefisien perpindahan kalor konveksi terhadap waktu. Pada tahap ini, dilakukan percobaan selama 120 menit.

### 4.2.1 Analisa Perubahan Temperatur terhadap Waktu

Hasil pengukuran temperature pada *heat sink* dapat dilihat dari gambar 4.10 dimana pengukuran temperatur dilakukan pada ruangan terbuka yang dilakukan selama 120 menit.



Gambar 4.4 Temperatur pendinginan jet sintetik terhadap waktu

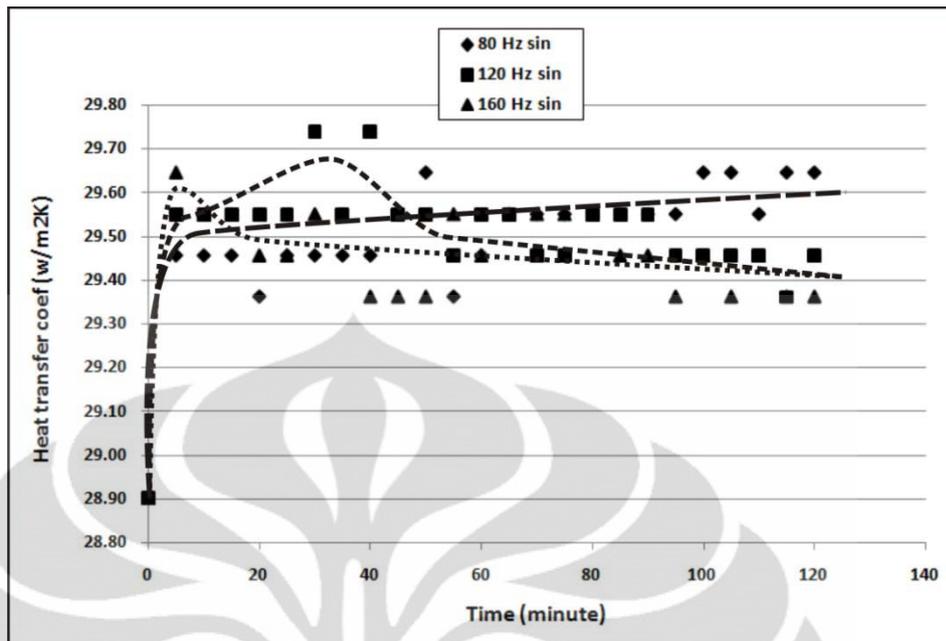
Pada gambar 4.4 di atas terlihat bahwa terjadi penurunan temperatur pada *heat sink* untuk ketiga kondisi jet sintetik yaitu ketika membran jet sintetik diosilasikan pada gelombang sinusoidal dengan frekuensi 80 Hz, 120 Hz dan 160 Hz. Akan tetapi, seiring berjalannya waktu temperatur *heat sink* meningkat dan kemudian mencapai kestabilannya. Hal ini terjadi terutama

ketika membran jet sintetik diosilasikan pada frekuensi 120 Hz dan 160 Hz. Ini mungkin diakibatkan karena adanya inersia fluida di dalam *cavity* terhadap osilasi membran jet sintetik. Ketika gerakan osilasi membran bergerak cepat atas dan bawah, aliran fluida di dalam *cavity* tidak mampu mengikuti gerakan tersebut dikarenakan adanya efek inersia. Jika dilihat dari gambar 4.10, terlihat bahwa penurunan temperatur *heat sink* dengan kondisi membran diosilasikan pada frekuensi 80 Hz lebih baik dibandingkan dengan 120 Hz dan 160 Hz. Hal ini sesuai dengan hasil simulasi CFD yang menunjukkan bahwa penurunan temperatur *heat sink* yang lebih baik pada kondisi membran jet sintetik diosilasikan pada frekuensi 80 Hz dibandingkan ketika diosilasikan pada frekuensi 120 Hz dan 160 Hz.

Pada gambar 4.10 juga terlihat bahwa penurunan temperatur puncak pada saat membran jet sintetik diosilasikan pada frekuensi 120 Hz dan 160 Hz adalah ketika percobaan telah berjalan sekitar 15 menit. Setelah percobaan berjalan selama 120 menit, maka terlihat penurunan temperatur sekitar  $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  dari suhu awal untuk kondisi membran jet sintetik yang diosilasikan pada frekuensi 80 Hz. Pada frekuensi 120 Hz terlihat penurunan temperatur *heat sink* sekitar  $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$  dari suhu awal dan  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  dari suhu awal untuk frekuensi 160 Hz ketika membran jet sintetik telah beresilasi selama 120 menit. Pada gambar 4.4 juga terlihat prediksi hasil komputasional dimana temperatur *heat sink* akan stabil.

#### 4.2.2 Analisa Koefisien Perpindahan Panas Konveksi terhadap Waktu

Setelah dilakukan analisa perubahan temperatur terhadap waktu, maka dilakukan analisa koefisien perpindahan kalor konveksi terhadap waktu. Nilai dari koefisien perpindahan kalor konveksi diplot dalam bentuk grafik seperti yang terlihat pada gambar 4.5 dimana terlihat grafik koefisien perpindahan kalor konveksi terhadap waktu.



Gambar 4.5 Koefisien perpindahan panas konveksi jet sintetik terhadap waktu

Pada gambar 4.5 di atas, terlihat *heat transfer coefficient* yang semakin meningkat untuk ketiga kondisi jet sintetik yaitu ketika membran jet sintetik diosilasikan pada gelombang sinusoidal dengan frekuensi 80 Hz, 120 Hz dan 160 Hz. Setelah sekitar 5 menit, *heat transfer coefficient* dari eksitasi membrane jet sintetik untuk ketiga frekuensi mulai menunjukkan kestabilan. Setelah membran jet sintetik beresilasi selama 120 menit, terlihat nilai *heat transfer coefficient* pada frekuensi 80 Hz sekitar  $30.63 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Pada frekuensi 120 Hz terlihat nilai *heat transfer coefficient* sekitar  $30.42 \text{ W/m}^2\text{K}$  dan sekitar  $30.33 \text{ W/m}^2\text{K}$  untuk frekuensi 160 Hz ketika membran diosilasikan selama 120 menit. Hal ini menunjukkan bahwa pendinginan *heat sink* menggunakan jet sintetik pada frekuensi 80 Hz lebih baik dibandingkan dengan menggunakan frekuensi 120 Hz dan 160 Hz.

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

Di dalam statistik ketika menduga sesuatu hal, maka akan dikenakan tingkat kepercayaan terhadap interval yang ada. Tingkat kepercayaan dapat dikatakan 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, maka diperlukan nilai *error standard* dan *mean* pengukuran. *Mean* pengukuran dapat dinyatakan sebagai:

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

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

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

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

Frekuensi	Mean	Standard Deviasi	Standar Error	Uncertainty
80	58.3	0.16	0.03	0.06
120	58.3	0.16	0.03	0.06
160	58.4	0.15	0.03	0.06

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

- Pada 80 hz sebesar 0.11%
- Pada 120 hz sebesar 0.11%
- Pada 160 hz sebesar 0.1%

## BAB 5

### KESIMPULAN

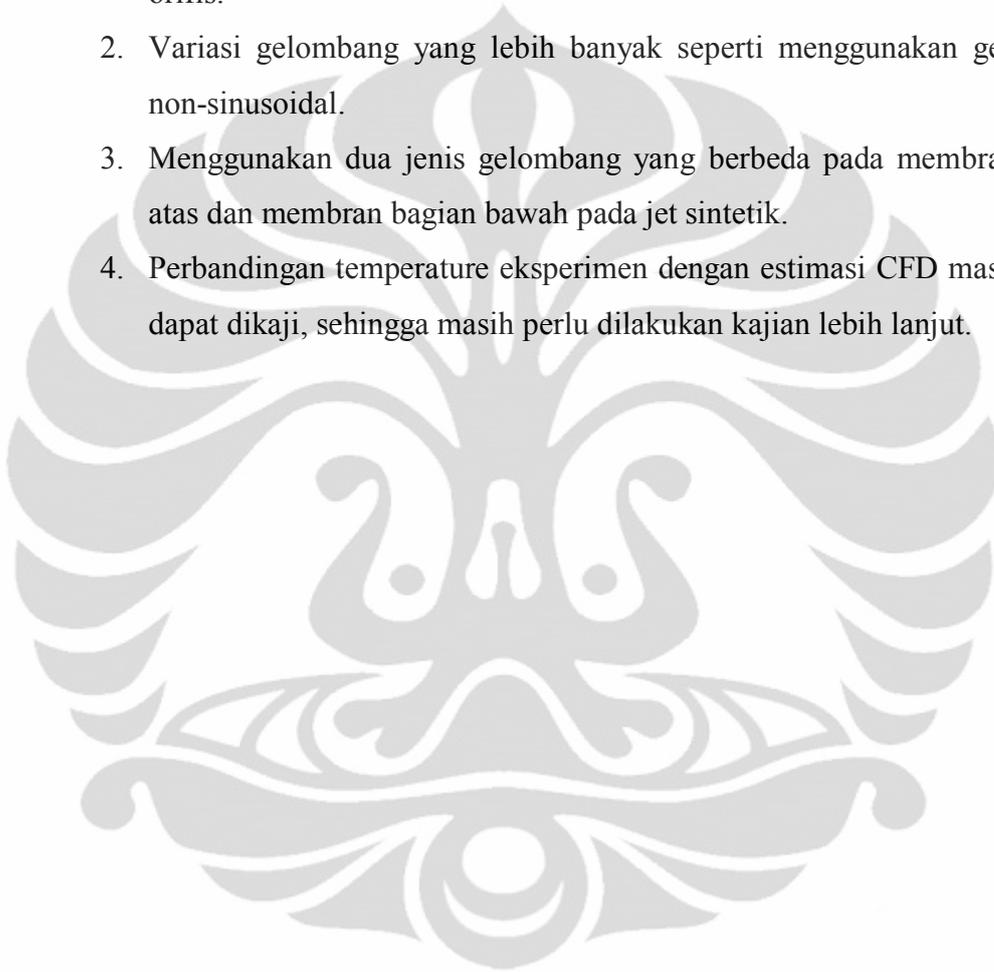
#### 5.1 Kesimpulan

Penelitian karakteristik aliran dan pendinginan dengan menggunakan jet sintetis telah dilakukan dan dianalisis dimana jet sintetis diosilasikan dengan menggunakan gelombang sinusoidal pada berbagai frekuensi. Studi komputasional dan eksperimental telah dilakukan pada sebuah desain orisinal jet sintetis yang digerakkan oleh dua buah membran *piezoelectric* dimana udara di dalam *cavity* jet sintetis akan bergerak akibat getaran yang dihasilkan oleh kedua membran *piezoelectric*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *suction* dan *discharge* dari membran jet sintetis akibat osilasi frekuensi yang diberikan mempunyai peranan penting pada efek pendinginan, ini terlihat pada hasil simulasi visualisasi aliran menggunakan *software* CFD Fluent. Pada *contour* vortisitas terlihat bahwa vortisitas akibat dari *suction* dan *discharge* membran jet sintetis mampu memberikan efek pendinginan pada *heat sink*. Hal ini dapat terlihat pada *contour* temperatur dimana terjadinya penurunan temperatur akibat adanya vortisitas yang cukup kuat keluar dari orifis jet sintetis dan membentur dinding *heat sink*. Pada hasil eksperimental terlihat bahwa pendinginan pada saat membran jet sintetis diosilasikan dengan frekuensi 80 Hz mempunyai pendinginan yang lebih baik dibandingkan pada frekuensi 120 Hz dan 160 Hz. Hal ini ditandai dengan penurunan temperatur yang lebih baik pada frekuensi 80 Hz dibandingkan pada frekuensi 120 Hz dan 160 Hz dimana terlihat penurunan temperatur sekitar 0.8 °C dari suhu awal untuk kondisi membran jet sintetis yang diosilasikan pada frekuensi 80 Hz dan pada frekuensi 120 Hz terlihat penurunan temperatur *heat sink* sekitar 0.6 °C dari suhu awal dan 0.5 °C dari suhu awal untuk frekuensi 160 Hz ketika membran jet sintetis telah beresilasi selama 120 menit. Selain itu juga terlihat koefisien perpindahan kalor konveksi yang lebih baik pada frekuensi 80 Hz dibandingkan pada frekuensi 120 Hz dan 160 Hz dimana koefisien perpindahan kalor konveksinya yang lebih rendah.

## 5.2 Saran

Dalam mencapai hasil yang lebih maksimal, maka diperlukan beberapa pengembangan dalam penelitian jet sintetik, yaitu:

1. Pengkajian lebih lanjut mengenai hubungan geometri jet sintetik terhadap efek pendinginan seperti ukuran orifis, bentuk *cavity* jet sintetik dan jumlah orifis.
2. Variasi gelombang yang lebih banyak seperti menggunakan gelombang non-sinusoidal.
3. Menggunakan dua jenis gelombang yang berbeda pada membran bagian atas dan membran bagian bawah pada jet sintetik.
4. Perbandingan temperature eksperimen dengan estimasi CFD masih belum dapat dikaji, sehingga masih perlu dilakukan kajian lebih lanjut.



## DAFTAR REFERENSI

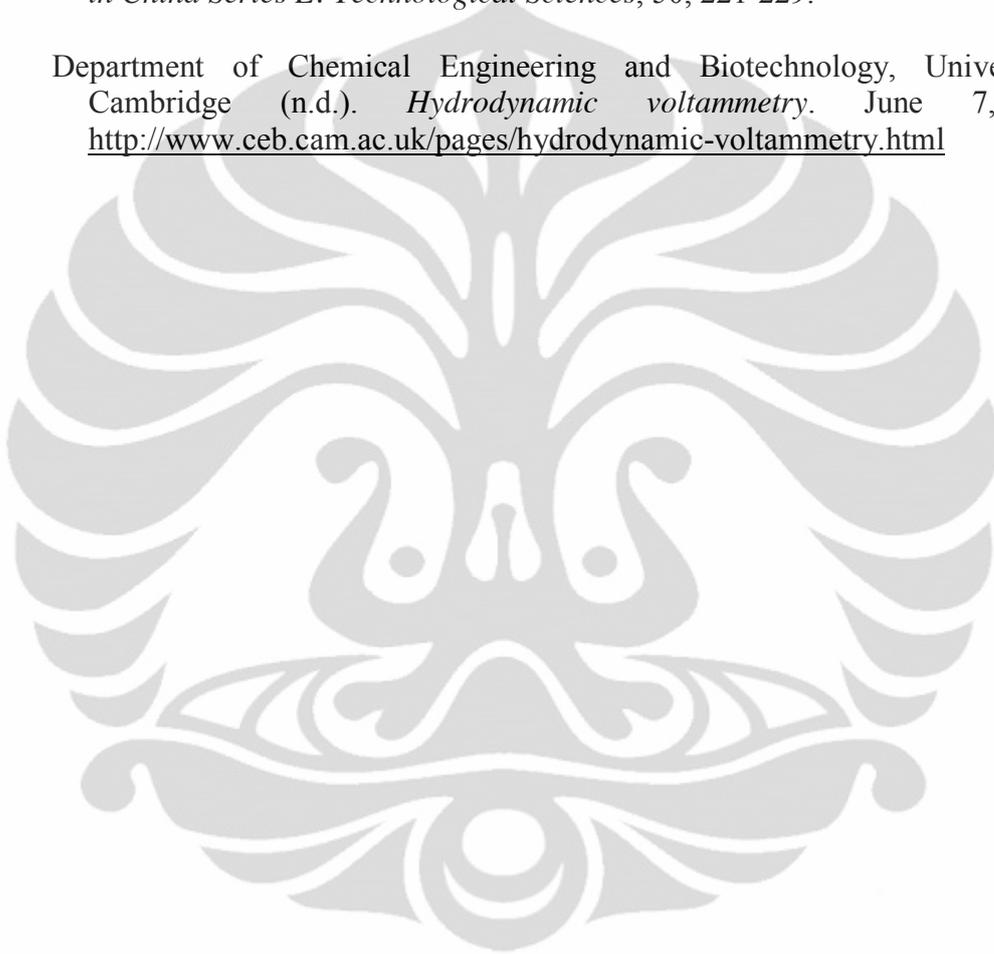
- Haliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2000). *Fundamental of Physics*(6th ed.). New York: John Willey & Sons, Inc.
- Harinaldi, Rhakasywi, D., & Defriadi, R. (2011). Flow and heat transefer characteristics of an impinging synthetic air jet under sinusoidal and triangular wave forcing. *IJET-IJENS: 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 & Budiarto, 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, F. (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 Sinusoidal  
pada Frekuensi 80 hz, 120 hz, dan 160 hz

Menit ke-	Jenis Gelombang		
	80 Hz sin	120 Hz sin	160 Hz sin
0	59	58.9	59
5	58.4	58.2	58.2
10	58.4	58.2	58.3
15	58.4	58.2	58.3
20	58.5	58.2	58.4
25	58.4	58.2	58.4
30	58.4	58	58.3
35	58.4	58.2	58.3
40	58.4	58	58.5
45	58.3	58.2	58.5
50	58.2	58.2	58.5
55	58.5	58.3	58.3
60	58.4	58.2	58.4
65	58.3	58.2	58.3
70	58.3	58.3	58.3
75	58.3	58.3	58.3
80	58.3	58.2	58.3
85	58.3	58.2	58.4
90	58.3	58.2	58.4
95	58.3	58.3	58.5
100	58.2	58.3	58.4
105	58.2	58.3	58.5
110	58.3	58.3	58.4
115	58.2	58.4	58.5
120	58.2	58.3	58.5

\*Catatan: Satuan temperatur dalam °C

Data *Heat Transfer Coefficient Synthetic Jet* Gelombang Sinusoidal  
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	30.42	30.53	30.63
10	30.42	30.53	30.53
15	30.42	30.53	30.53
20	30.33	30.53	30.42
25	30.42	30.53	30.42
30	30.42	30.73	30.53
35	30.42	30.53	30.53
40	30.42	30.73	30.33
45	30.53	30.53	30.33
50	30.63	30.53	30.33
55	30.33	30.42	30.53
60	30.42	30.53	30.42
65	30.53	30.53	30.53
70	30.53	30.42	30.53
75	30.53	30.42	30.53
80	30.53	30.53	30.53
85	30.53	30.53	30.42
90	30.53	30.53	30.42
95	30.53	30.42	30.33
100	30.63	30.42	30.42
105	30.63	30.42	30.33
110	30.53	30.42	30.42
115	30.63	30.33	30.33
120	30.63	30.42	30.33

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