



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**KARAKTERISTIK PENDINGINAN PADA *HEAT SINK*  
MENGUNAKAN *SYNTHETIC JET* YANG DIGERAKKAN  
OLEH KOMBINASI FUNGSI GELOMBANG SINUS DAN  
SEGIEMPAT**

**SKRIPSI**

**ARIEF RANDY WICAKSONO  
0806329842**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
DEPOK  
Januari 2012**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**KARAKTERISTIK PENDINGINAN PADA *HEAT SINK*  
MENGUNAKAN *SYNTHETIC JET* YANG DIGERAKKAN  
OLEH KOMBINASI FUNGSI GELOMBANG SINUS DAN  
SEGIEMPAT**

**SKRIPSI**

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

**ARIEF RANDY WICAKSONO  
0806329842**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
DEPOK  
Januari 2012**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

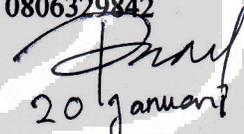
Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Arief Randy Wicaksono

NPM : 0806329842

Tanda Tangan :

Tanggal :

  
20 Januari 2012

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Arief Randy Wicaksono  
NPM : 0806329842  
Program Studi : Teknik Mesin  
Judul Skripsi : Karakteristik Pendinginan pada *Heat Sink*  
menggunakan *Synthetic Jet* yang digerakkan oleh  
kombinasi fungsi gelombang sinus dan segiempat

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	: Ir. Warjito, M.Sc, PhD	
Penguji	: Dr. Ir. Engkos A Kosasih, M.T	

Ditetapkan di : Depok (Universitas Indonesia)

Tanggal : 28 Desember 2011

## UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, 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 yang selama masa kuliah ini telah saya anggap seperti orang tua saya sendiri karena telah membimbing dan mengarahkan saya dari awal perkuliahan sampai akhir pembuatan skripsi ini.
2. Mama tercinta, Neng Nurhemah, yang telah menjadi inspirasi, kekuatan dan motivasi terbesar saya selama ini. Papa saya, Sugiyatno, yang selalu menjadi orang yang saya hormati di hidup saya. Kaka saya, Aviandini Cahyawati Sugiyatno, yang telah menjadi kaka yang hebat untuk saya. Adik saya yang sangat saya cintai, Ratnasari Hinggar Dipta. Andy puguh Nugroho, kaka laki – laki yang sangat membuat saya termotivasi untuk menjadi orang yang lebih baik lagi. Muhammad Devdan Rakesha Pratama yang membawa keceriaan baru di keluarga besar kami. Myra Matchia Syabanisa yang selalu memberikan support dan semangat tanpa henti.
3. Dosen – dosen DTM FTUI yang telah mengajar saya dari awal perkuliahan hingga penulisan skripsi ini, terutama untuk Prof Made, Pak Warjito, Pak Engkos dan Pak Tris yang selalu menjadi inspirasi saya. Tak lupa juga pegawai – pegawai DTM serta pengurus Lab DTM terlebih kepada Pak Udi.
4. Rikko Defriadi ST. dan Damora Rhakasywi ST., M.T selaku mahasiswa S2 dan S3 yang telah memberikan banyak sekali ilmu, pengalamannya, motivasi dan teladan serta contoh yang baik dalam pembuatan alat pengujian skripsi.

5. Christoforus Deberland sebagai rekan satu tim dan partner kuliah saya sejak masa maba yang selalu sabar, tekun dan banyak kepentingan selama mengerjakan skripsi ini.
6. Saudara – saudara seperjuangan saya Ashar Okta, Muhammad Yudha, Alfi Indra, Zein Hamid, Muhammad Husin, dwi laksono, mach noviali, Akhmad Fahri Iqbal, Reza Saputra, Aditya Prima Perkasa, Ziad maulana zein, Teddy Marlevi, Rachmi Satarsyah yang sudah bagaikan keluarga saya sendiri selama ini.
7. Senior – senior yang sangat saya hormati terutama Arthur, Raja, Cakra, dipta, rizky dan lainnya yang selalu membimbing saya saya selama ini.
8. Teman – teman teknik mesin 2008 yang akan selalu menjadi saudara sedarah sampai kapanpun. SOLIDARITY FOREVER.
9. 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, Januari 2012

Penulis

## HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

---

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

Nama : Arief Randy Wicaksono

NPM : 0806329842

Program Studi : Teknik Mesin

Departemen : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

Jenis karya : Skripsi

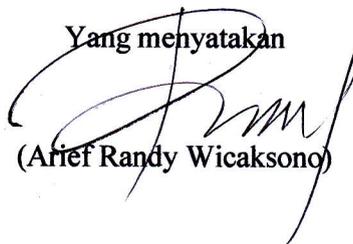
demikian demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**KARAKTERISTIK PENDINGINAN PADA *HEAT SINK*  
MENGUNAKAN *SYNTHETIC JET* YANG DIGERAKKAN OLEH  
KOMBINASI FUNGSI GELOMBANG SINUS DAN SEGIEMPAT**  
berserta 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 Januari 2012

Yang menyatakan  
  
(Arief Randy Wicaksono)

## ABSTRAK

Nama : Arief Randy Wicaksono  
Program Studi : Teknik Mesin  
Judul : **Karakteristik Pendinginan pada *Heat Sink* Menggunakan *Synthetic Jet* yang Digerakan oleh Kombinasi Fungsi Gelombang Sinus dan Segiempat**

Sistem pendinginan konvensional dengan menggunakan fan dianggap sudah tidak lagi efektif dan memadai untuk diaplikasikan dewasa ini. Miniaturisasi produk dengan performa kinerja yang semakin canggih menyebabkan diperlukannya sistem pendingin baru yang mempunyai efisiensi termal yang tinggi dan juga hemat energi. *Synthetic jet* dapat dijadikan sistem pendinginan baru berdasar *input massa netto* nol tetapi momentum tidak nol. Dalam penelitian ini dua buah membran jet sintetik dengan tipe aliran *impinging* akan digetarkan dengan menggunakan variasi gelombang *sinusoidal* dan *square*. Penelitian akan dilakukan dengan menggunakan komputasional dan eksperimental.

Pada tahap komputasional penelitian ini menggunakan *software CFD Fluent* dengan model turbulensi *k-w SST* dengan elemen *meshing* Tet/Hybrid tipe Tgrid, sedangkan pada tahap eksperimental menggunakan *function generator* untuk menggerakkan membran dengan menggunakan fungsi variasi *Sinusoidal* dan *Square* serta 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 gelombang *Sinusoidal* 120 Hz – *Square* 80 hz.

**Kata Kunci :**  
***CFD Fluent, Function Generator, Gelombang Sinusoidal, Gelombang Square, Eksitasi, Impinging Synthetic Jet, Laju perpindahan panas, Meshing, Model turbulensi k-w SST, Synthetic jet***

## ABSTRACT

Name : Arief Randy Wicaksono  
Study Program : Mechanical Engineering  
Title : **The Characteristics of Cooling on Heat Sink Using a Synthetic Jet Actuated by Combined Sinusoidal and Square Wave Function**

Nowadays, the conventional fan-based cooling is no longer effective and applicable. Miniaturization with higher performance of electronic products causes the need for a new cooling system that high thermal efficiency and low energy consumption. Synthetic jet is a new cooling system based on zero netto mass input but non zero momentum. An impinging synthetic jet which has two membranes will oscillate using two variation of sinusoidal and square wave. This research was conducted both in computational and also experimental stage.

Computational stage was conducted by Fluent CFD Fluent software with a turbulence model k-w SST with meshing elements Tet/Hybrid type TGrid, while in the experimental the function generators will used to drive the membranes with the variation of sinusoidal and square wave in three oscillation frequencies: 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 *Sinusoidal 120 Hz – Square 80 hz*.

**Key words :**

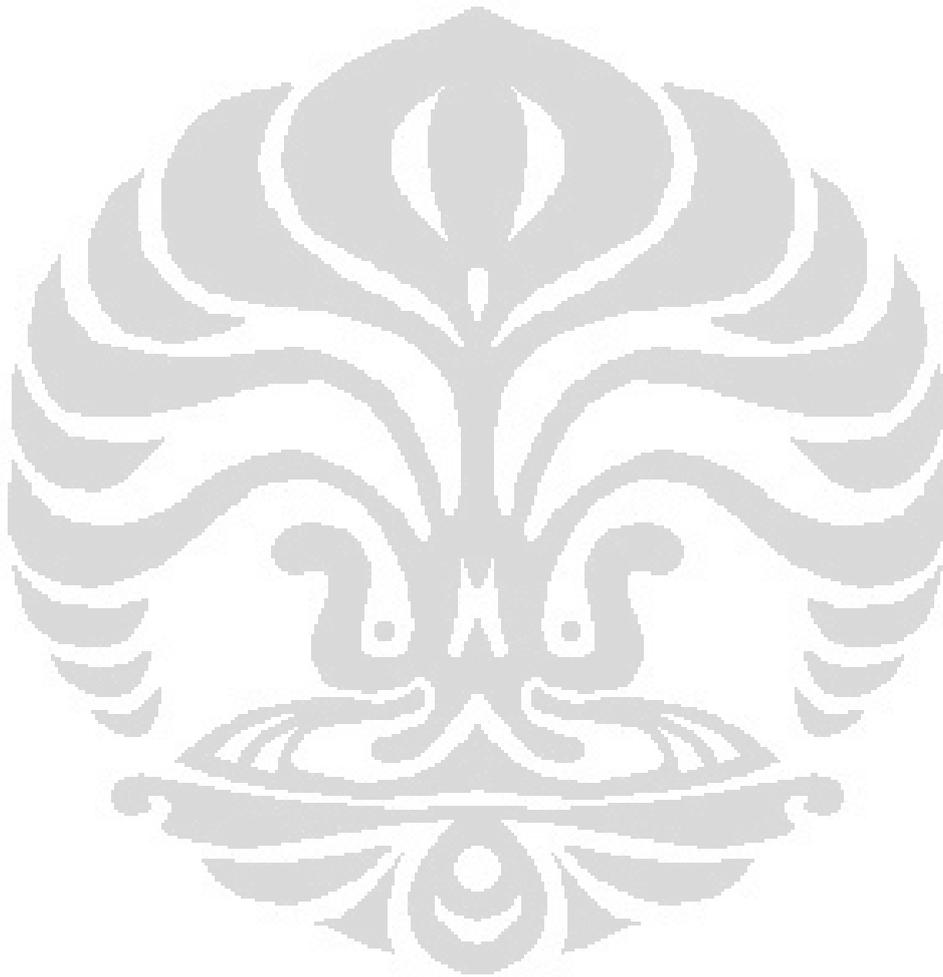
***CFD Fluent, Function Generator, Sinusoidal Wave, Square Wave, Excitation, Impinging Synthetic Jet, Heat Transfer Rate, Meshing, Turbulence Model k-w SST, Synthetic jet***

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
UCAPAN TERIMA KASIH.....	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	v
ABSTRAK.....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xvi
DAFTAR NOTASI.....	xvii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xviii
<b>BAB 1. PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Pembatasan Masalah.....	2
1.3 Metodologi.....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Sistematika Penulisan.....	4
<b>BAB 2. DASAR TEORI.....</b>	<b>5</b>
2.1 <i>Synthetic Jet</i> .....	5
2.2 Gelombang.....	9
2.3 Perpindahan Kalor.....	19
2.3.1 Perpindahan Kalor Konduksi.....	19
2.3.2 Perpindahan Kalor Konveksi.....	20
2.3.3 Perpindahan Kalor Radiasi.....	21
2.4 Aliran Fluida.....	21
2.4.1 Aliran Laminar.....	21
2.4.2 Aliran Transisi.....	22
2.4.3 Aliran Turbulen.....	22
2.5 CFD Fluent.....	23

2.5.1 Gambit .....	23
2.5.2 Fluent .....	23
2.6 Perhitungan <i>heat transfer coefficient</i> .....	26
2.7 Perhitungan luas penampang <i>heat sink</i> .....	28
<b>BAB 3. SISTEM PENDINGINAN DENGAN JET SINTETIK.....</b>	<b>30</b>
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	30
3.2 Modul Jet Sintetik.....	31
3.3 Tahap Komputasional.....	32
3.4 Tahap Eksperimen.....	34
3.4.1 Komponen dan Peralatan Tambahan.....	39
3.4.2 Prosedur Pengambilan Data.....	40
<b>BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>41</b>
4.1 Analisa Komputasional .....	41
4.1.1 Sudut Fasa Gelombang 0 – 360.....	42
4.1.1.1 Analisis Kontur Thermal.....	43
4.1.2 Analisis Kontur Vortisitas .....	45
4.1.3 Analisis Vector Temperatur.....	47
4.1.4 Analisis Kontur Intensitas Turbulensi .....	50
4.2 Sudut Fasa Gelombang 0 – 360.....	53
4.2.1 Analisa variasi sinyal Sinusoidal 80Hz – Square 160Hz .....	54
4.2.2 Analisa variasi sinyal Sinusoidal 160Hz – Square 80Hz .....	58
4.3 Sudut Fasa Gelombang 0 – 720.....	62
4.3.1 Analisa variasi sinyal Sinusoidal 80Hz – Square 120Hz.....	63
4.3.2 Analisa variasi sinyal Sinusoidal 120Hz – Square 80Hz.....	67
4.4 Sudur Fasa Gelombang 0 - 1080.....	70
4.4.1 Analisa variasi sinyal Sinusoidal 120Hz – Square 160Hz .....	71
4.4.2 Analisa Kontur variasi sinyal Sinusoidal 160Hz – Square 120Hz .....	75
4.5 Analisis Eksperimental .....	78
4.5.1 Analisis Perubahan Temperatur terhadap Waktu .....	78
4.5.2 Analisis Koefisien Perpindahan Kalor Konveksi terhadap Waktu.....	80

4.6 Tingkat Kepercayaan ( <i>Level of Confidence</i> ) dan Persentase Error Pengukuran Penelitian .....	81
<b>BAB 5. KESIMPULAN .....</b>	<b>84</b>
5.1 Kesimpulan.....	84
5.2 Saran .....	86
<b>DAFTAR REFERENSI .....</b>	<b>87</b>



## DAFTAR GAMBAR

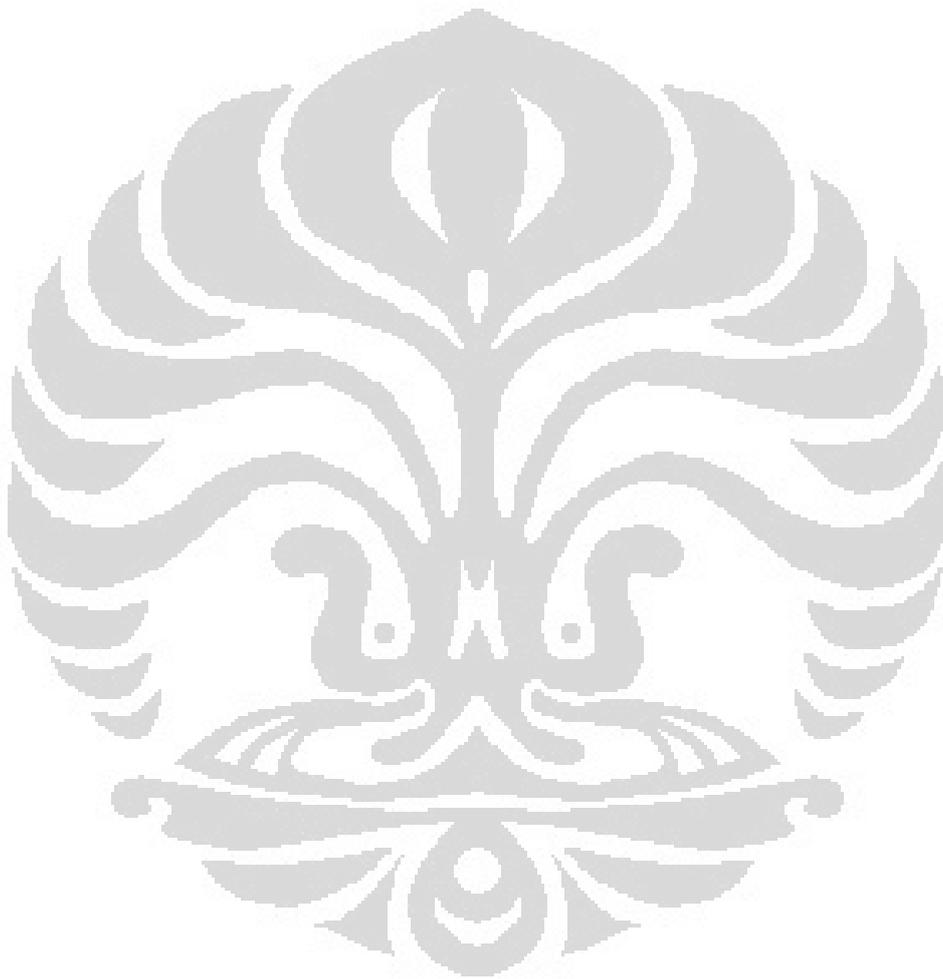
Gambar 2.1	Sketsa dari <i>synthetic jet</i> yang terbentuk karena adanya pergerakan diafragma dalam <i>cavity</i> .....	4
Gambar 2.2	Sketsa jet sintetik yang dibentuk oleh actuator dalam <i>cavity</i> dengan saluran keluar orifis .....	5
Gambar 2.3	Model <i>Impinging Jet</i> .....	7
Gambar 2.4	Model <i>Cross-Flow Jet</i> .....	7
Gambar 2.5	Gelombang yang merambat pada sebuah tali.....	9
Gambar 2.6	Gelombang Transversal .....	10
Gambar 2.7	Gelombang Longitudinal .....	11
Gambar 2.8	Gelombang satu dimensi yang berjalan ke arah kanan dengan kecepatan $v$ pada $t=0$ .....	11
Gambar 2.9	Gelombang sinusoidal yang berjalan ke arah kanan dengan kecepatan $v$ setelah berjalan selama $t$ detik.....	12
Gambar 2.10	Gelombang sinusoidal yang berjalan ke arah kanan dengan kecepatan $v$ .....	12
Gambar 2.11	Gelombang square dan triangle.....	13
Gambar 2.12	Transormasi gelombang sinus menjadi triangle.....	14
Gambar 2.13	Transormasi gelombang sinus menjadi square .....	14
Gambar 2.14	Sinusoidal 80 Hz – Square 80 Hz .....	15
Gambar 2.15	Sinusoidal 80 Hz – Square 120 Hz .....	15
Gambar 2.16	Sinusoidal 80 Hz – Square 160 Hz .....	16
Gambar 2.17	Sinusoidal 120 Hz – Square 80 Hz .....	16
Gambar 2.18	Sinusoidal 120 Hz – Square 120 Hz .....	16
Gambar 2.19	Sinusoidal 120 Hz – Square 160 Hz .....	17
Gambar 2.20	Sinusoidal 160 Hz – Square 80 Hz .....	17
Gambar 2.21	Sinusoidal 160 Hz – Square 120 Hz .....	17

Gambar 2.22	Sinusoidal 160 Hz – Square 160 Hz .....	18
Gambar.2.23	Skematik perpindahan kalor konveksi .....	19
Gambar 2.24	Aliran Laminar dan Turbulen.....	21
Gambar 2.25	Skematik proses kerja <i>step by step</i> Gambit – CFD .....	22
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian .....	27
Gambar 3.2	Model fisik <i>synthetic jet</i> (dalam cm) (a) Susunan aktuator <i>synthetic jet</i> dengan <i>heat sink</i> (b) Detail aktuator <i>synthetic jet</i> (c) memperlihatkan <i>prototype</i> yang telah terintegrasi dengan jet sintetik.....	29
Gambar 3.3	Gambaran daerah komputasi jet sintetik.....	29
Gambar 3.4	<i>Experimental Setup</i> .....	31
Gambar 3.5	Komputer .....	32
Gambar 3.6	<i>Thermostat</i> .....	32
Gambar 3.7	<i>Heater Mat</i> .....	33
Gambar 3.8	Jet Sintetik dengan <i>prototype</i> dan membrane .....	33
Gambar 3.9	Digital Multimeter DMM, Lutton, dan APPA.....	34
Gambar 3.10	<i>Heat sink</i> .....	34
Gambar 3.11	<i>Function Generator</i> .....	35
Gambar 3.12	<i>Thermocouple</i> .....	35
Gambar 3.13	<i>Glue Gun</i> .....	36
Gambar 3.14	<i>Hygrometer</i> .....	36
Gambar 4.1	Gambar grafik sinusoidal dan square untuk sudut fasa 0 - 360 .....	40
Gambar 4.2	Kontur Temperatur pada Sudut Fasa Gelombang 0 – 360.....	41
Gambar 4.2a	Kontur thermal saat memasuki waktu ke - 0.00625s pada frekuensi sinusoidal 80 Hz – square 80 Hz.....	42
Gambar 4.2b	Kontur thermal setelah satu siklus pada frekuensi sinusoidal 80 Hz – square 80 Hz.....	43
Gambar 4.3a	Kontur vortisitas saat puncak pertama pada frekuensi sinusoidal 80 Hz – square 80 Hz.....	44

Gambar 4.3b	Kontur vortisitas memasuki fase $\frac{3}{4}$ gelombang pada frekuensi sinusoidal 80 Hz – square 80 Hz.....	45
Gambar 4.3	Kontur Hasil Simulasi Sudut Fasa Gelombang 0 – 360.....	46
Gambar 4.4a	Vector temperatur memasuki fase puncak pertama pada frekuensi sinusoidal 80 Hz – square 80 Hz.....	48
Gambar 4.4b	Vector temperatur pada fasa akhir satu gelombang pada frekuensi sinusoidal 80 Hz – square 80 Hz.....	48
Gambar 4.4	<i>Velocity vector</i> temperatur pada gelombang sinusoidal 80 – square 80, Sinusoida; 120 – Square 120, Sinusoidal 60 – Square 160.....	49
Gambar 4.5a	Kontur intensitas turbulensi saat fase puncak pada frekuensi sinusoidal 80 Hz – square 80 Hz.....	51
Gambar 4.5b	Kontur intensitas turbulensi saat lembah pada frekuensi sinusoidal 80 Hz – square 80 Hz.....	51
Gambar 4.5	Intensitas Turbulensi Untuk Sudut Fasa Gelombang 0 – 360.....	52
Gambar 4.6	Gambar grafik sinusoidal 80Hz dan square 160Hz untuk sudut fasa 0 - 360 .....	53
Gambar 4.7	Gambar grafik sinusoidal 160Hz dan square 80Hz untuk sudut fasa 0 - 360 .....	54
Gambar 4.8a	Kontur temperatur frekuensi sinusoidal 120 Hz – square 80 Hz .....	55
Gambar 4.8b	Kontur turbulen intensiti frekuensi sinusoidal 120 Hz – square 80 Hz .....	55
Gambar 4.8c	Kontur vector temperatur saat fase akhir 3 gelombang sinusoidal dan 2 square pada frekuensi sinusoidal 120 Hz – square 80 Hz .....	56
Gambar 4.8	Kontur Temperatur, Intensitas Turbulensi, Kontur Vortisitas, <i>Velocity vector</i> temperatur pada gelombang sinusoidal 80Hz – Square 160 Hz.....	57
Gambar 4.9a	Kontur temperatur saat detik ke 0.00625 frekuensi sinusoidal 160 Hz – square 80 Hz.....	58
Gambar 4.9b	Kontur intensitas turbulensi saat detik ke 0.0125 frekuensi sinusoidal 160 Hz – square 80 Hz.....	59
Gambar 4.9c	Velocity Vector saat detik ke 0.025 frekuensi sinusoidal 160 Hz – square 80 Hz.....	59

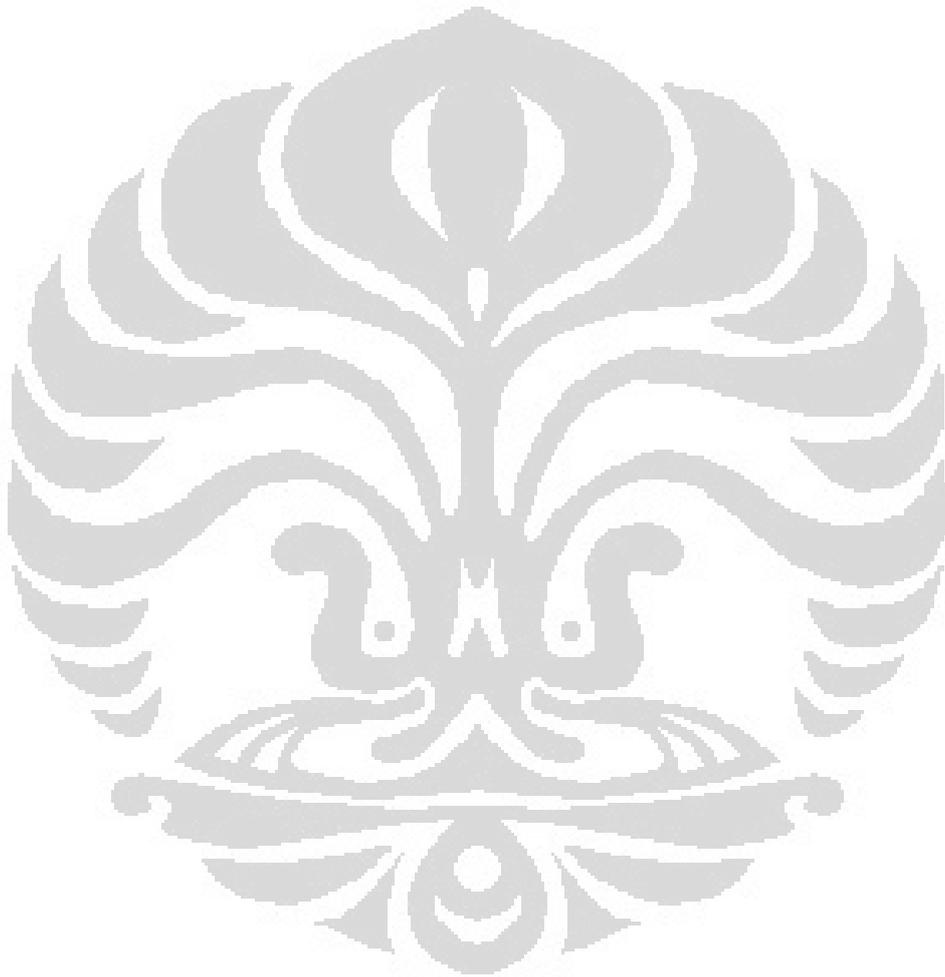
Gambar 4.9	Kontur Temperatur, Intensitas Turbulensi, Kontur Vortisitas, <i>Velocity vector</i> temperatur pada gelombang sinusoidal 160Hz – Square 80 Hz .....	61
Gambar 4.10	Gambar grafik sinusoidal 80Hz dan square 120Hz untuk sudut fasa 0 – 720.....	62
Gambar 4.11	Gambar grafik sinusoidal 120Hz dan square 80Hz untuk sudut fasa 0 – 720.....	63
Gambar 4.12a	Kontur temperatur saat detik ke 0.025 frekuensi sinusoidal 80 Hz – square 120 Hz.....	64
Gambar 4.12b	<i>Velocity vector</i> saat detik ke 0.0125 frekuensi sinusoidal 80 Hz – square 120 Hz.....	65
Gambar 4.12	Kontur Temperatur, Intensitas Turbulensi, Kontur Vortisitas, <i>Velocity vector</i> temperatur pada gelombang sinusoidal 80Hz – Square 120 Hz .....	66
Gambar 4.13a	Intensitas Turbulensi detik ke-0.00625 120 Hz – square 80 Hz .....	67
Gambar 4.13b	Kontur Vortisiti 120 Hz – square 80 Hz .....	68
Gambar 4.13	Kontur Temperatur, Intensitas Turbulensi, Kontur Vortisitas, <i>Velocity vector</i> temperatur pada gelombang sinusoidal 120Hz – Square 80 Hz .....	69
Gambar 4.14	Gambar grafik sinusoidal 80Hz dan square 120Hz untuk sudut fasa 0 – 720.....	70
Gambar 4.15	Gambar grafik sinusoidal 120Hz dan square 80Hz untuk sudut fasa 0 – 720.....	71
Gambar 4.16a	Kontur temperatur saat detik ke 0.00416667 frekuensi sinusoidal 120 Hz – square 160 Hz .....	72
Gambar 4.16b	Intensitas Turbulen saat detik ke 0.00416667 frekuensi sinusoidal 120 Hz – square 160 Hz .....	72
Gambar 4.16	Kontur Temperatur, Intensitas Turbulensi, Kontur Vortisitas, <i>Velocity vector</i> temperatur pada gelombang sinusoidal 120Hz – Square 160 Hz .....	74
Gambar 4.17a	Kontur temperatur saat detik ke 0.008333 frekuensi sinusoidal 160 Hz – square 120 Hz .....	75
Gambar 4.17b	Vector velocity saat detik ke 0.01666667 frekuensi sinusoidal 160 Hz – square 120 Hz .....	76

Gambar 4.17	Kontur Temperatur, Intensitas Turbulensi, Kontur Vortisitas, <i>Velocity vector</i> temperatur pada gelombang sinusoidal 160Hz – Square 120 Hz .....	77
Gambar 4.18	Grafik temperatur pendinginan <i>synthetic jet</i> terhadap waktu .....	80
Gambar 4.19	Grafik Gambar koefisien perpindahan kalor <i>synthetic jet</i> terhadap waktu .....	81



## DAFTAR TABEL

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

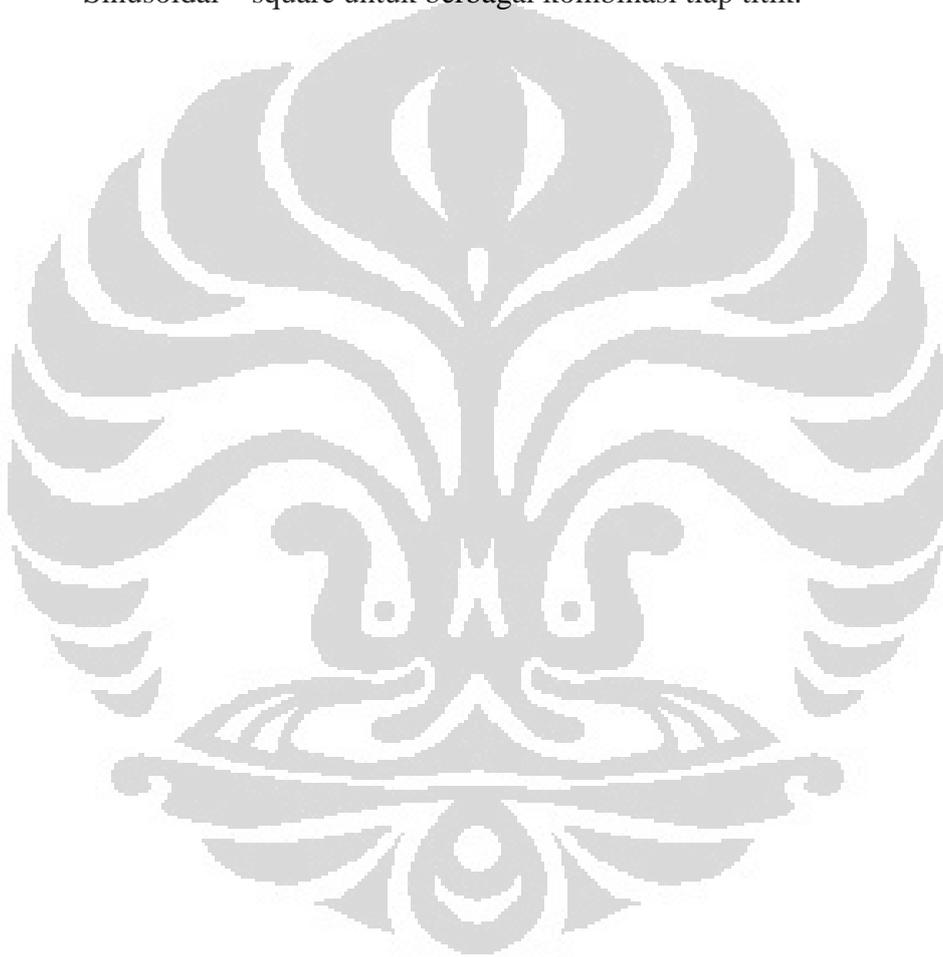


## DAFTAR NOTASI

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 - Square untuk berbagai kombinasi frekuensi tiap titik.
- L2 Data *Heat Transfer Coefficient Synthetic Jet* dengan Fungsi Gelombang Sinusoidal – square untuk berbagai kombinasi tiap titik.



# 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. Kecanggihan teknologi yang terus berkembang harus tentunya 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*). Metode pendinginan yang masih umum digunakan saat ini adalah sistem pendinginan konvensional yang masih menggunakan *fan/blower* yang memanfaatkan konveksi paksa dengan udara sebagai fluida kerjanya. Sampai saat ini perangkat elektronik skala menengah sampai besar kebanyakan masih menggunakan metode ini pada aplikasi sistem pendinginannya baik untuk sirkulasi udara menyeluruh atau peningkatan laju pendinginan lokal.

Bar-Cohen [1] menunjukkan bahwa sistem pendinginan udara masih merupakan alternatif yang diminati konsumen karena kemudahan implementasinya. Namun, perkembangan industri elektronik menuntut miniaturisasi produk berkinerja tinggi yang ditandai dengan munculnya perangkat-perangkat seperti *netbook*, *PDA*, *smartpone* dll. Pada perangkat yang berukuran semakin kecil ini peningkatan fluks kalor lokal pada komponen sirkuit terpadu (*integrated circuit*) sangat mempengaruhi kinerja dan daya tahannya jika tidak ditangani dengan baik.

Dengan mengecilnya ukuran, masalah utama yang dihadapi dengan sistem pendinginan konveksi paksa berbasis fan adalah penurunan tekanan yang rendah, bising, efektifitas termal yang rendah dan factor bentuk yang besar. Kekurangan-kekurangan tersebut perlu diatasi dengan metode pendinginan

yang berkinerja tinggi, hemat energi dan hemat tempat. 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. Alternative baru yang menjanjikan adalah menggunakan efek jet, khususnya *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.

Menurut V. Timchenko, J. Reizes dan E. Leonardi [3] Penggunaan sintetis jet ditujukan untuk mengganggu aliran laminar yang terdapat pada suatu sistem dan mengubahnya menjadi sebuah aliran turbulen yang dimana hal ini bertujuan untuk meningkatkan perpindahan panas pada suatu sistem tersebut terhadap lingkungannya. Hal ini sesuai dengan prinsip perpindahan panas dimana laju perpindahan panas dari suatu sistem yang mempunyai pola aliran turbulen akan lebih cepat dan lebih efisien di bandingkan dengan laju aliran panas pada sistem yang mempunyai pola aliran laminar.

Teknologi jet sintetis selama ini dikembangkan pada aplikasi aerodinamika untuk mengurangi gaya hambat/*drag*. Penerapannya di bidang perpindahan kalor untuk mengendalikan aliran termal pada sistem pendinginan relatif baru, sehingga masih diperlukan pemahaman yang lebih lengkap dalam menggali potensinya pada aplikasi penggunaan jet sintetis khususnya untuk sistem pendinginan.

## 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. Dua membran pada *synthetic jet* dikontrol pada jenis serta frekuensi yang berbeda dengan menggunakan dua *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  $\pm 28 - 30^{\circ}\text{C}$  serta keadaan kelembaban lingkungan ( Rh 70% - 82%). 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 dipakai untuk melakukan eksperimen.

### 1.4 Tujuan Penelitian

Secara umum penelitian ini memiliki tujuan untuk mengembangkan *synthetic jet* sebagai sebuah metode pendinginan yang dapat diaplikasikan pada peralatan elektronik yang efisien dan ramah lingkungan untuk menggantikan sistem pendinginan konvensional yang banyak berupa *fan/blower* yang banyak digunakan pada saat ini yang mana dirasa sistem pendinginan konvensional tersebut tidak lagi dapat memenuhi tuntutan perkembangan teknologi yang terus berkembang karena tidaklah efisien dalam konsumsi energinya dan secara *form factor* sudah tidak memungkinkan lagi untuk digunakan.

*Synthetic jet* diuji dengan menggunakan gelombang variasi dengan kombinasi sinusoidal dan square. *Synthetic jet* dengan gelombang *sinusoidal* dan *square*

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 *Sinusoidal – Square* pada variasi frekuensi.

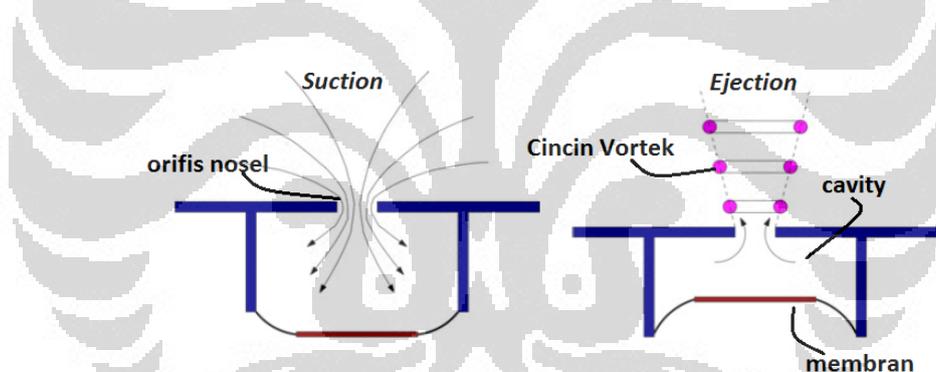
**Bab V** berisi mengenai kesimpulan dan saran yang diberikan atas hasil penelitian yang telah dilakukan.

## BAB 2

### DASAR TEORI

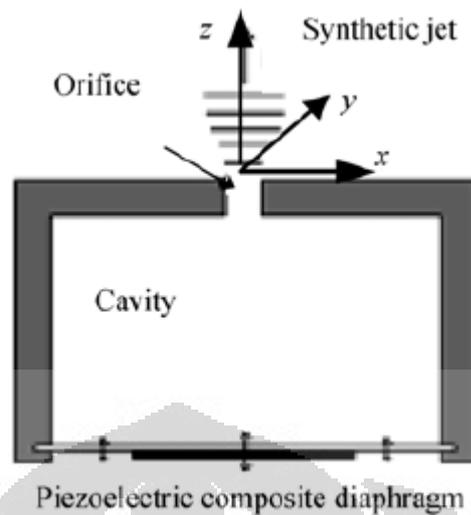
#### 2.1 *Synthetic Jet*

Jet sintetik adalah rangkaian – rangkaian cincin vortex yang terbentuk oleh getaran harmonik sebuah diafragma dengan intensitas turbulensi tinggi yang mendukung laju perpindahan kalor, momentum, dan massa. Jet harmonik sintetik dihasilkan oleh sebuah aktuator jet sintetik (*Synthetic Jet Actuator*) teknis, aktuator ini adalah peralatan yang memerlukan input massa nol (*zero mass input*), namun menghasilkan output momentum netto tidak nol (*non zero momentum output*). Secara visual *synthetic jet* dapat digambarkan seperti pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Sketsa dari jet sintetik yang terbentuk karena adanya pergerakan diafragma dalam *cavity*  
(Sumber: Khrisnan & Mohseni, 2010)

Jet sintetik ini terbentuk dari perpaduan rangkaian vortex yang ditimbulkan oleh getaran harmonik sebuah diafragma yang berfungsi sebagai dinding sebuah *cavity*. Gambar 7 menunjukkan sketsa konseptual sebuah jet sintetik yang dihasilkan sebuah aktuator.



Gambar 2.2. Sketsa jet sintetik yang dibentuk oleh actuator dalam cavity dengan saluran keluar orifis (JingZhou, Zhang., XiaoMing, Tan. “Eksperimenal study on flow and heat transfer characteristics of synthetic jet driven by piezoelectric actuator”, College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, China)

Jika amplitudo getaran diafragma cukup besar, separasi aliran terjadi disekitar orifis yang berfungsi sebagai saluran keluar-masuk aliran fluida. Dengan demikian, suatu lapisan geser akan terbentuk antara fluida yang keluar dan fluida di sekelilingnya.

Lapisan geser ini kemudian menggelinding membentuk cincin vortex (pada nosel jet lingkaran) atau pasangan vortex (pada nosel jet slot). Secara ringkas, sebuah jet sintetik adalah deretan incin-cincin vortex yang terbentuk secara berurutan. Saat ini studi pendahuluan karakterisasi jet sintetik sedang dilakukan oleh peneliti dalam skema penelitian lain di bidang aerodinamika.

Konsep penggunaan jet sintetik untuk aplikasi perpindahan kalor relatif baru jika dibandingkan dengan aplikasinya di bidang aerodinamika. Namun demikian, pada dasarnya sebuah jet sintetik adalah rangkaian cincin vortex berurutan dengan intensitas turbulensi tinggi yang mendukung laju perpindahan kalor, momentum dan massa. Potensi awal ditunjukkan Thompson et al. [5] yang mendapatkan peningkatan disipasi kalor sampai 250% pada pendinginan langsung menggunakan jet sintetik berdiameter 1,06 mm dengan jet normal dibandingkan konveksi alamiah terhadap modul multichip 49 elemen. Russel [6] mengkombinasikan aliran udara jet sintetik

dan aliran fan untuk meningkatkan laju perpindahan kalor kompartemen modul chips dan mendapatkan kebutuhan aliran dari fan yang jauh lebih kecil untuk laju pendinginan yang sama. Mahalingam dan Glezer [7] mengembangkan modul penyerapan kalor terpadu berbasis jet sintetik yang dapat menghasilkan laju disipasi kalor sampai lebih dari 100 W pada laju aliran udara 3-4 cfm. Mahalingam, Rumigny, dan Glezer [8] juga mengembangkan penyerap kalor aktif volume kecil untuk kapasitas laju disipasi kalor menengah. Sementara itu pada kajian terkini, King dan Jagannahta [9] mendinginkan komponen elektronik dengan menggunakan metode jet sintetik non-sinusoidal. Sementara itu Lasance dan Aarts [10] mengembangkan metode dipole akustik asimetris pada jet sintetiknya yang diterapkan untuk sistem pendinginan komponen mikroelektronik. Dalam review terkini, Lasance dan Aarts [11] menekankan bahwa untuk aplikasi pendinginan lanjut optimisasi perancangan modul pendingin berbasis jet harus didukung oleh studi numerik dengan mengadaptasi teori jet kontinyu.

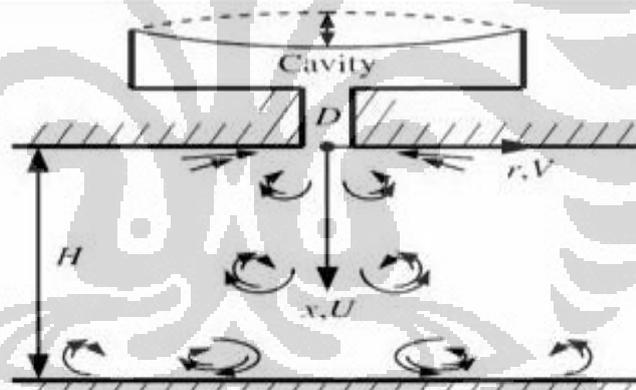
*Synthetic jet* terus dikembangkan karena memiliki keuntungan dibanding sistem pendinginan konvensional seperti fan. Pada sistem fan kebutuhan suplai udara dipenuhi dengan mengalirkan fluida udara dari satu tempat ke tempat lainnya. Sistem *synthetic jet* menawarkan keuntungan utama yaitu hanya menggunakan 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

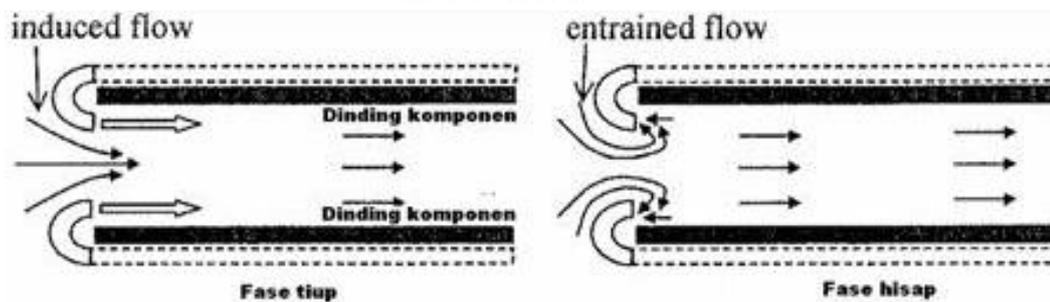
Akan tetapi pada sistem *synthetic jet* terutama *impinging* memiliki kelemahan utama pada fluida udara yang dihisap kembali pada fase *suction*. Jika udara yang dibuang pada fase pembuangan kalor terdapat udara panas dan dihisap ke dalam *cavity* maka akan timbul akumulasi panas dalam *cavity synthetic 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 2.3 Model *Impinging Jet*

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



Gambar 2.4 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).

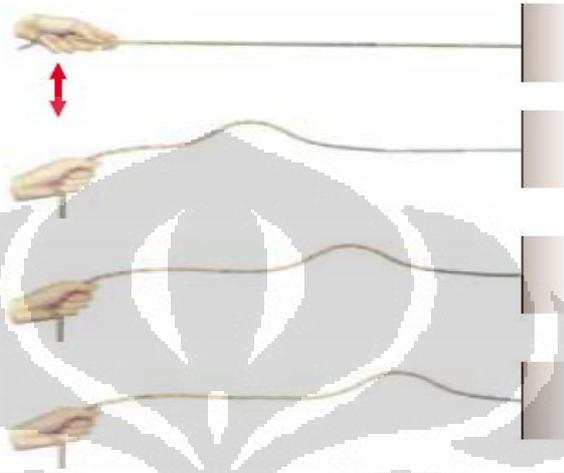
Pengetahuan mengenai *synthetic jet* sebenarnya masih sangat terbatas. Penelitian mengenai *synthetic jet* seperti perbandingan bilangan Nusselt pada *synthetic jet* dengan menggunakan gelombang sinusoidal dan non-sinusoidal untuk melihat koefisien *heat transfer* gelombang menunjukkan hasil 5 – 10% 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 dari getaran yang merambat pada suatu medium. Pada gelombang yang merambat adalah gelombangnya, bukan zat medium perantaranya. Satu gelombang dapat dilihat panjangnya dengan menghitung jarak antara lembah dan bukit (gelombang transversal) atau menghitung jarak antara satu rapatan dengan satu renggangan (gelombang longitudinal). Cepat rambat gelombang adalah jarak yang ditempuh oleh

gelombang dalam waktu satu detik. 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.



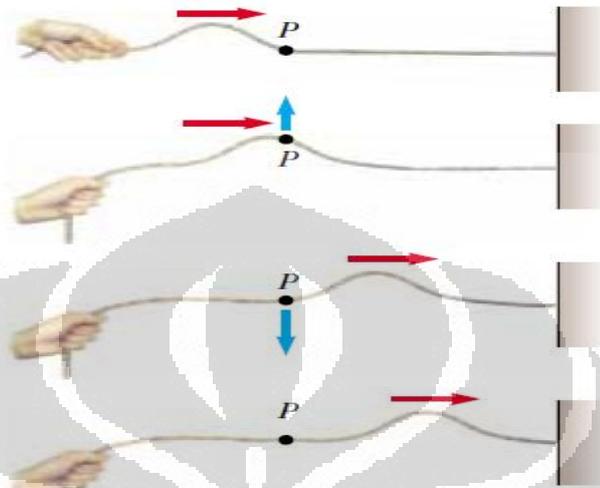
Gambar 2.5 Gelombang yang merambat pada sebuah tali  
(Sumber: Fundamental of Physics-Haliday Resnick,2000)

Gelombang secara garis besar dibedakan menjadi dua macam, yaitu : 1) berdasarkan medium perambatannya dan 2) berdasarkan arah rambat gelombangnya.

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.

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

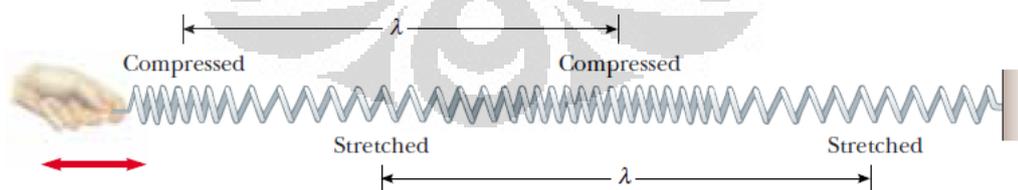
gerak partikelnya bergerak tegak lurus terhadap arah rambatannya (digambarkan pada gambar 2.5). Contoh dari gelombang transversal adalah gelombang cahaya dan gelombang pada tali.



Gambar 2.6 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 2.7 Gelombang Longitudinal

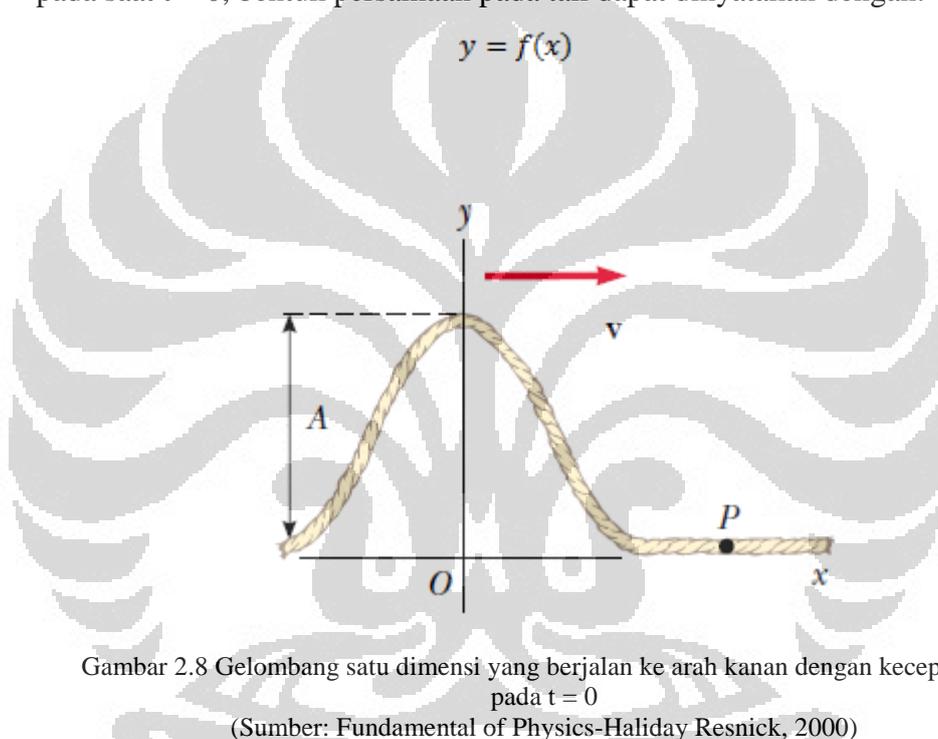
(Sumber: Fundamental of Physics-Haliday Resnick,2000)

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 2.8 Gelombang satu dimensi yang berjalan ke arah kanan dengan kecepatan  $v$  pada  $t = 0$   
(Sumber: Fundamental of Physics-Haliday Resnick, 2000)

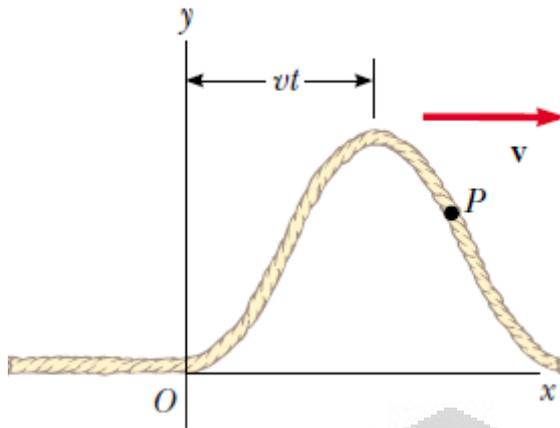
Setelah gelombang bergerak setelah  $t$  detik dengan jarak  $s = v.t$  (gambar 2.9), maka persamaan pada tali dapat dinyatakan:

- pada saat gelombang berjalan mengarah ke kanan,

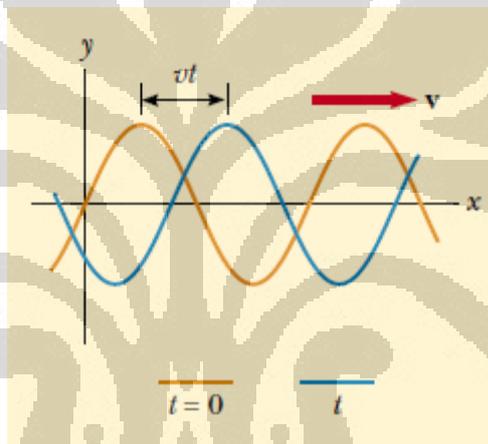
$$y = f(x - vt) \quad (2.2)$$

- pada saat gelombang berjalan mengarah ke kiri,

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



Gambar 2.9 Gelombang satu dimensi yang berjalan ke arah kanan dengan kecepatan  $v$  setelah berjalan selama  $t$  detik  
(Sumber: Fundamental of Physics-Haliday Resnick,2000)



Gambar 2.10 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*  $\omega$ :

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

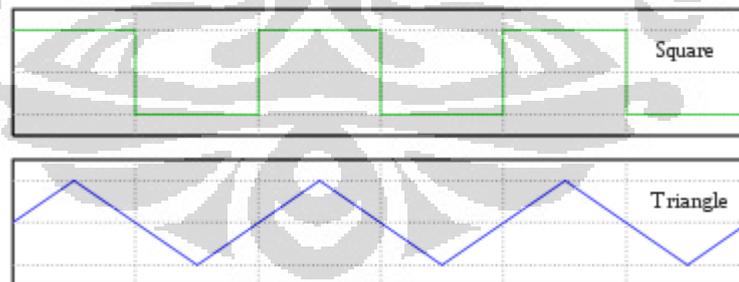
$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2.9)$$

Maka,

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

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

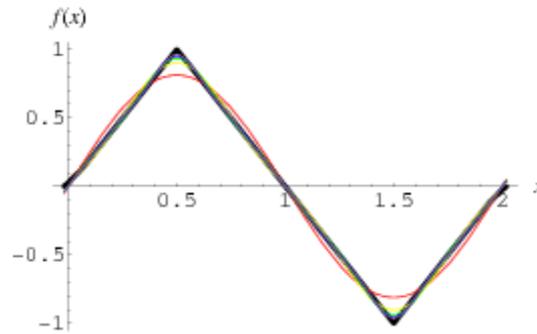
Terdapat juga gelombang dengan bentuk non-sinusoidal. Yaitu gelombang triangle dan square.



Gambar 2.11 Gelombang square dan triangle

(Sumber: [http://en.wikipedia.org/wiki/Triangle\\_wave](http://en.wikipedia.org/wiki/Triangle_wave))

Kedua gelombang ini sebenarnya merupakan penurunan dari gelombang sinusoidal dengan nilai harmonik tertentu. Apabila dijabarkan gelombang triangle dapat dijabarkan dengan persamaan fourier dengan formula sebagai berikut :



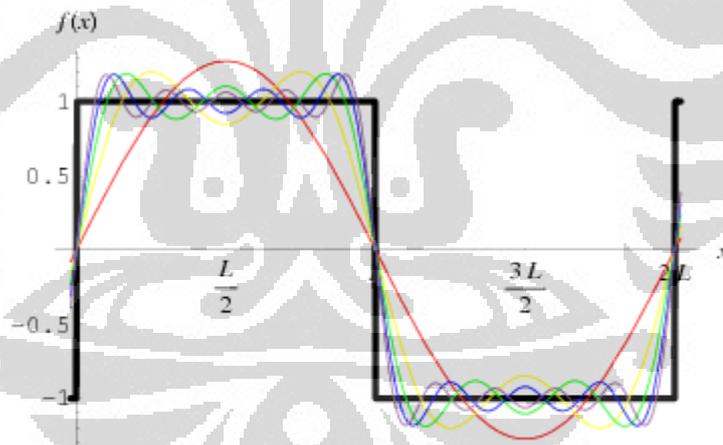
Gambar 2.12 Transformasi gelombang sinus menjadi triangle

(Sumber: <http://mathworld.wolfram.com/FourierSeriesTriangleWave.html>)

Fungsi gelombang triangle dinyatakan dengan deret *Fourier* yaitu:

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

Sedangkan gelombang square dapat dijabarkan sebagai berikut :



Gambar 2.13 Transformasi gelombang sinus menjadi square

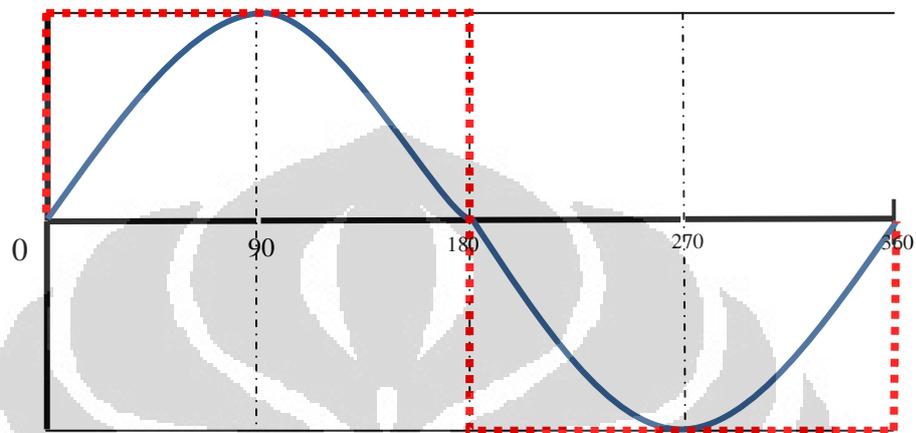
(Sumber: <http://mathworld.wolfram.com/FourierSeriesTriangleWave.html>)

Fungsi gelombang square dinyatakan dengan deret *Fourier* yaitu:

$$f(x) = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right). \quad (2.13)$$

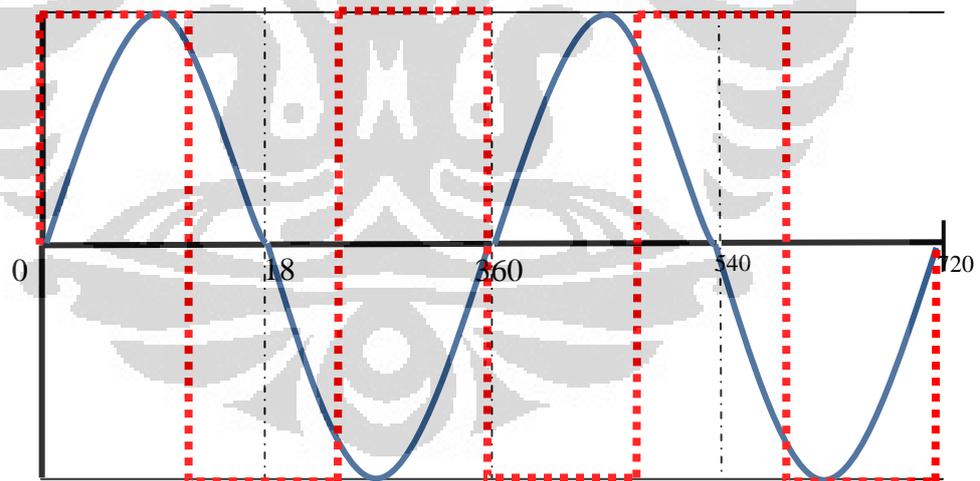
Pada penelitian ini akan menggunakan dua membran dengan variasi sinusoidal (pada membran atas) dan square (pada membran bagian bawah) dengan variasi frekuensi di masing – masing membran. Dimana variasi yang digunakan adalah :

1. Sin 80 – Square 80



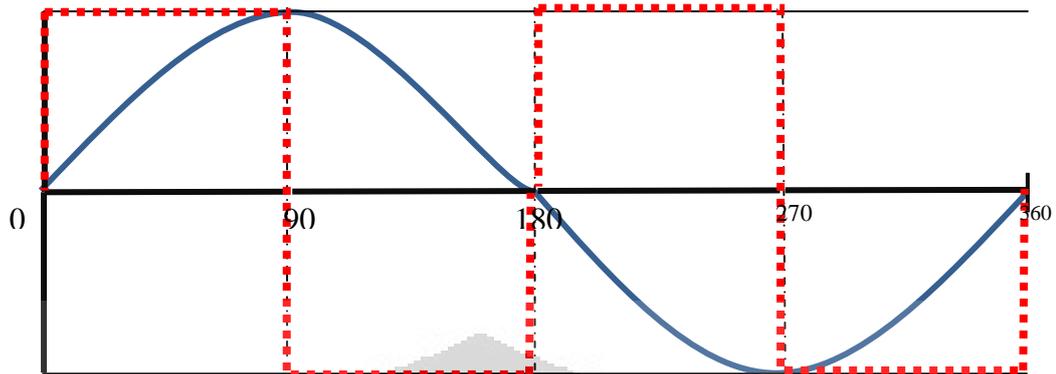
Gambar 2.14 Sinusoidal 80 Hz – Square 80 Hz

2. Sin 80 – Square 120



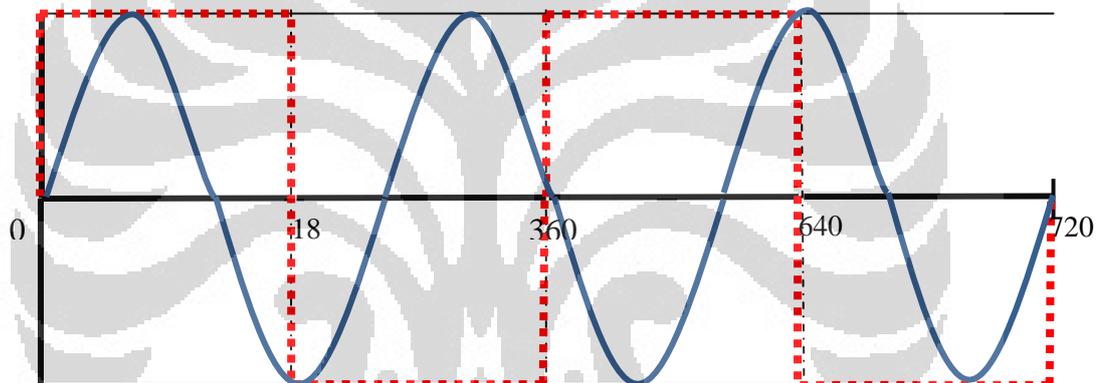
Gambar 2.15 Sinusoidal 80 Hz – Square 120 Hz

## 3. Sin 80 – Square 160



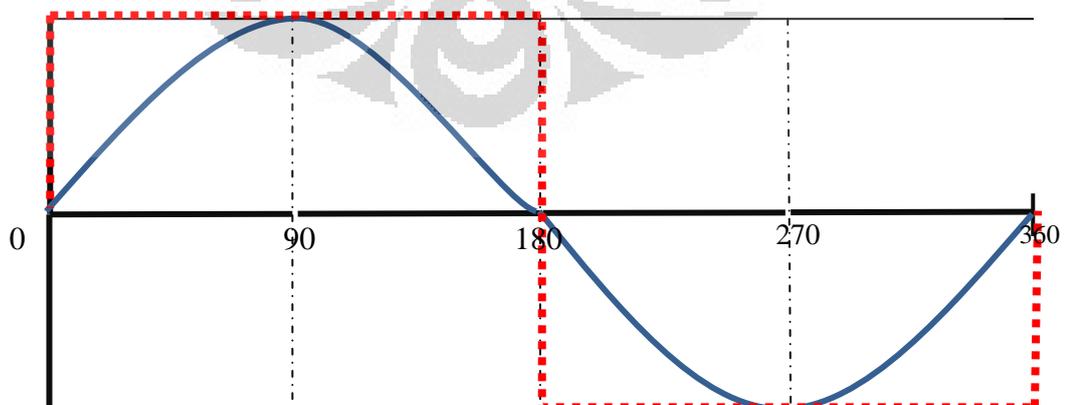
Gambar 2.16 Sinusoidal 80 Hz – Square 160 Hz

## 4. Sin 120 – Square 80



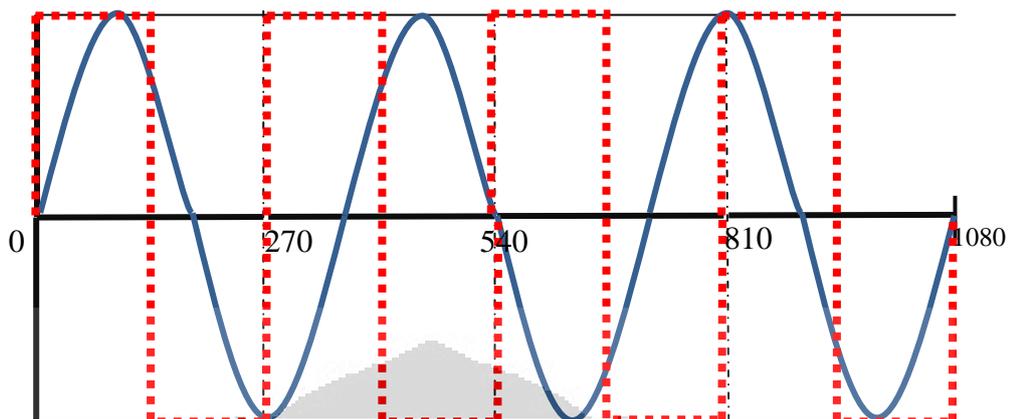
Gambar 2.17 Sinusoidal 120 Hz – Square 80 Hz

## 5. Sin 120 – Square 120



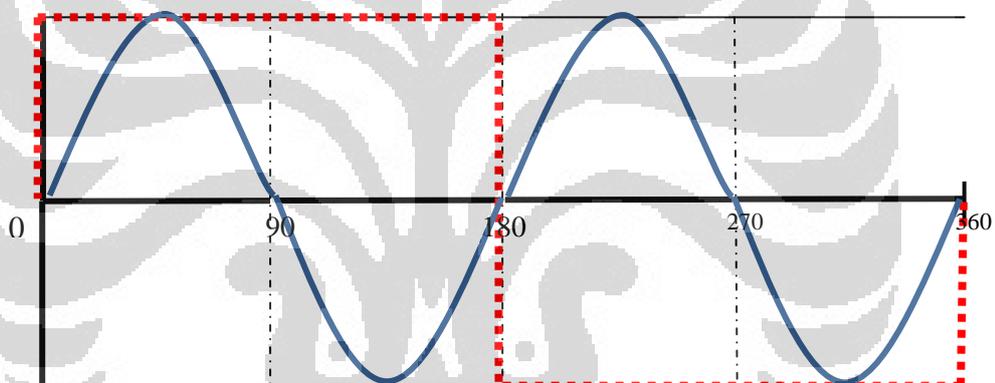
Gambar 2.18 Sinusoidal 120 Hz – Square 120 Hz

## 6. Sin 120 – Square 160



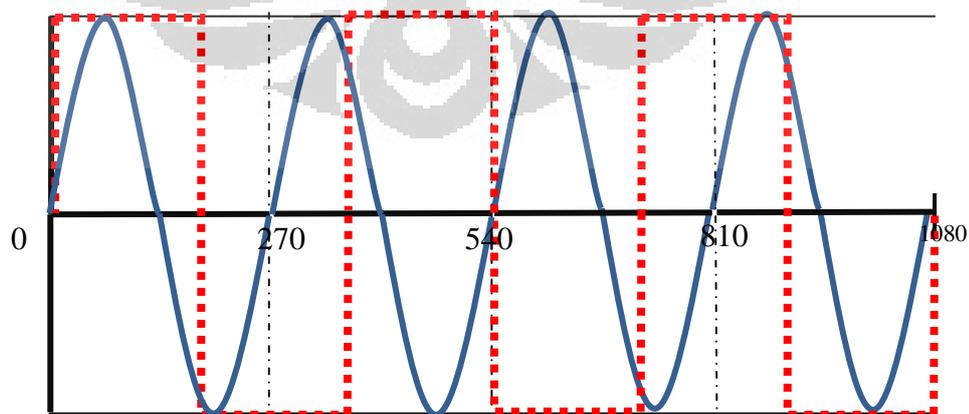
Gambar 2.19 Sinusoidal 120 Hz – Square 160 Hz

## 7. Sin 160 – Square 80



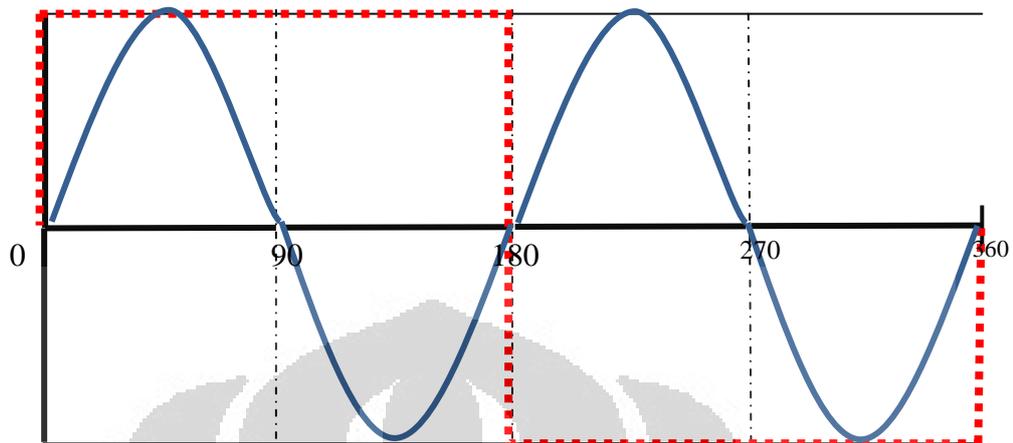
Gambar 2.20 Sinusoidal 160 Hz – Square 80 Hz

## 8. Sin 160 – Square 120



Gambar 2.21 Sinusoidal 160 Hz – Square 120 Hz

## 9. Sin 160 – Square 160



Gambar 2.22 Sinusoidal 160 Hz – Square 160 Hz

## 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:

$$\frac{q}{A} \sim \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.14)$$

Dengan memasukkan konstanta proporsionalitas atau tetapan kesebandingan:

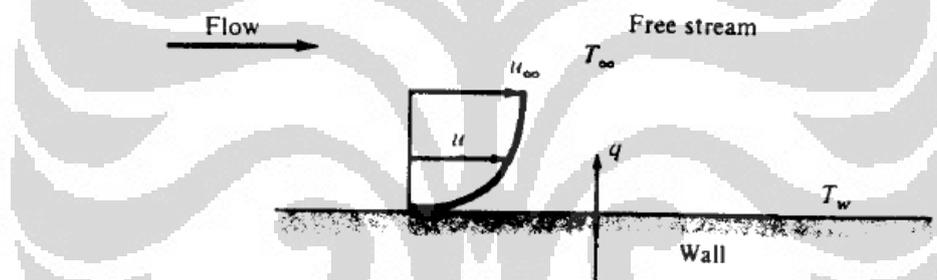
$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.15)$$

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 2.23 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:

$$q_{\text{pancaran}} = \sigma AT^4 \quad (2.16)$$

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

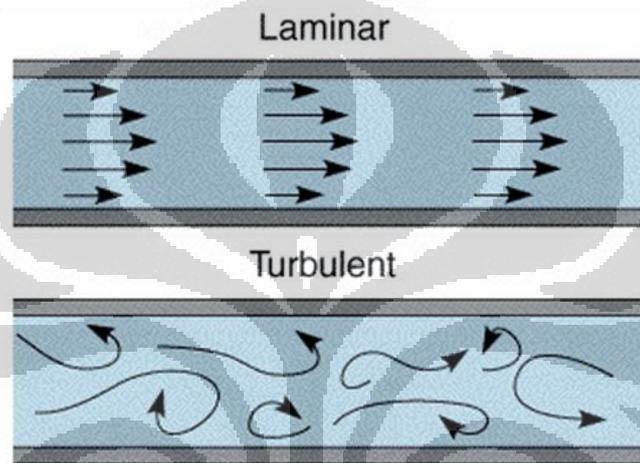
Aliran fluida disebut laminar ketika fluida yang bergerak dalam tiap lapisan mengalir dengan lancar. Viskositas yang terjadi di dalam aliran menyebabkan efek peredaman gerakan antar lapisan. Aliran laminar diperlihatkan seperti pada gambar 2.11.

### 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 2.24 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:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (2.17)$$

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

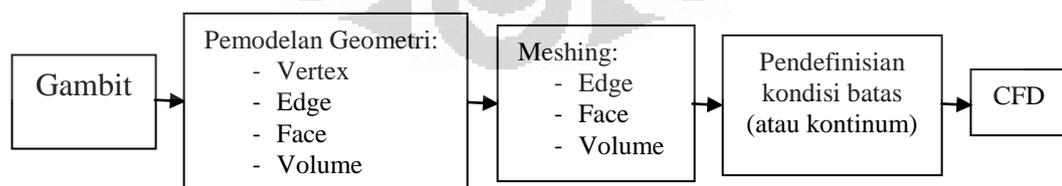
Dalam aplikasi untuk bidang teknik secara umum untuk aliran di dalam pipa bundar telah ditentukan bahwa jika besar bilangan Reynolds kurang dari 2100 maka aliran laminar dan jika lebih dari 4000 maka aliran turbulen. Nilai di antara keduanya merupakan aliran transisi.

## 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 2.25 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

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \tilde{G}_k - Y_k + S_k \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (2.19)$$

Dimana

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

$$\beta_1 = 0.072, \quad R_\beta = 8, \quad R_\chi = 6, \quad R_\omega = 2.95, \quad \zeta^* = 1.5,$$

$$M_{t0} = 0.25, \quad \sigma k = 2.0, \quad \sigma \omega = 2.0$$

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

## 2.6 Perhitungan *heat transfer coefficient*

Dalam menghitung data *heat transfer coefficient* perlu diperhitungkan mengenai area luasan dari heatsink yang mengalami pendinginan dari efek jet sintetik dan daerah yang mengalami pendinginan oleh udara *ambient*. Hubungan tersebut dapat dijabarkan dengan persamaan 2.20.

$$Q_{in \text{ heatsink}} = Q_{out \text{ jet sintetik}} + Q_{out \text{ udara}} \quad (2.20)$$

Dimana untuk mencari  $Q_{out \text{ udara}}$  perlu diketahui nilai *heat transfer coefficient* oleh udara yang ada di sekitar heatsink. Untuk itu perlu dilakukan pengukuran terhadap heatsink tanpa adanya pengaruh dari jet sintetik. Hubungan tersebut dapat dijabarkan dengan persamaan 2.22.

$$Q_{in \text{ heatsink}} = Q_{out \text{ udara}} \quad (2.22)$$

Dengan nilai  $Q_{in \text{ heatsink}}$  diketahui sebesar 50 watt, maka persamaan 2.22 dapat dijabarkan menjadi persamaan 2.23.

$$50 = h_{udara} * A_{dengan \text{ udara}} * \Delta T \quad (2.23)$$

Luas total area heatsink  $0.081843 \text{ m}^2$ , dengan mengurangi area luasan bagian bawah yang kontak langsung dengan heater yaitu  $0.009503 \text{ m}^2$  maka didapat area luasan yang kontak langsung dengan udara *ambient*  $0.07234 \text{ m}^2$ . Dengan

nilai  $T_{\text{heatsink}}$  setelah stabil yaitu  $59^{\circ}\text{C}$ . Maka dengan memasukan nilai tersebut maka  $h_{\text{udara}}$  dapat dicari dengan mensubstitusikan ke persamaan 2.23.

$$h_{\text{udara}} = 50 / (A_{\text{dengan udara}} * \Delta T)$$

$$h_{\text{udara}} = 50 / (0.07234 * (59 - 27)) \Rightarrow h_{\text{udara}} = \mathbf{21.6 \text{ W/m}^2\text{K}}$$

Dari hasil tersebut maka nilai  $h_{\text{jet synthetic}}$  dapat dicari dengan menjabarkan persamaan 2.21 menjadi persamaan 2.24.

$$50 = h_{\text{udara}} * A_{\text{dengan udara}} * \Delta T + h_{\text{jet sintetik}} * A_{\text{dengan jet sintetik}} * \Delta T \quad (2.24)$$

Untuk kondisi dengan jet sintetik terpasang maka nilai luasan yang dipengaruhi udara pun berkurang.

Area pendinginan oleh udara bagian samping,  $139.18 \text{ cm}^2$

Area pendinginan oleh udara bagian atas,  $43.76 \text{ cm}^2$

Total area pendinginan oleh udara,  $139.18 + 43.76 = 182.94 \text{ cm}^2$

Maka area yang terkena aliran udara synjet,  $818.43 - 95.03 - 182.94 = 540.46 \text{ cm}^2$

Persamaan 2.24 tersebut kemudian di substitusikan dengan dengan parameter yang telah ada.

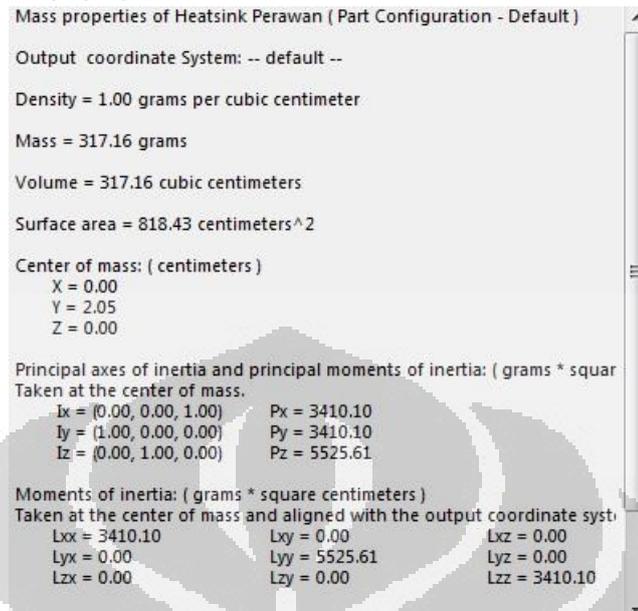
$$50 = 21.6 * (0.018294) * (dt - 27) + h_{\text{jet sintetik}} * (0.054046) * (dt - 27)$$

Maka,

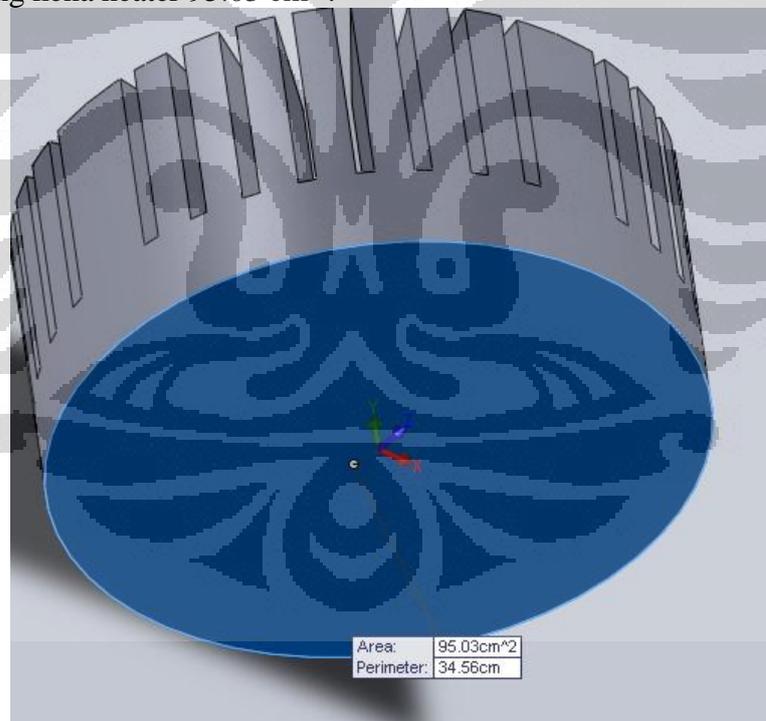
$$h_{\text{jet sintetik}} = ((50 / (dt - 27)) - 0.4) / 0.054046$$

## 2.7 Perhitungan luas permukaan heat sink

Luas total heatsink  $818.43 \text{ cm}^2$  :

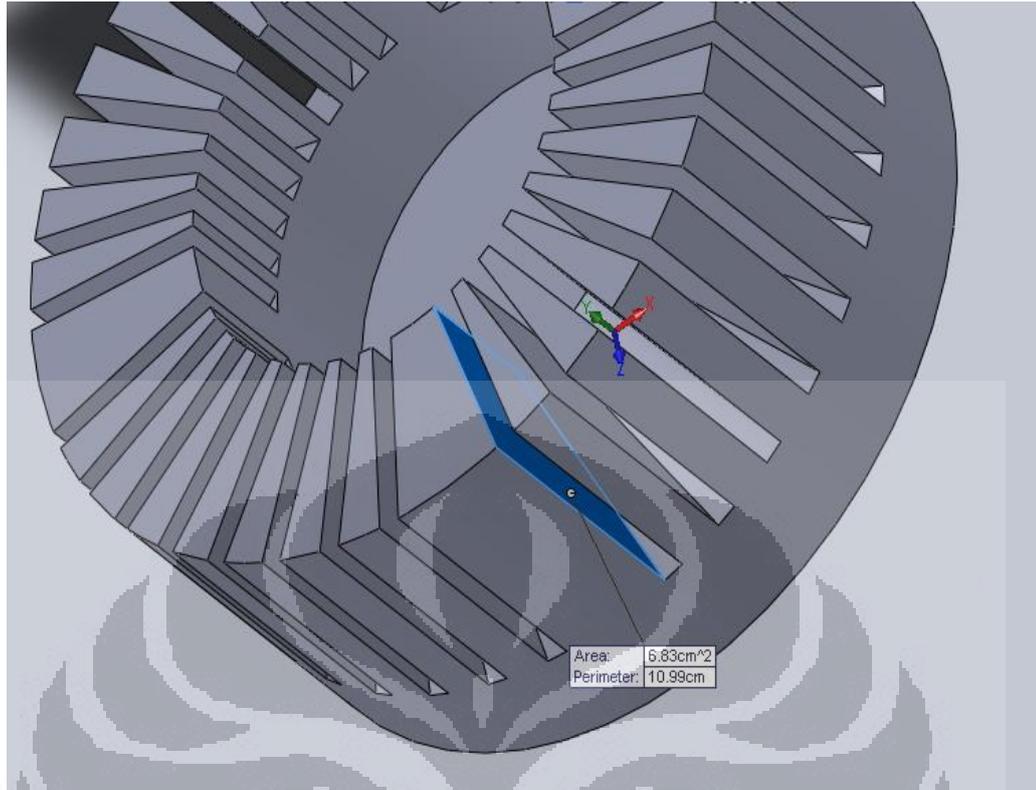


Luasan yang kena heater  $95.03 \text{ cm}^2$  :

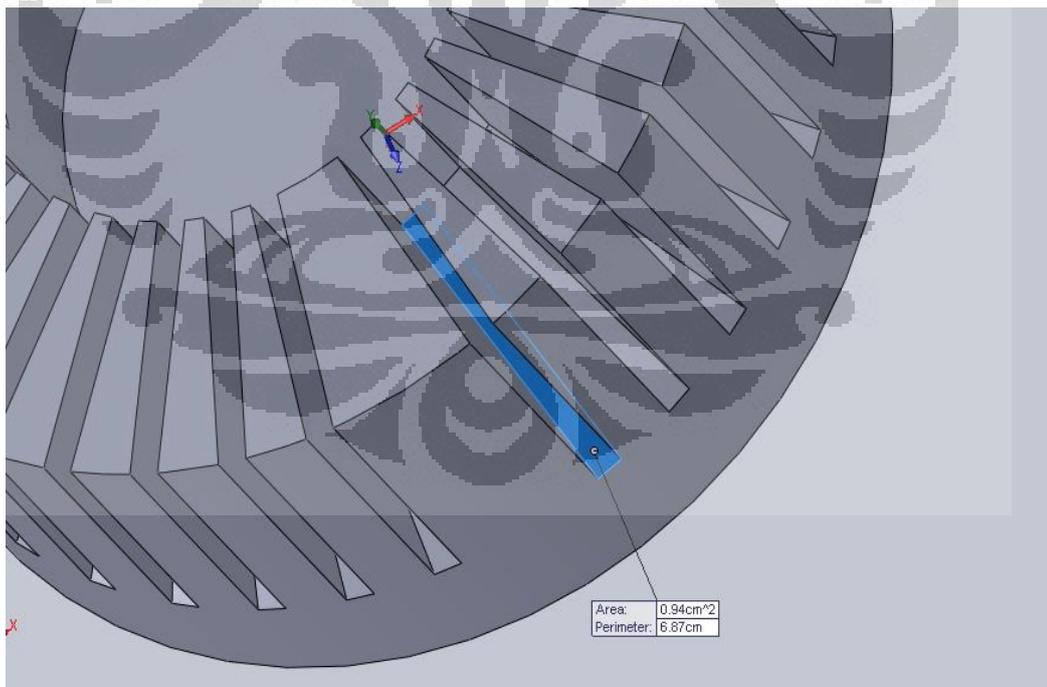


Maka luas area efektif pendinginan =  $818.43 - 95.03 = 723.4 \text{ cm}^2$

Luasan sela heatsink samping 6.83 dikali 64 untuk semua sela =>  $6.82 \times 64 = 436.48 \text{ cm}^2$  :



Luas sela bagian bawah  $0.94 \text{ cm}^2$  dikali 32 untuk semua sela =  $0.94 \times 32 = 30.08 \text{ cm}^2$  :



Maka :

Luas efektif = Luas sela samping + luas sela bawah + Luas sisa

Luas sisa = Luas efektif - (Luas sela samping + luas sela bawah)

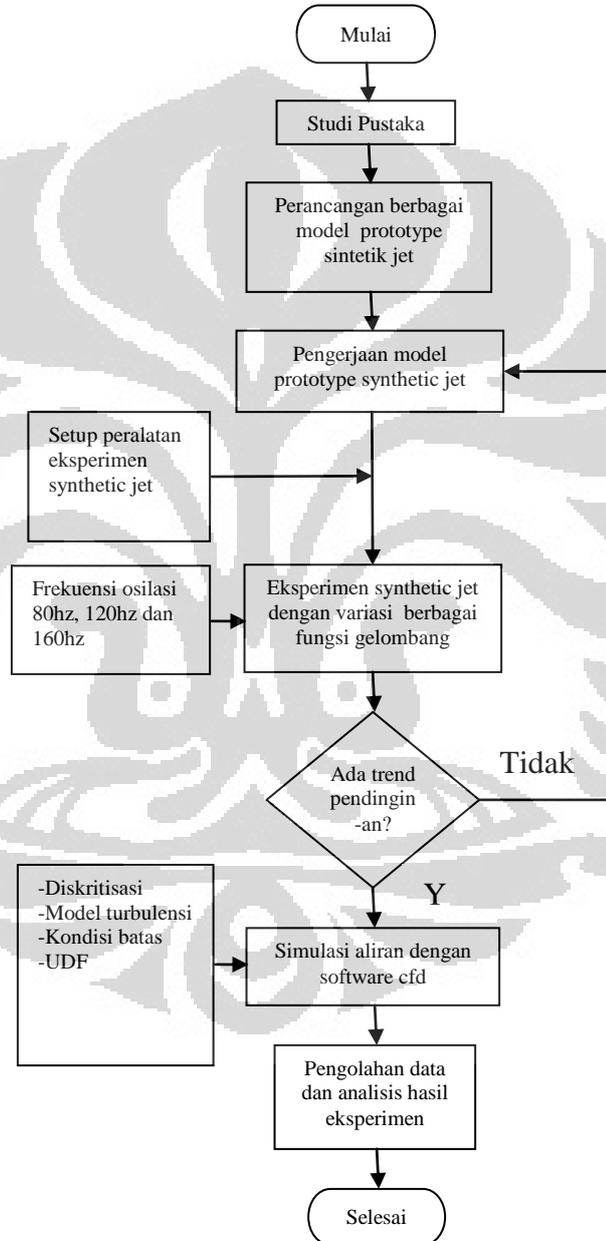
Luas sisa =  $723.4 - (436.48 + 30.08) = 256.84 \text{ cm}^2$

## BAB 3

### Sistem Pendinginan dengan Jet Sintetik

#### 3.1 Diagram Alir Penelitian

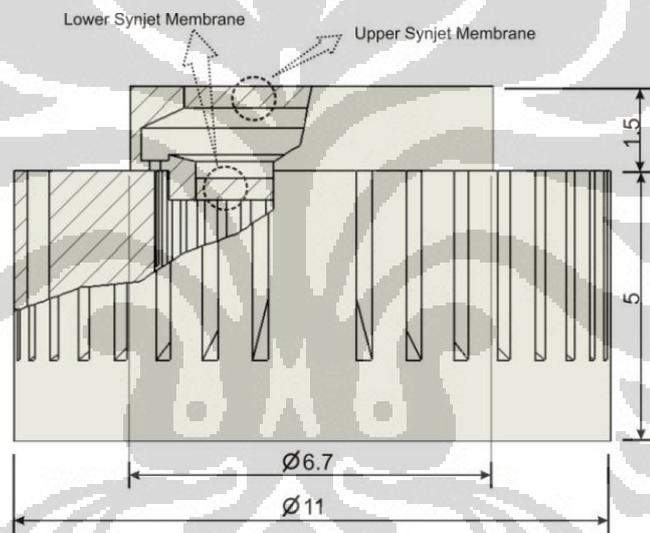
Pada penelitian ini, jalannya eksperimen dapat dijabarkan melalui gambar 3.1 di bawah ini



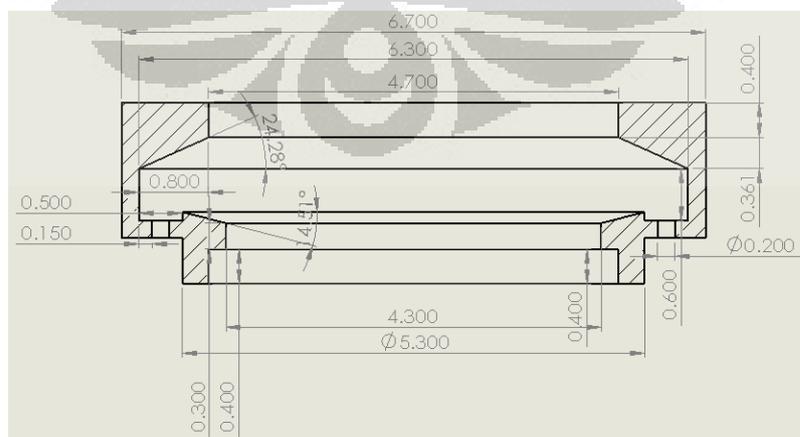
Gambar 3.1 Diagram Alir Peneliti

### 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 (c) memperlihatkan *prototype* yang telah terintegrasi dengan jet sintetik.



(a)



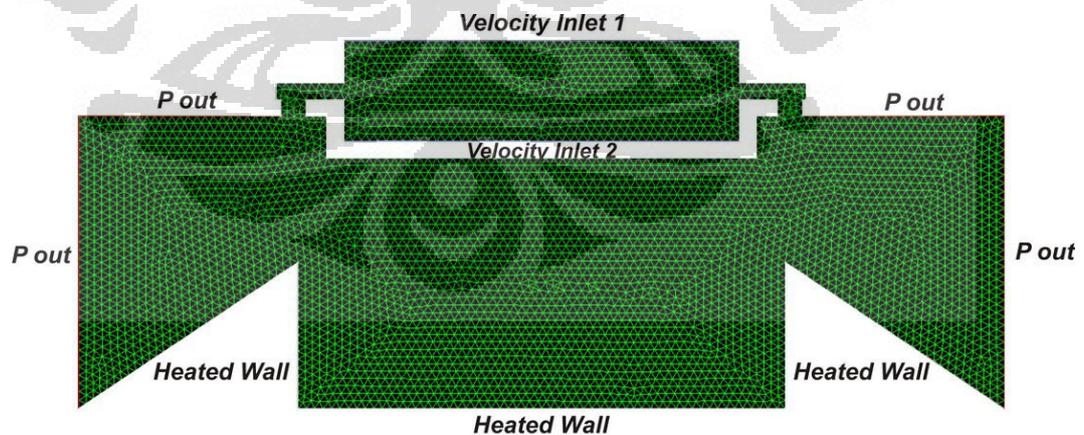
(b)



Gambar 3.2 Model fisik *synthetic jet* (dalam cm) (a) Susunan aktuator *synthetic jet* dengan *heat sink* (b) Detail aktuator *synthetic jet* (c) memperlihatkan *prototype* yang telah terintegrasi dengan jet sintetik

### 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 27 °C dan suhu bagian bawah dari dinding yang dipanaskan, dipertahankan pada suhu *isothermal* 60 °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>-65</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 yang terdiri dari dua jet yang masing – masing digerakan dengan fungsi yang berbeda yakni sinusoidal dan square dimana gerakan diafragma diasumsikan sama dengan gerakan piston di dalam sebuah silinder, fungsi gelombang sinusoidal

*Sinusoidal :*

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

Dimana  $A = 1\text{m/s}$

dan  $V_0 = 0 \text{ m/s}$

Sehingga 
$$V = \sin(2\pi f)t \quad (3.1)$$

Dan fungsi gelombang square

Square:

$$V = V_0 + \left\{ \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin\{(2n-1)2\pi ft\}}{(2n-1)} \right\}$$

Dimana  $A = 1 \text{ m/s}$

dan  $V_0 = 0 \text{ m/s}$

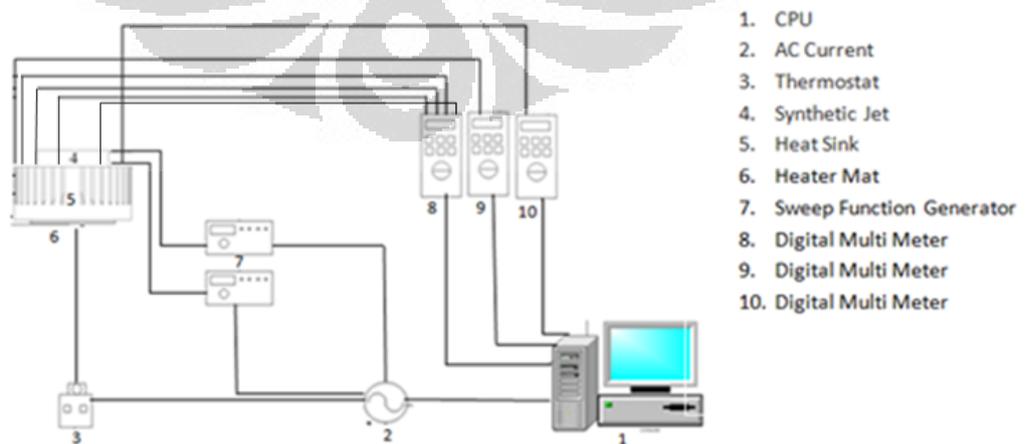
$$V = \frac{4}{\pi} \sin(2\pi ft)$$

Sehingga (3.2)

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. Komputer

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



Gambar 3.5 Komputer

2. *Thermostat*

*Thermostat* merupakan alat yang digunakan sebagai pengatur suhu pada *heater mat*. Suhu yang diset pada *heater mat* ini adalah 60 °C.



Gambar 3.6 Thermostat

### 3. Heater Mat

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



Gambar 3.7 Heater Mat

#### 4. 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 3.8 Jet Sintetik dengan *prototype* dan membrane

#### 5. Digital Multimeter

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



Gambar 3.9 Digital Multimeter DMM, Lutton, dan APPA

### 6. *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 3.10 *Heat sink*

### 7. *Sweep Function Generator*

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



Gambar 3.11 *Function Generator*

### 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 27 °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 1 jam dengan interval data per 1 detik.

## BAB 4

### ANALISIS DATA

#### 4.1 Analisis Komputasional

Tahap komputasional dilakukan dengan menganalisis kontur kecepatan thermal, Kontur vortisitas, vektor kecepatan terhadap temperatur, dan intensitas turbulensi dengan melakukan simulasi menggunakan *software* CFD Fluent. Jenis gelombang variasi *sinusoidal – square* disimulasikan dengan variasi tiga frekuensi 80 hz, 120 hz dan 160 hz selama satu 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*, intensitas turbulensi dipakai untuk melihat titik intensitas turbulensi pada proses pendinginan.

Perbandingan simulasi dilakukan pada frekuensi yang memiliki panjang gelombang yang sama atau fasa yang sama, dimana klasifikasi dibagi menjadi 3 yakni :

1. Sudut Fasa 0 – 360
2. Sudut Fasa 0 – 720
3. Sudut Fasa 0 – 1080

Akibat adanya perbedaan fasa, frekuensi gelombang serta kombinasi jenis fungsi gelombang, maka untuk pembagian pengambilan periode simulasi tiap – tiap kombinasi dan variasi gelombang ditentukan oleh titik temu dari kedua gelombang tersebut, baik diawal (pada titik ke-0) dan pada titik akhir meskipun jumlah gelombang yang dimiliki berbeda pada tiap pembagian itu.

Pengambilan frame atau gambaran simulasi efek pendinginan dibagi menjadi 5 titik pada setiap simulasi, yakni di titik ke awal kedua gelombang,  $\frac{1}{4}$  simulasi,  $\frac{1}{2}$  simulasi,  $\frac{3}{4}$  simulasi dan titik akhir pertemuan kedua gelombang.

#### 4.1.1 Sudut Fasa Gelombang 0 – 360

Pada saat satu gelombang sinusoidal dan satu gelombang square memiliki titik fasa serta panjang gelombang yang sama, kedua gelombang ini akan bertemu pada titik awalan yang sama, yakni sudut fasa ke-0 dan titik akhir untuk satu gelombang yang sama yakni sudut fasa ke-360.

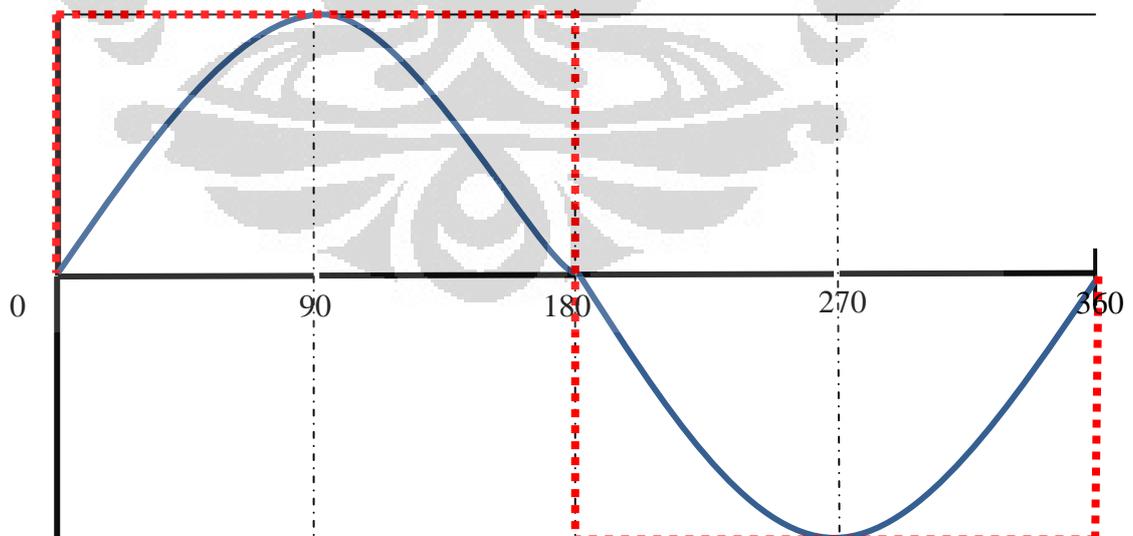
Terdapat 3 gelombang yang memiliki sudut fasa yang sama untuk 0 – 360, yakni :

1. Sinus 80 – Square 80
2. Sinus 120 – Square 120
3. Sinus 160 – Square 160

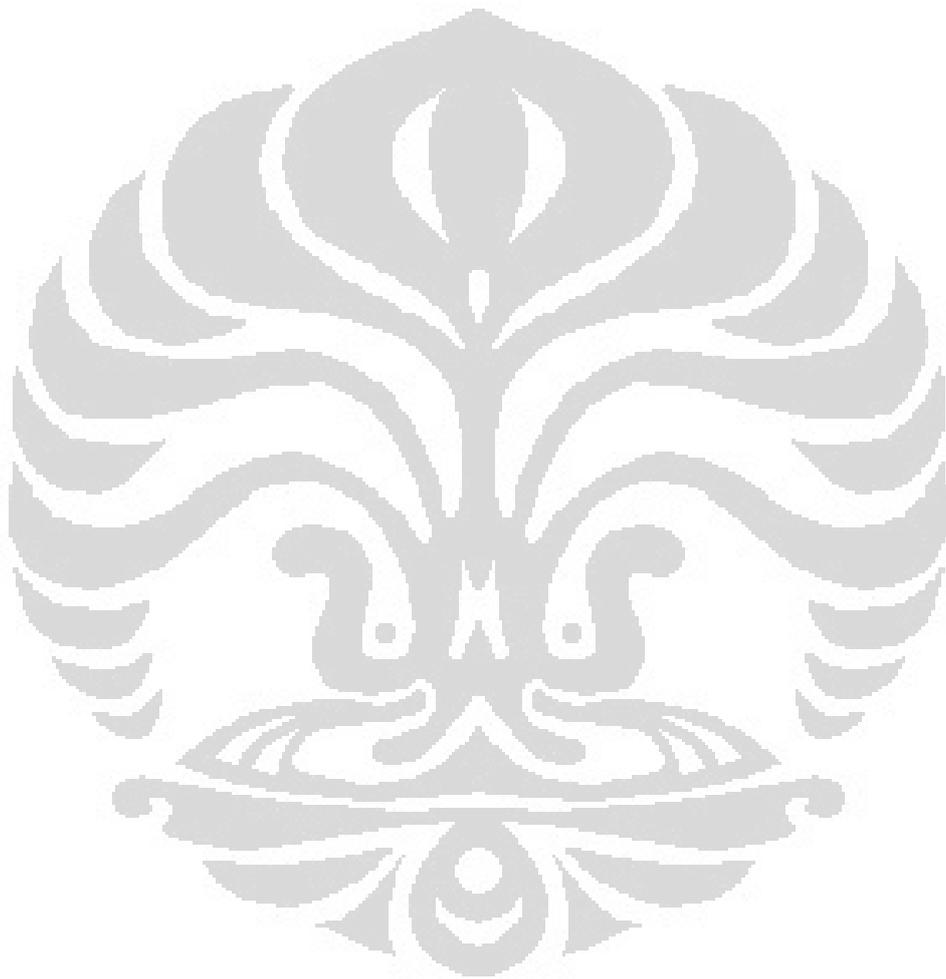
Perbandingan simulasi untuk gelombang sinusoidal dan square yang memiliki fasa gelombang yang sama .

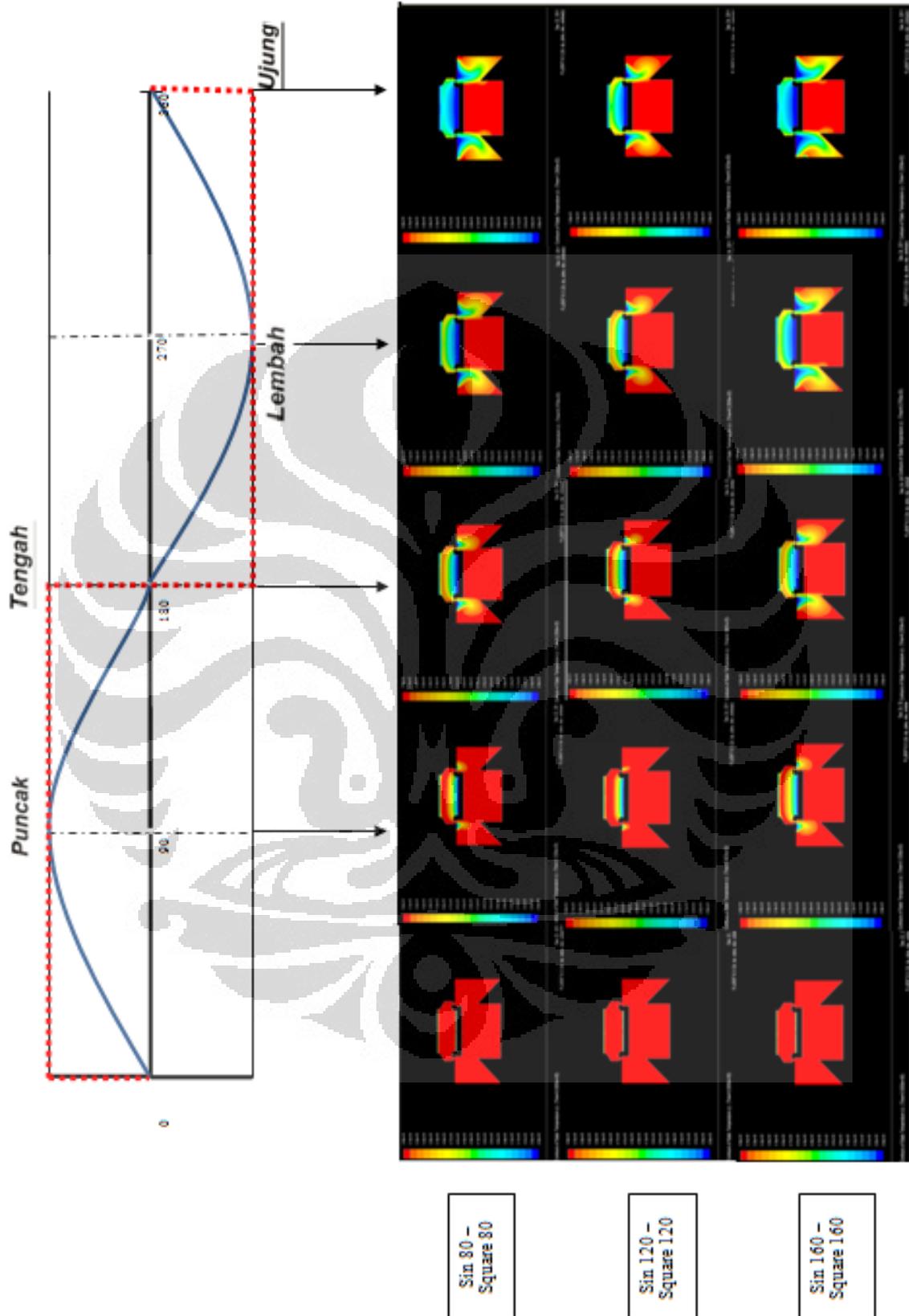
Range 0 – 360

1. Sin 80 – Square 80
2. Sin 120 – Square 120
3. Sin 160 – Square 160



Gambar 4.1 gambar grafik sinusoidal dan square untuk sudut fasa 0 - 360



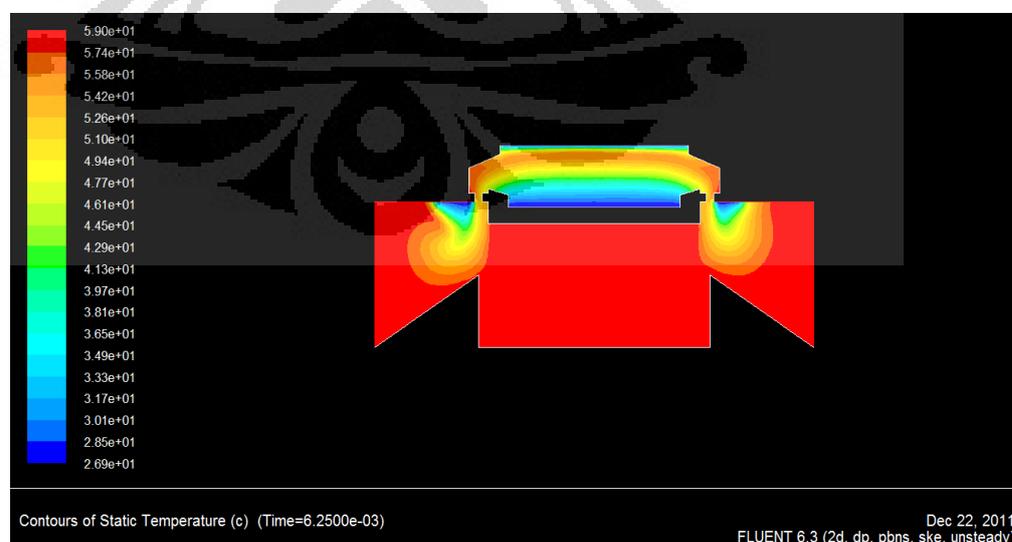


4.1.1.1 Analisis Kontur Thermal

Kontur thermal digunakan untuk menunjukkan profil pergerakan pendinginan fluida yang mendinginkan *heatsink* yang di-set pada suhu awal  $59^{\circ}\text{C}$  oleh pergerakan membran synthetic jet. Perubahan profil temperatur ini dilihat dalam jangka waktu sudut fasa 0 – 360.

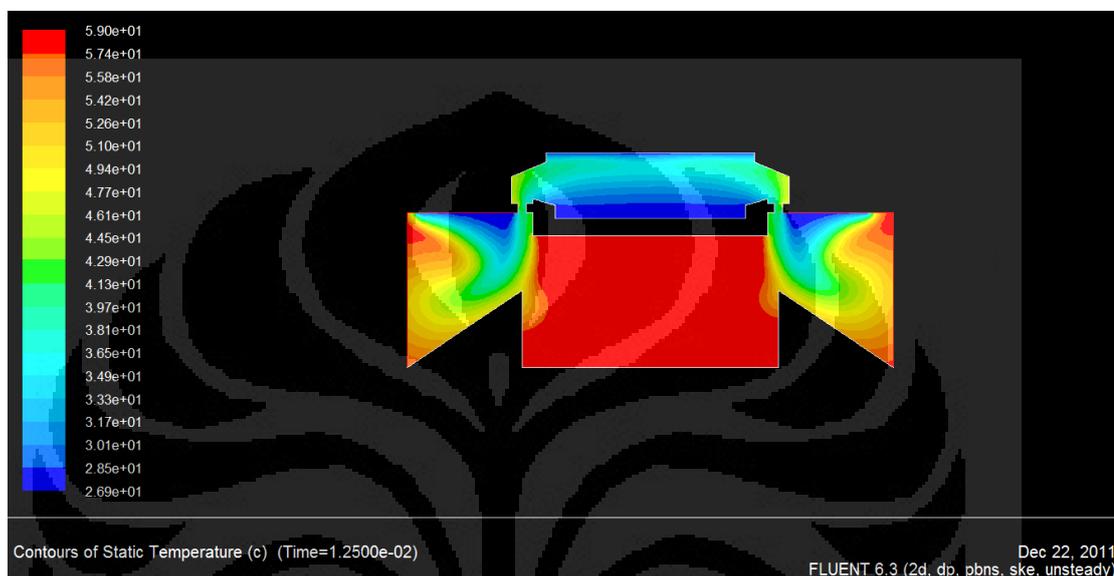
Gambar 4.2 menunjukkan kontur perubahan temperatur yang terjadi akibat proses pendinginan oleh fluida yang digerakan oleh membran yang memiliki variasi fungsi sinusoidal dan square pada frekuensi masing – masing 80 Hz. Pada waktu titik puncak pertama dapat dilihat bahwa pergerakan pendinginan mulai terjadi oleh aliran fluida jet sintetik terhadap *heatsink*. Saat fasa sudah mencapai setengah gelombang, pendinginan terus berlangsung. Perbedaan jenis gelombang sinusoidal dan square membuat proses pendinginan terjadi secara terus menerus karena adanya perbedaan pergerakan kedua membran tersebut hingga selesainya satu gelombang penuh.

Proses pendinginan yang terjadi secara kontinyu membuat suhu di *heatsink* makin lama makin berkurang dari titik suhu awal awal  $59^{\circ}\text{C}$ . semua proses simulasi tersebut hanya terjadi untuk satu gelombang dengan lamanya waktu 0.0125s untuk sinusoidal 80Hz – square 80Hz, 0.00833s untuk gelombang sinusoidal 120Hz – square 120Hz dan 0.00625s gelombang sinusoidal 160Hz – square 160Hz. Hal ini terlihat dalam gambar 4.2a



Gambar 4.2a Kontur thermal saat memasuki waktu ke - 0.00625s pada frekuensi sinusoidal 80 Hz – square 80 Hz

Dari hasil simulasi selama satu gelombang, pada akhirnya dapat dilihat bahwa variasi sinyal sinusoidal 80 Hz – square 80 Hz memiliki tingkat pendinginan yang paling tinggi diantara ketiga variasi sinyal yang memiliki sudut fasa untuk gelombang sinusoidal serta square yang sama yakni sinusoidal 120Hz – square 120Hz dan sinusoidal 160Hz – square 160Hz.



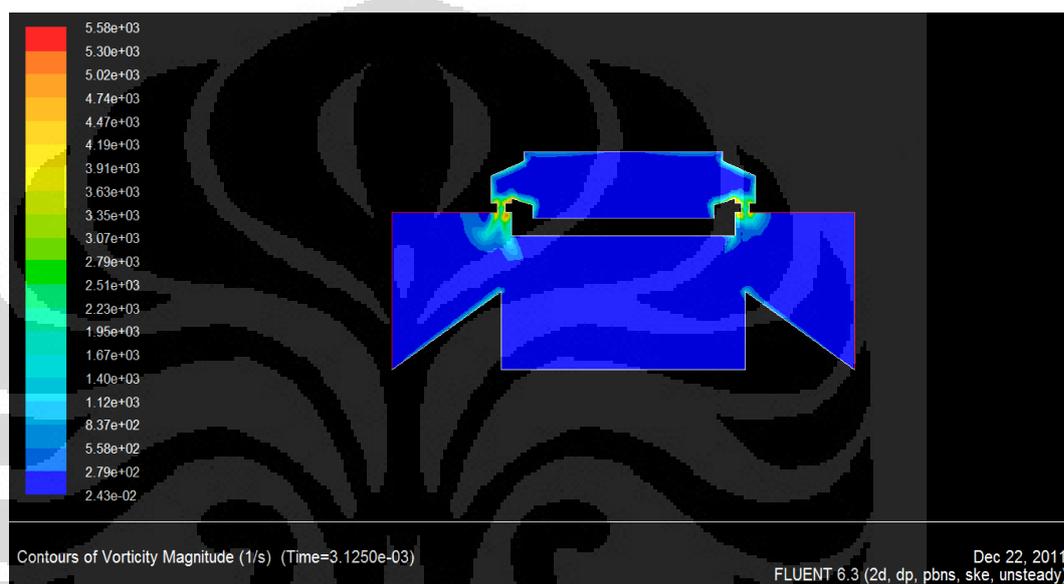
Gambar 4.2b Kontur thermal setelah satu siklus pada frekuensi sinusoidal 80 Hz – square 80 Hz

#### 4.1.2 Analisis Kontur Vortisitas

Kontur vortisitas digunakan untuk menunjukkan profil besarnya vortisitas (turbulensi) aliran fluida yang terjadi akibat pergerakan membran terhadap sistem pada satu fasa gelombang. Pergerakan fluida karena adanya efek inersia fluida memungkinkan besarnya vortisitas dan perubahannya dari waktu ke waktu.

Gambar 4.3 menunjukkan kontur vortisitas fluida selama satu gelombang penuh pada variasi gelombang sinusoidal 80Hz – square 80Hz, sinusoidal 120Hz – square 120Hz dan sinusoidal 160Hz – square 160Hz. Terlihat dari gambar bahwa besarnya vortisitas berubah dari tiap fasa ke fasa lainnya. Pada titik puncak vortisitas mulai terjadi pada kedua sisi orifis dan berkembang menjadi besar pada setengah periode.

Tekercuali pada sinusoidal 80Hz – square 80Hz saat  $\frac{3}{4}$  periode, vortisitas pada frekuensi lainnya terlihat melemah. 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 menunjukkan potensi perpindahan kalor (pendinginan) yang cukup baik.



Gambar 4.3a Kontur vortisitas saat puncak pertama pada frekuensi sinusoidal 80 Hz – square 80 Hz

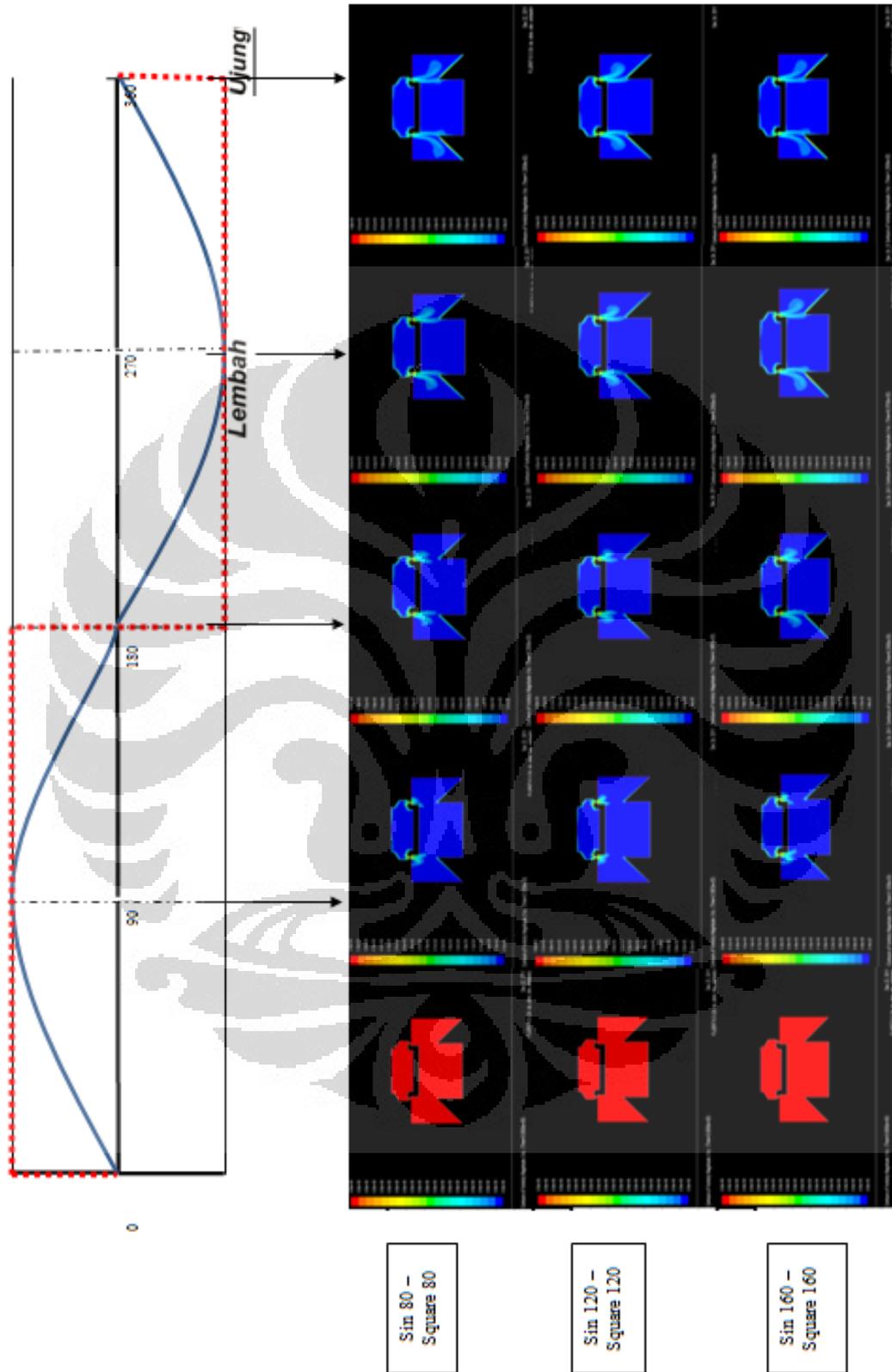
Terlihat pada gambar 4.3a, Pada frekuensi gelombang sinusoidal 80Hz – square 80Hz Terlihat dari gambar bahwa besarnya vortisitas berubah dari waktu ke waktu. Pada puncak pertama vortisitas mulai terjadi pada kedua sisi orifis dan berkembang menjadi lebih besar secara tiba-tiba pada waktu  $\frac{1}{2}$  periode. Dan pada gambar 4.3b Pada periode  $\frac{3}{4}$  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 ketakstabilan (perubahan)

vortisitas dari waktu ke waktu. Nilai vortisitas yang cenderung besar menunjukkan potensi perpindahan kalor (pendinginan).

Dari hasil eksperimen selama satu gelombang, dapat dilihat bahwa gelombang sinusoidal 80Hz – square 80Hz memiliki nilai vortisitas tertinggi diantara variasi frekuensi gelombang lainnya.



Gambar 4.3b Kontur vortisitas memasuki fase  $\frac{3}{4}$  gelombang pada frekuensi sinusoidal 80 Hz – square 80 Hz



Gambar 4.3 Kontur Vortisitas pada gelombang sinusoidal 80 – Square 80, Sinusoidal 120 – Square 120, Sinusoidal 160 – Square 160

#### 4.1.3 Analisis Vector kecepatan - static temperatur

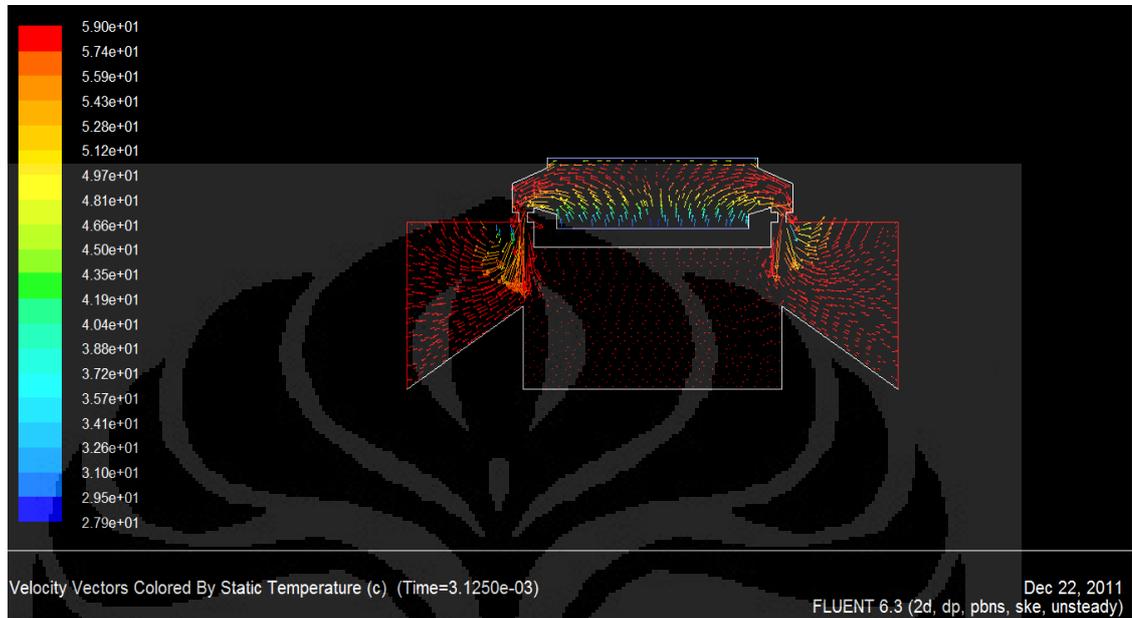
Vector kecepatan - static temperatur digunakan untuk menunjukkan profil pergerakan kecepatan pendinginan suhu *heatsink* pada daerah sistem *synthetic jet – heat sink* yang mengalami proses konduksi dan konveksi pada waktu satu gelombang. Profil vektor temperatur diamati ketika membran telah bergerak pada titik awal, puncak, tengah, lembah dan akhir.

Gambar 4.4 menunjukkan vektor temperatur *heat sink* dan fluida dalam sistem dengan gelombang sinusoidal 80Hz – square 80Hz, sinusoidal 120Hz – square 120Hz dan sinusoidal 160Hz – square 160Hz. Jika dilihat pada gambar, pada titik puncak mulai menunjukkan adanya pendinginan *heatsink* oleh fluida *synthetic jet*. Penurunan temperatur pada kisi *heat sink* terjadi mulai pada tengah gelombang dan vektor temperatur udara menunjukkan kecepatan pendinginan yang mulai meninggi pada periode  $\frac{3}{4}$  dan mencapai puncak pada akhir gelombang.

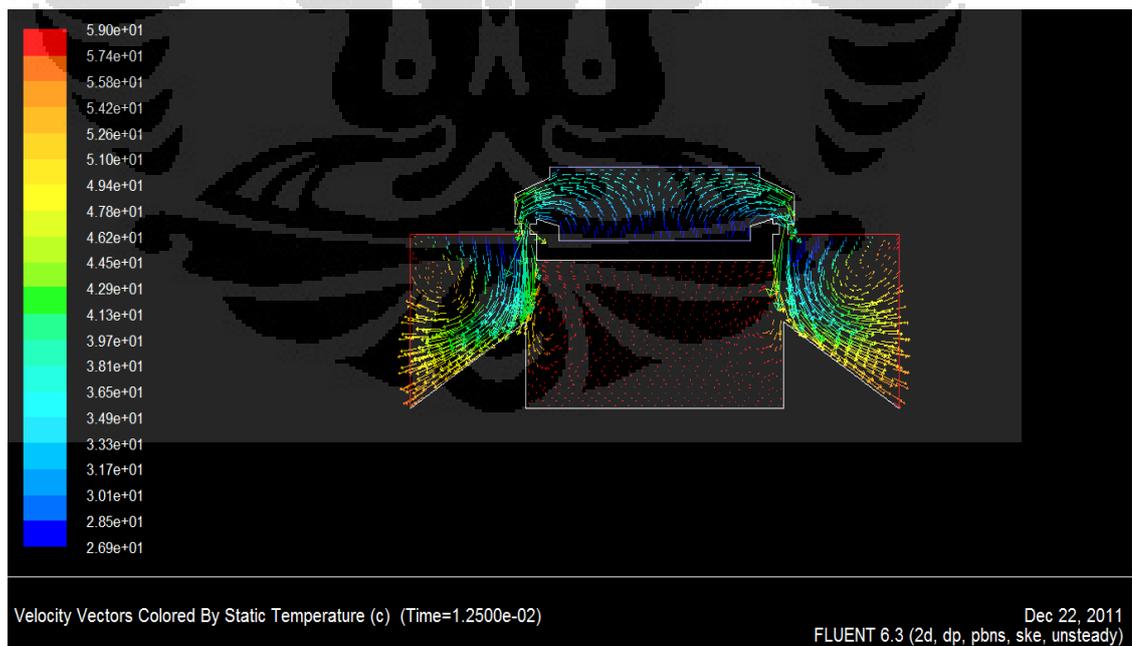
Dapat dilihat pada gambar 4.4a dan 4.4b, berdasarkan hasil simulasi bahwa pergerakan pendinginan pada satu gelombang ini terjadi secara kontinyu akibat adanya efek perbedaan jenis gelombang pada kedua membran. Jika dibandingkan kecepatan vektor pendinginan antara 3 variasi sinyal sinusoidal dan square tersebut maka tingkat pendinginan tertinggi terjadi pada variasi sinyal sinusoidal 80Hz – square 80Hz kemudian sinusoidal 120Hz – square 120Hz dan variasi sinyal sinusoidal 160Hz – square 160Hz memiliki kecepatan pendinginan yang kurang optimum diantara ketiga variasi sinyal tersebut.

Pada gambar 4.4 juga menunjukkan vektor temperatur pendinginan *heat sink* oleh fluida dalam sistem dengan gelombang *sinusoidal - square* pada frekuensi 80 hz. Jika dilihat pada gambar, pada titik puncak menunjukkan mulai adanya pendinginan pada *heat sink* akibat efek jet sintetik dan pada fasa tengah serta lembah sampai akhir, pergerakan pendinginan mulai meninggi secara cepat selama satu gelombang dengan memakan waktu 0.0125s. dari tren pendinginan ini dapat dilihat bahwa karakteristik pendinginan dengan menggunakan

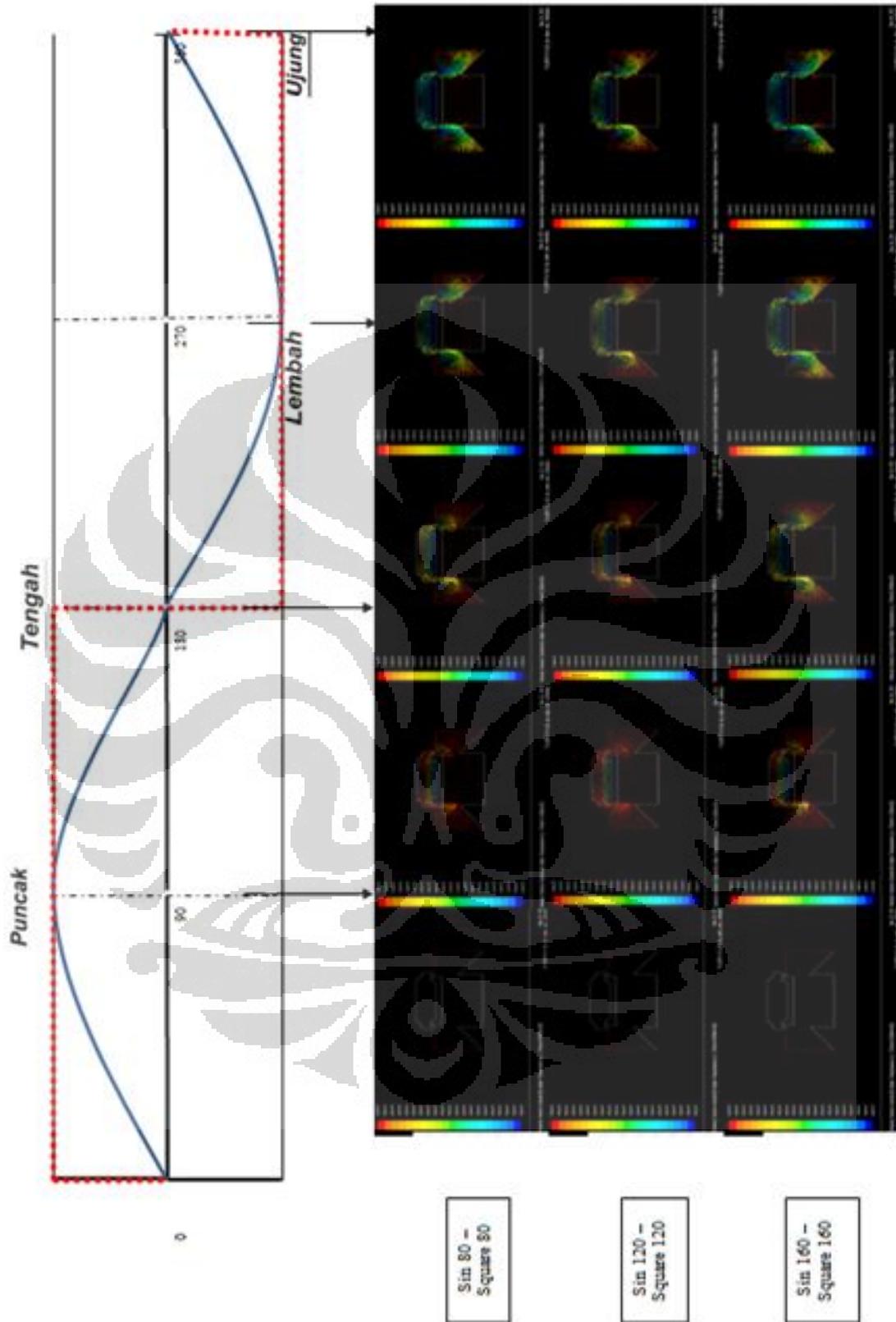
synthetic jet memiliki potensi besar dalam pendinginan jika dilakukan untuk waktu yang lebih lama dan keadaan kondisi lingkungan yang di-set untuk mendapatkan optimalisasi pendinginan.



Gambar 4.4a Vector kecepatan - static temperatur memasuki fase puncak pertama pada frekuensi sinusoidal 80 Hz – square 80 Hz



Gambar 4.4b Vector kecepatan - static temperatur pada fasa akhir satu gelombang pada frekuensi sinusoidal 80 Hz – square 80 Hz



Gambar 4.5 Velocity vector temperatur pada gelombang sinusoidal 80 - Square 80, Sinusoidal 120 - Square 120, Sinusoidal 160 - Square 160

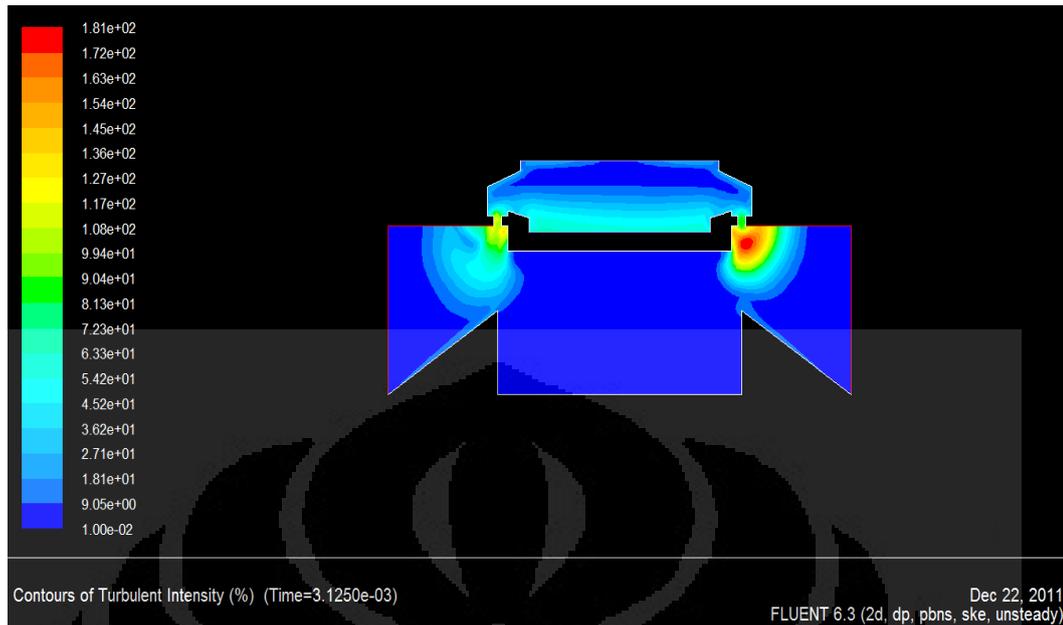
#### 4.1.4 Analisis Kontur Intensitas Turbulensi

Kontur Intensitas Turbulensi digunakan untuk menunjukkan profil besarnya intensitas turbulensi aliran fluida yang terjadi akibat pergerakan membran terhadap sistem pada satu fasa gelombang. Pergerakan fluida karena adanya efek inersia fluida memungkinkan besarnya turbulensi serta intensitasnya mengalami perubahannya dari waktu ke waktu. Besarnya intensitas turbulensi menunjukkan besarnya persebaran turbulensi yang terjadi di *heatsink* dan daerah *synjet-heatsink*. Turbulensi sendiri membuat aliran laminar yang sebelumnya berada pada sistem menjadi kacau dan tidak beraturan, hal ini dimaksudkan agar *heat transfer rate* yang terdapat pada *heatsink* mengalami peningkatan akibat perubahan jenis aliran tersebut.

Gambar 4.5 menunjukkan kontur intensitas turbulensi fluida selama satu gelombang penuh pada variasi gelombang sinusoidal 80Hz – square 80Hz, sinusoidal 120Hz – square 120Hz dan sinusoidal 160Hz – square 160Hz. Terlihat dari gambar bahwa besarnya intensitas berubah dari tiap fasa ke fasa lainnya. Pada titik puncak nilai intensitas turbulensi terjadi secara maksimum dan mulai terlihat pada kedua sisi orifis akan tetapi nilainya terus berkurang hingga fasa berikutnya sampai akhir gelombang.

Meskipun nilai intensitas turbulensinya berkurang setelah titik puncak, terlihat pada gambar 4.5a, akan tetapi seperti tampak pada gambar 4.5b persebaran intensitas turbulensi sudah menyebar pada daerah sekitar *heatsink*, dan hal ini akan terjadi secara terus menerus seiring dengan bertambahnya jumlah gelombang dan lamanya periode pendinginan.

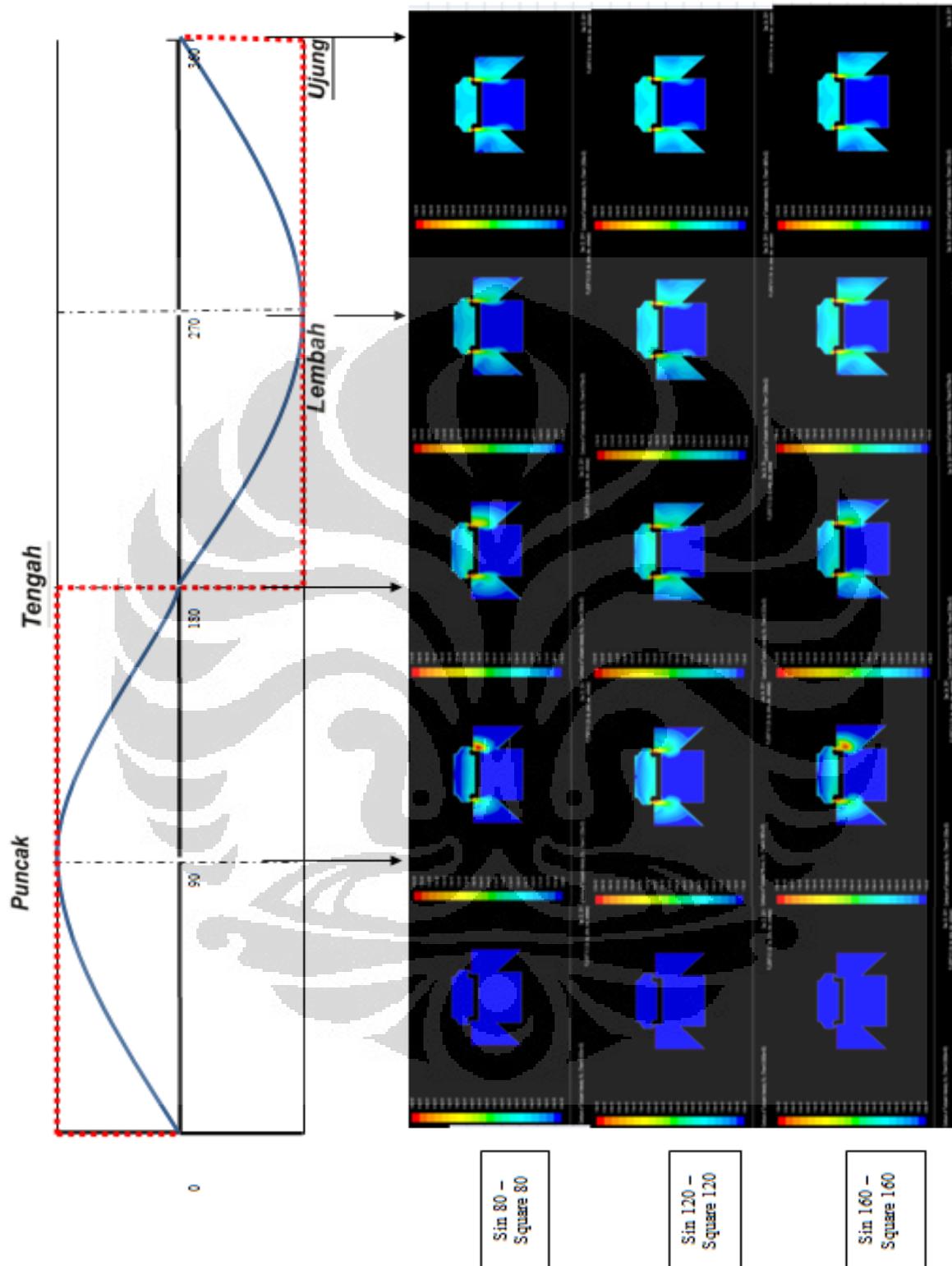
Dari hasil simulasi di atas terlihat bahwa nilai tertinggi intensitas turbulensi terjadi pada variasi gelombang sinusoidal 80Hz – square 80Hz, dan variasi sinyal ini memiliki nilai intensitas turbulensi yang lebih baik daripada gelombang sinusoidal 120Hz – square 120Hz dan sinusoidal 160Hz – square 160Hz.



Gambar 4.5a Kontur intensitas turbulensi saat fase puncak pada frekuensi sinusoidal 80 Hz – square 80 Hz



Gambar 4.5b Kontur intensitas turbulensi saat lembah pada frekuensi sinusoidal 80 Hz – square 80 Hz



Gambar 4.5 Intensitas Turbulensi pada gelombang sinusoidal 80 - Square 80, Sinusoidal 120 - Square 120, Sinusoidal 160 - Square 160

#### 4.2 Sudut Fasa Gelombang 0 – 360

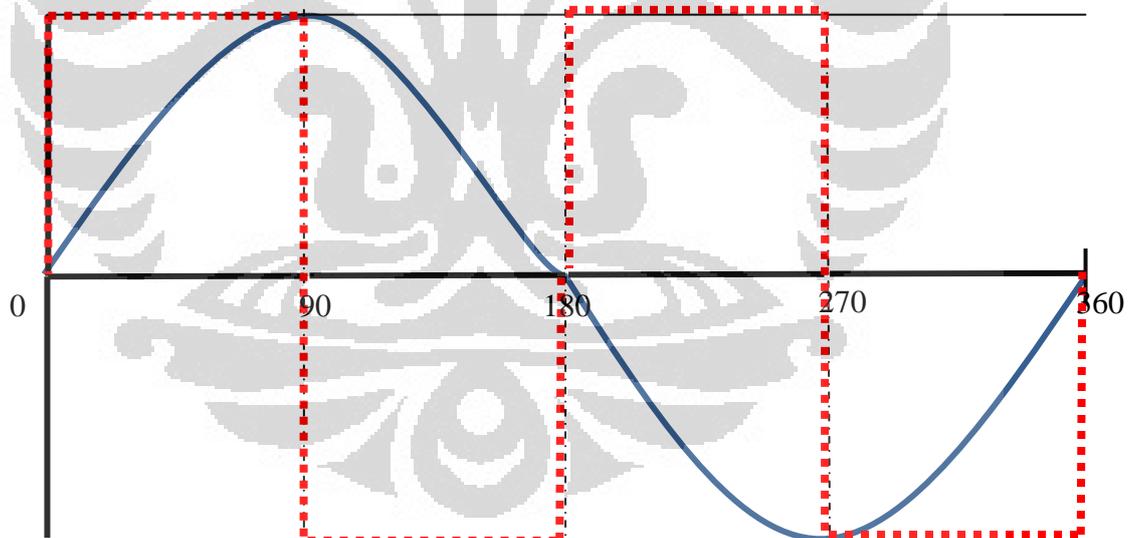
Pada saat satu gelombang sinusoidal terjadi maka akan terjadi dua gelombang square dan begitu juga sebaliknya, dua gelombang ini memiliki titik fasa serta panjang gelombang yang berbeda, kedua gelombang ini akan bertemu pada titik awalan yang sama, yakni sudut fasa ke-0 dan titik akhir yang sama yakni sudut fasa ke-360.

Terdapat 2 gelombang yang memiliki variasi sudut fasa yang sama bertemu di awal dan akhir untuk 0 – 360, yakni :

1. Sinus 80 – Square 160
2. Sinus 160 – Square 80

##### 1. Sinusoidal 80Hz – Square 160Hz

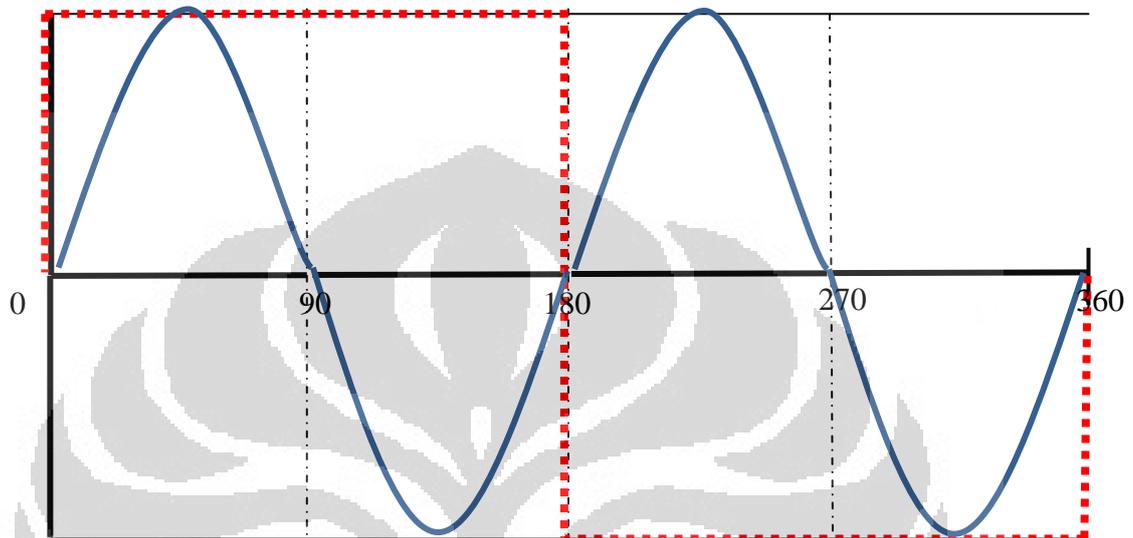
Pada variasi gelombang ini akan terdapat satu buah gelombang sinusoidal pada saat dua buah gelombang square terjadi.



Gambar 4.6 gambar grafik sinusoidal 80Hz dan square 160Hz untuk sudut fasa 0 - 360

## 2. Sinusoidal 160Hz – 80Hz

Pada variasi gelombang ini akan terdapat dua buah gelombang sinusoidal pada saat satu buah gelombang square terbentuk.

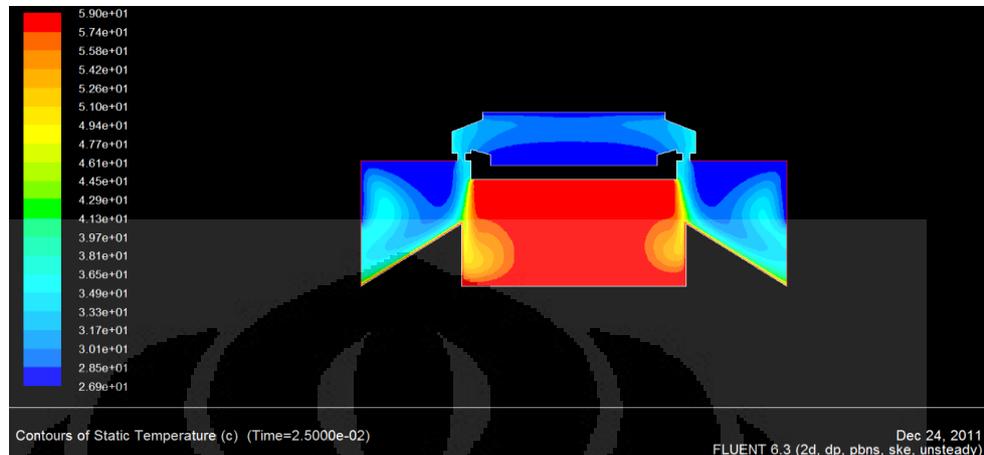


Gambar 4.7 gambar grafik sinusoidal 160Hz dan square 80Hz untuk sudut fasa 0 - 360

### 4.2.1 Analisa Kontur Thermal, Intensitas Turbulensi, Kontur Vortisiti dan Velocity Vector by Static Temperatur untuk variasi sinyal Sinusoidal 80Hz – Square 160Hz

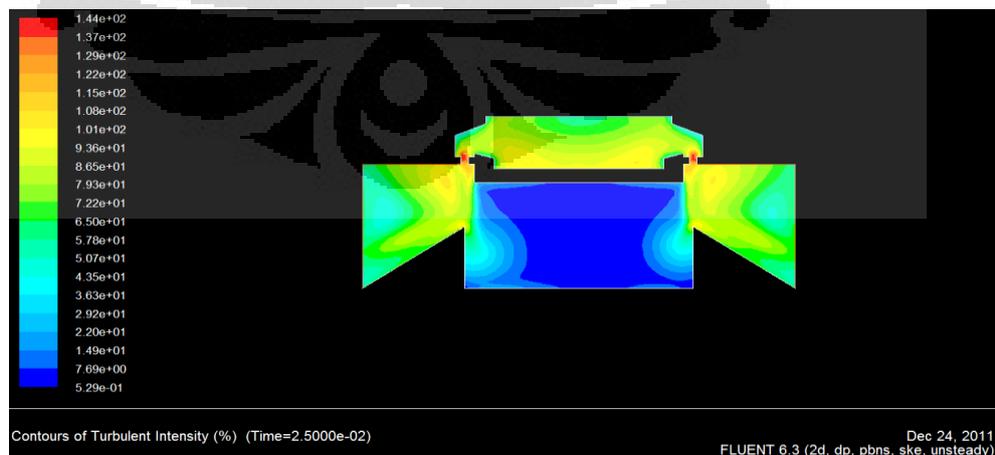
Pada variasi sinyal sinusoidal 80Hz – Square 160Hz, pada gambar 4.8 berdasarkan hasil simulasi dapat dilihat untuk kontur temperatur, pendinginan mulai terjadi pada detik ke-0.00625s, terlihat bahwa temperatur dari mulai detik ke-0 sampai 0.00625s memperlihatkan pergerakan pendinginan dari sythetic jet kepada *heatsink*, pada detik ke-0.0125s penurunan temperatur pada *heatsink* mulai menyebar secara merata pada sisi – sisi *heatsink* dan begitu memasuki detik ke-0.01875s temperatur pada sisi atas *heatsink* mulai mengalami penurunan yang signifikan dan begitu memasuki detik ke-0.025s pendinginan pada sisi atas *heatsink* mencapai titik tertinggi dan menyebar merata secara radial

begitupula dengan sisi tengah dan bawah pada heatsink seperti terlihat pada gambar 4.8a.



Gambar 4.8a Kontur temperatur saat fase akhir 3 gelombang sinusoidal dan 2 square pada frekuensi sinusoidal 120 Hz – square 80 Hz

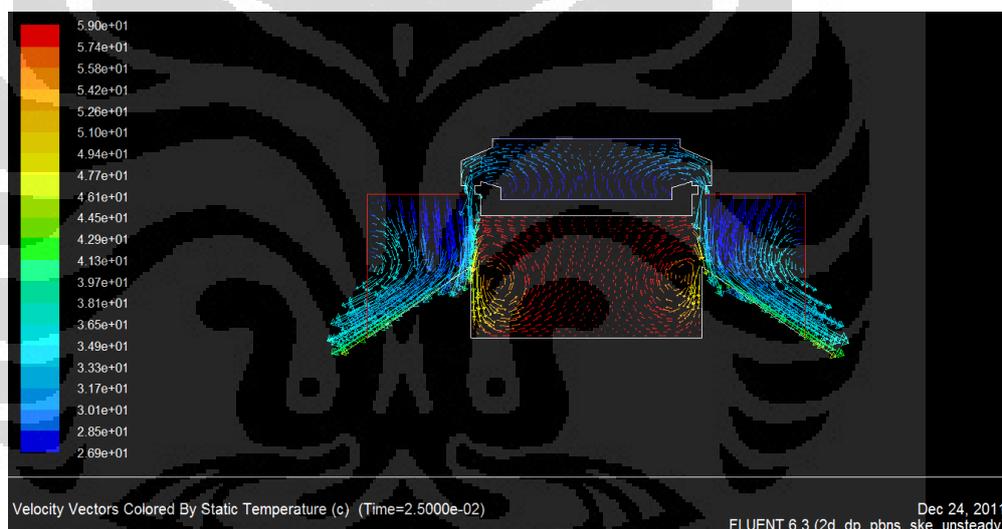
Pada gambar 4.8 dapat dilihat dari sisi intensitas turbulensi, dari sela waktu detik ke-0s sampai detik ke-0.00625s turbulensi mulai terbentuk pada synthetic jet, dan nilai intensitas turbulensi terbesar terjadi pada *orifice* dari Synthetic jet. Di detik ke-0.0125s intensitas turbulensi mulai merata pada heatsink di semua bagiannya. Dan pada titik akhir seperti gambar 4.8b, yakni detik ke-0.025s nilai intensitas turbulensi mencapai maksimum pada orifice dan penyebarannya merata pada dinding heatsink dengan nilai yang bertambah secara signifikan.



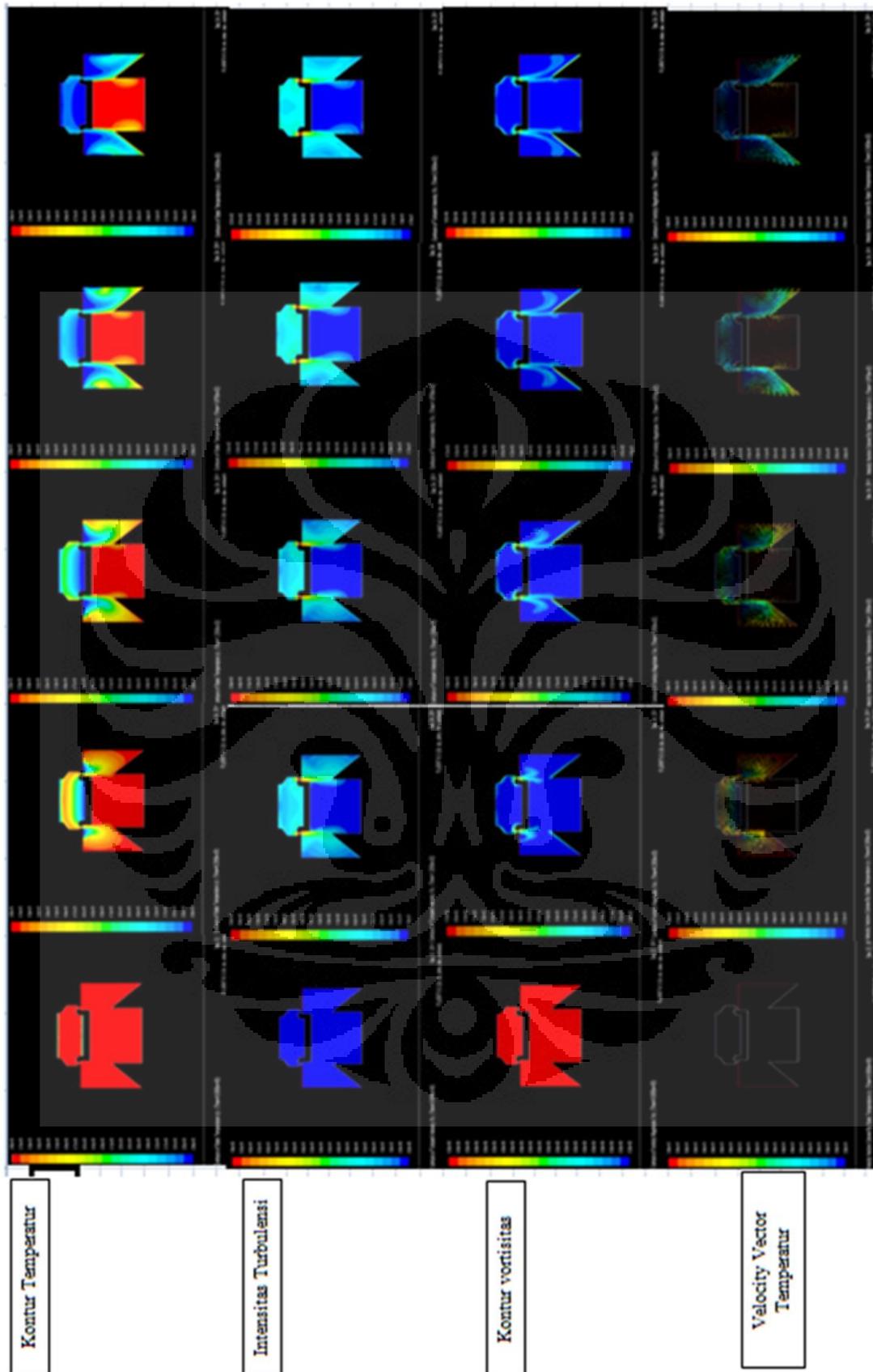
Gambar 4.8b Kontur turbulen intensiti saat fase akhir 3 gelombang sinusoidal dan 2 square pada frekuensi sinusoidal 120 Hz – square 80 Hz

Pada gambar 4.8 terlihat dari aspek kontur vortisiti yang semakin membesar nilainya seiring waktu yang bertambah, nilai vortisitas berbanding lurus dengan nilai intensitas turbulensi yang semakin membesar. Hal ini dikarenakan nilai vortisitas sangat mempengaruhi adanya turbulensi pada suatu sistem.

Dari aspek lainnya, pada gambar 4.8c, berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan, yakni *velocity vector by static temperature*, kecepatan laju aliran fluida yang mendinginkan heatsink nilainya membesar secara signifikan dari detik ke-0 sampai detik ke-0.025s. pada detik ke-0.025s terlihat bahwa laju aliran pendinginan telah mencapai seluruh permukaan sisi luar heatsink dengan nilai yang terbesar terjadi pada bagian pinggir dan bawah heatsink.



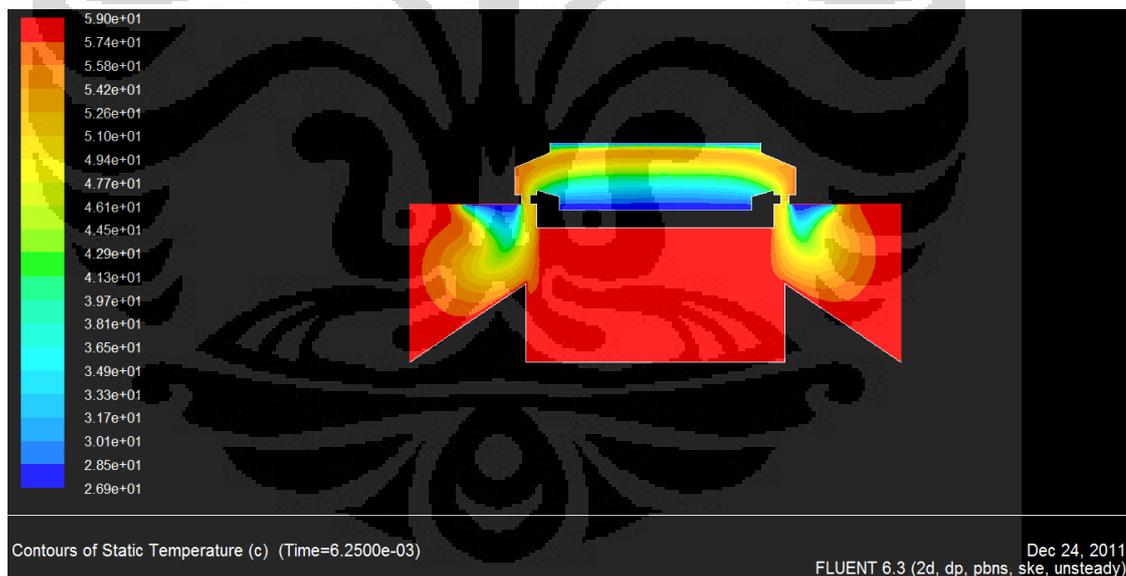
Gambar 4.8c Kontur vector kecepatan - static temperatur saat fase akhir 3 gelombang sinusoidal dan 2 square pada frekuensi sinusoidal 120 Hz – square 80 Hz



Gambar 4.8 Kontur Temperatur, Intensitas Turbulensi, Kontur Vortisitas, Velocity Vector Temperatur pada gelombang sinusoidal 80Hz – Square 160Hz

#### 4.2.2 Analisa Kontur Thermal, Intensitas Turbulensi, Kontur Vortisiti dan Velocity Vector by static Temperatur untuk variasi sinyal Sinusoidal 160Hz – Square 80Hz

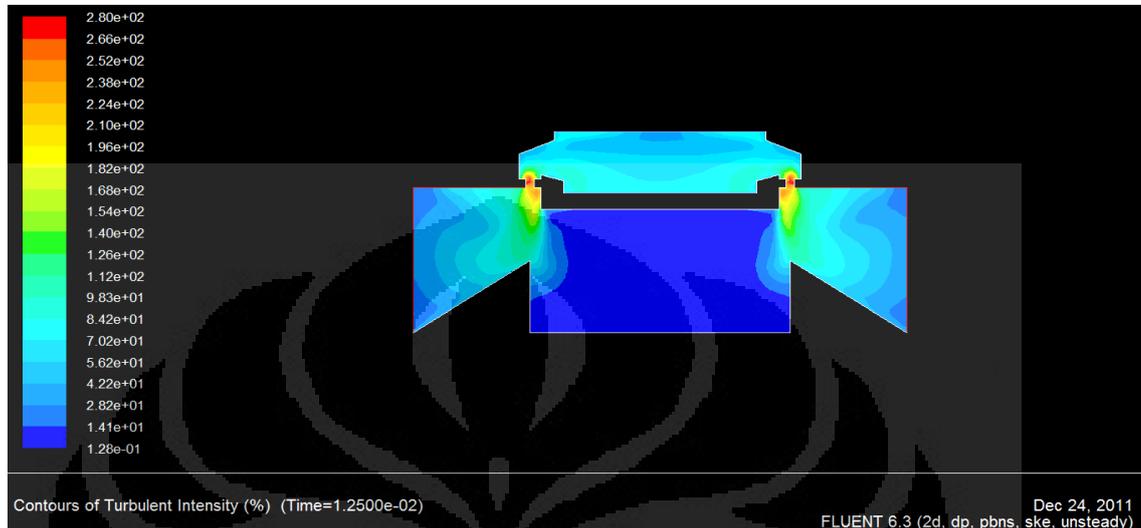
Pada variasi sinyal sinusoidal 160Hz – Square 80Hz, pada gambar 4.9a berdasarkan hasil simulasi dapat dilihat untuk kontur temperatur, pendinginan mulai terjadi pada detik ke-0.00625s, terlihat bahwa temperatur dari mulai detik ke-0 sampai 0.00625s memperlihatkan pergerakan pendinginan dari sythetic jet kepada *heatsink*, pada detik ke-0.0125s penurunan temperatur pada *heatsink* mulai menyebar secara merata pada sisi – sisi *heatsink* dan begitu memasuki detik ke-0.01875s temperatur pada sisi atas heatsink mulai mengalami penurunan yang signifikan dan begitu memasuki detik ke-0.025s pendinginan pada sisi atas heatsink mencapai titik tertinggi dan menyebar merata secara radial begitupula dengan sisi tengah dan bawah pada heatsink.



Gambar 4.9a Kontur temperatur saat deetik ke 0.00625 frekuensi sinusoidal 160 Hz – square 80 Hz

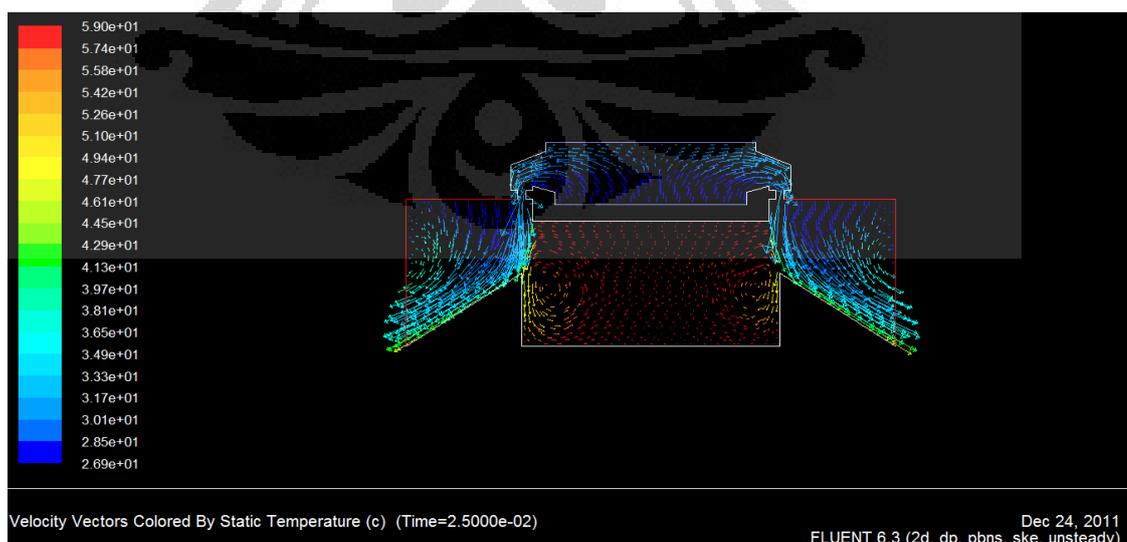
Pada gambar 4.9 dapat dilihat dari sisi intensitas turbulensi, dari sela waktu detik ke-0s sampai detik ke-0.00625s turbulensi mulai terbentuk pada synthetic jet, dan nilai intensitas turbulensi terbesar terjadi pada *orifice* dari Synthetic jet. Di detik ke-0.0125s intensitas turbulensi

mulai merata pada heatsink di semua bagiannya seperti terlihat pada gambar 4.9b. Dan pada titik akhir, yakni detik ke-0.025s nilai intensitas turbulensi mencapai maksimum pada orifice dan penyebarannya merata pada dinding heatsink dengan nilai yang bertambah secara signifikan.



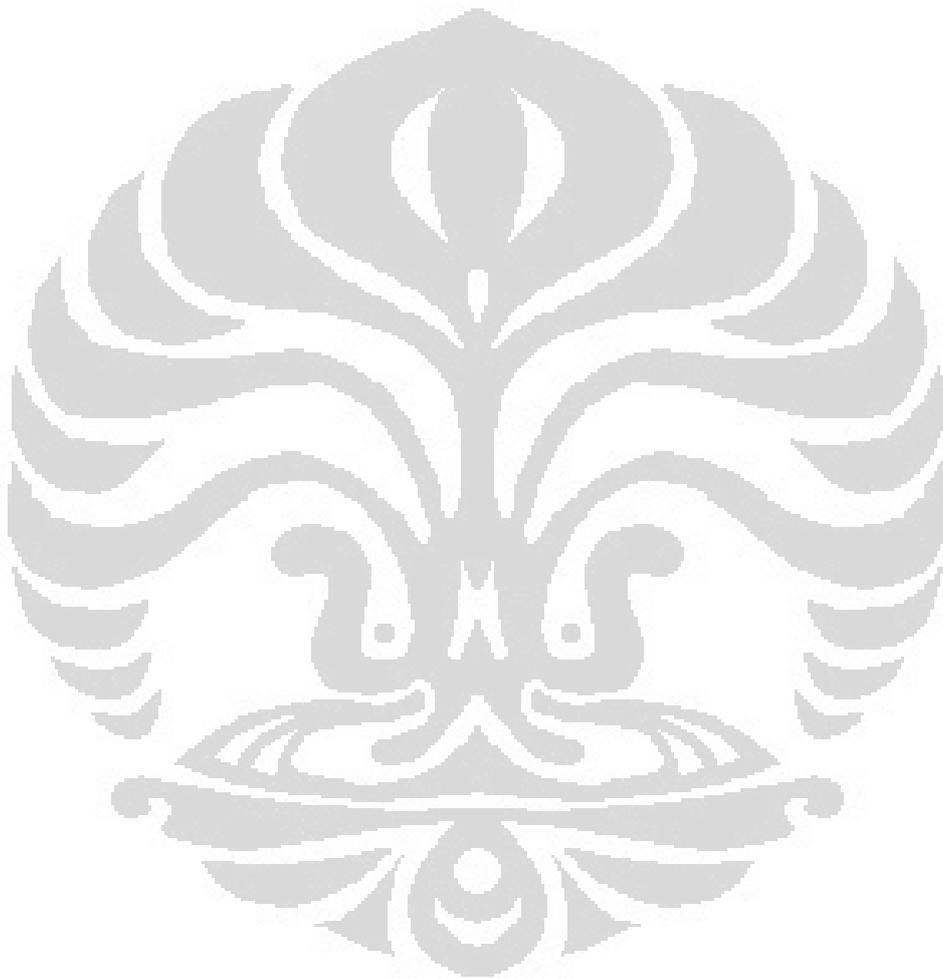
Gambar 4.9b Kontur intensitas turbulensi saat detik ke 0.0125 frekuensi sinusoidal 160 Hz – square 80 Hz

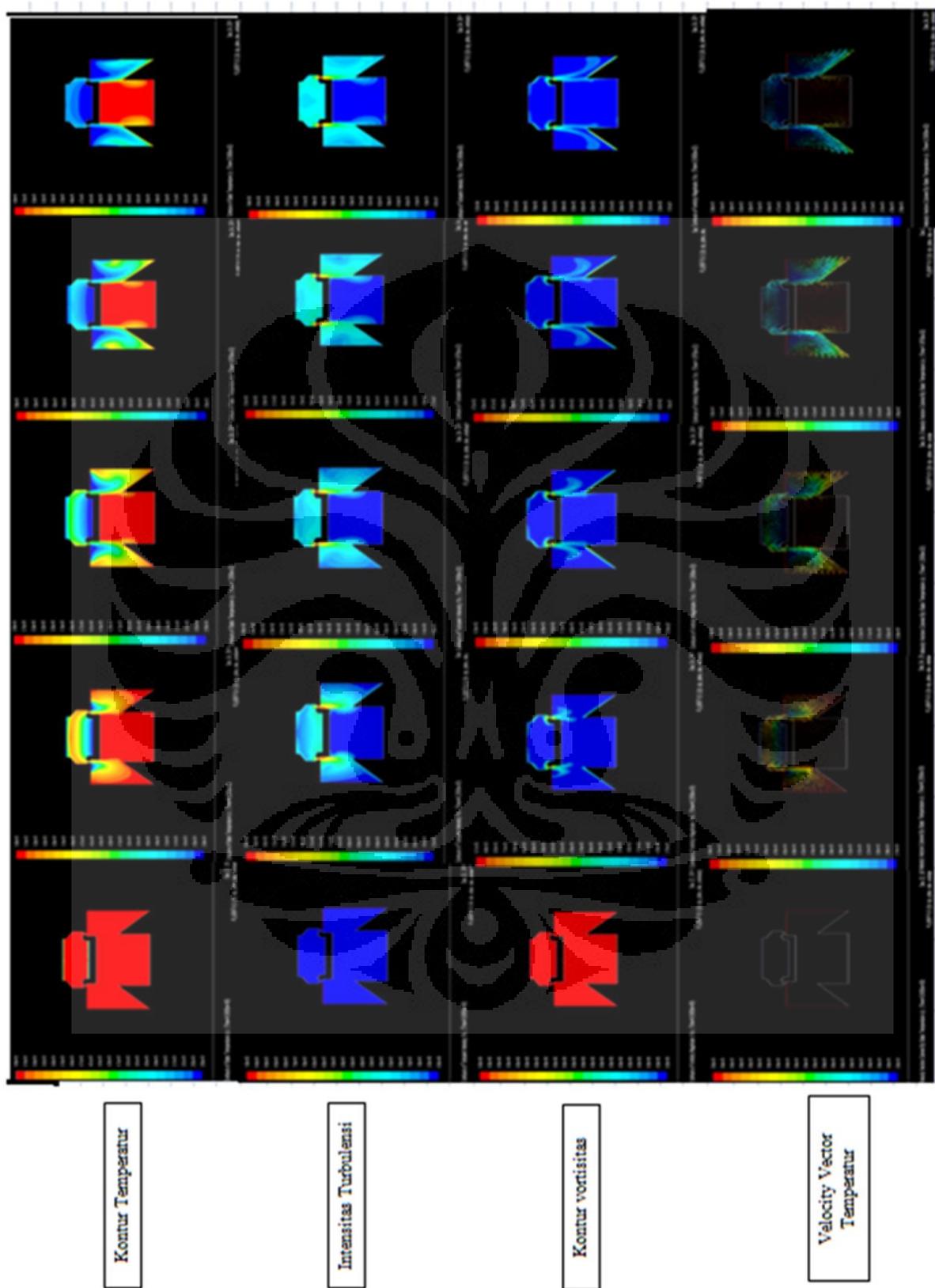
Pada gambar 4.9 terlihat dari aspek kontur vortisiti yang semakin membesar nilainya seiring waktu yang bertambah, nilai vortisitas berbanding lurus dengan nilai intensitas turbulensi yang semakin membesar. Hal ini dikarenakan nilai vortisitas sangat mempengaruhi adanya turbulensi pada suatu sistem.



Gambar 4.9c Velocity Vector saat detik ke 0.025 frekuensi sinusoidal 160 Hz – square 80 Hz

Dari aspek lainnya, berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan, yakni *velocity vector by static temperature*, kecepatan laju aliran fluida yang mendinginkan heatsink nilainya membesar secara signifikan dari detik ke-0 sampai detik ke-0.025s. pada detik ke-0.025s terlihat bahwa laju aliran pendinginan telah mencapai seluruh permukaan sisi luar heatsink dengan nilai yang terbesar terjadi pada bagian pinggir dan bawah heatsink seperti terdapat pada gambar 4.9c.





Gambar 4.9 Konur Temperatur, Intensitas Turbulensi, Konur Vortisitas, Velocity Vector Temperatur pada gelombang sinusoidal 160Hz – Square 80Hz

### 4.3 Sudut Fasa Gelombang 0 – 720

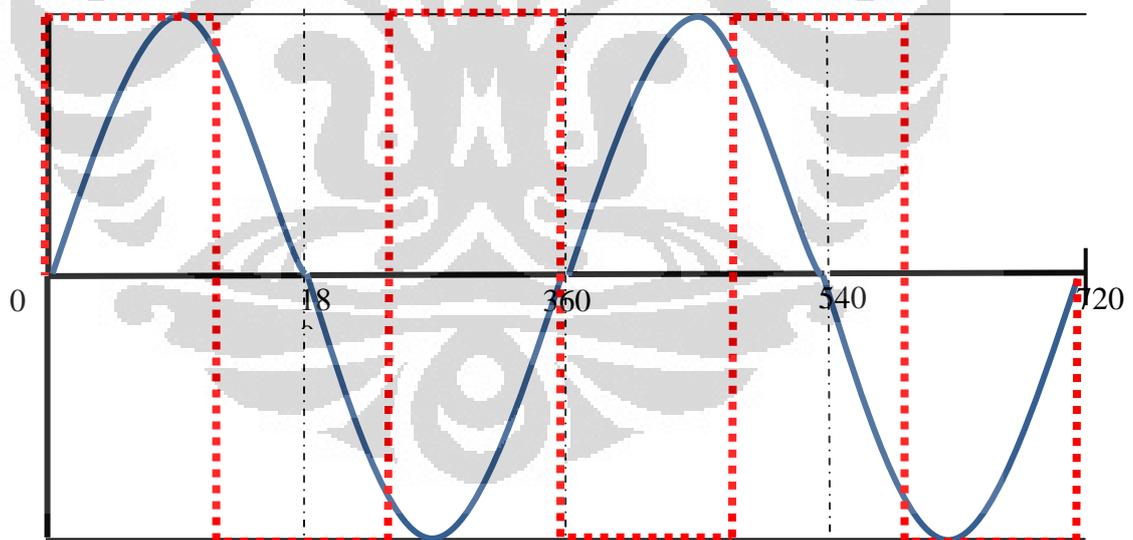
Pada saat dua gelombang sinusoidal terjadi maka akan terjadi tiga gelombang square dan begitu juga sebaliknya, dua gelombang ini memiliki titik fasa serta panjang gelombang yang berbeda, kedua gelombang ini akan bertemu pada titik awalan yang sama, yakni sudut fasa ke-0 dan titik akhir yang sama yakni sudut fasa ke-540.

Terdapat 2 gelombang yang memiliki variasi sudut fasa yang sama bertemu di awal dan akhir untuk 0 – 540, yakni :

1. Sinus 80 – Square 120
2. Sinus 120 – Square 80

#### 1. Sinusoidal 80Hz – Square 120Hz

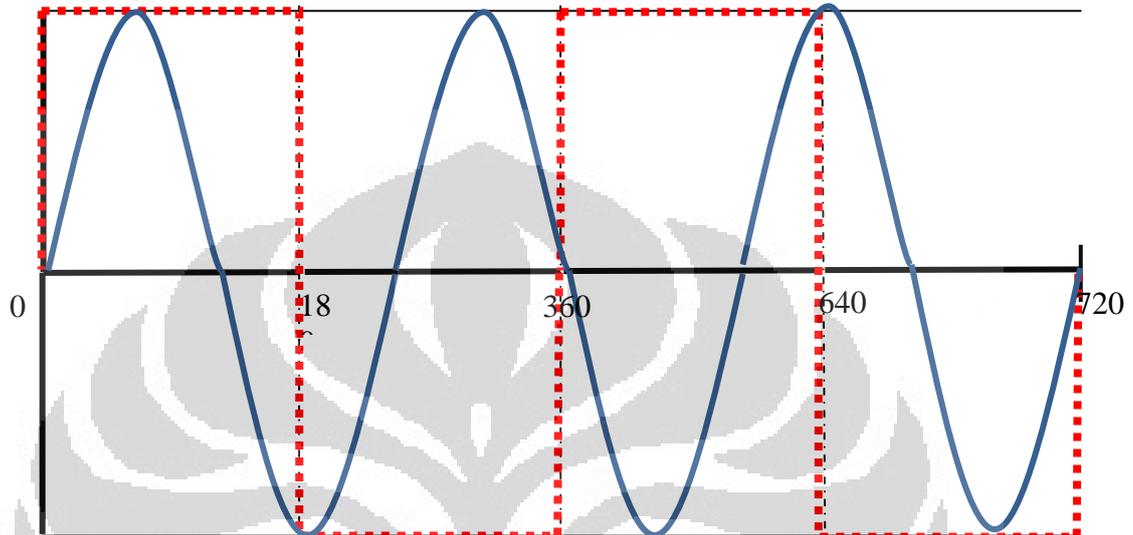
Pada variasi gelombang ini akan terdapat tigabuah gelombang square pada saat dua buah gelombang sinusoidal terjadi.



Gambar 4.10 gambar grafik sinusoidal 80Hz dan square 120Hz untuk sudut fasa 0 - 720

## 2. Sinusoidal 120Hz – 80Hz

Pada variasi gelombang ini akan terdapat tiga buah gelombang sinusoidal pada saat dua buah gelombang square terbentuk.

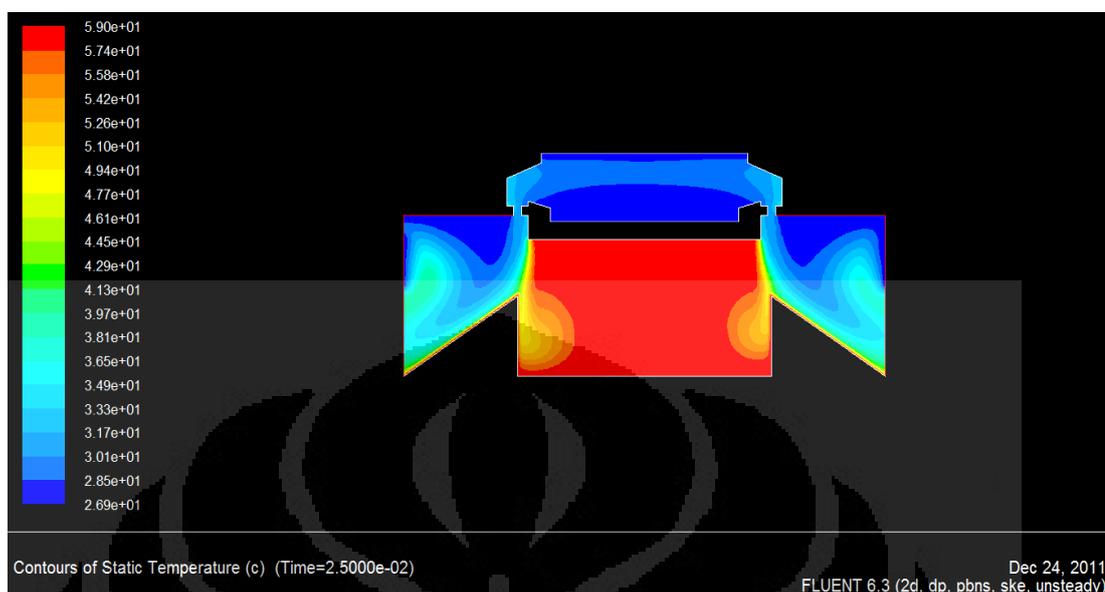


Gambar 4.11 gambar grafik sinusoidal 120Hz dan square 80Hz untuk sudut fasa 0 - 720

### 4.3.1 Analisa Kontur Thermal, Intensitas Turbulensi, Kontur Vortisiti dan Velocity Vector by static Temperatur untuk variasi sinyal Sinusoidal 80Hz – Square 120Hz

Pada variasi sinyal sinusoidal 80Hz – Square 120Hz, pada gambar 4.12 berdasarkan hasil simulasi dapat dilihat untuk kontur temperatur, pendinginan mulai terjadi pada detik ke-0.00625s, terlihat bahwa temperatur dari mulai detik ke-0 sampai 0.00625s memperlihatkan pergerakan pendinginan dari sythetic jet kepada *heatsink*, pada detik ke-0.0125s penurunan temperatur pada *heatsink* mulai menyebar secara merata pada sisi – sisi *heatsink* dan begitu memasuki detik ke-0.01875s temperatur pada sisi atas *heatsink* mulai mengalami penurunan yang signifikan dan begitu memasuki detik ke-0.025s pendinginan pada sisi atas *heatsink* mencapai titik tertinggi dan menyebar merata secara radial

begitupula dengan sisi tengah dan bawah pada heatsink seperti tampak pada gambar 4.12a.



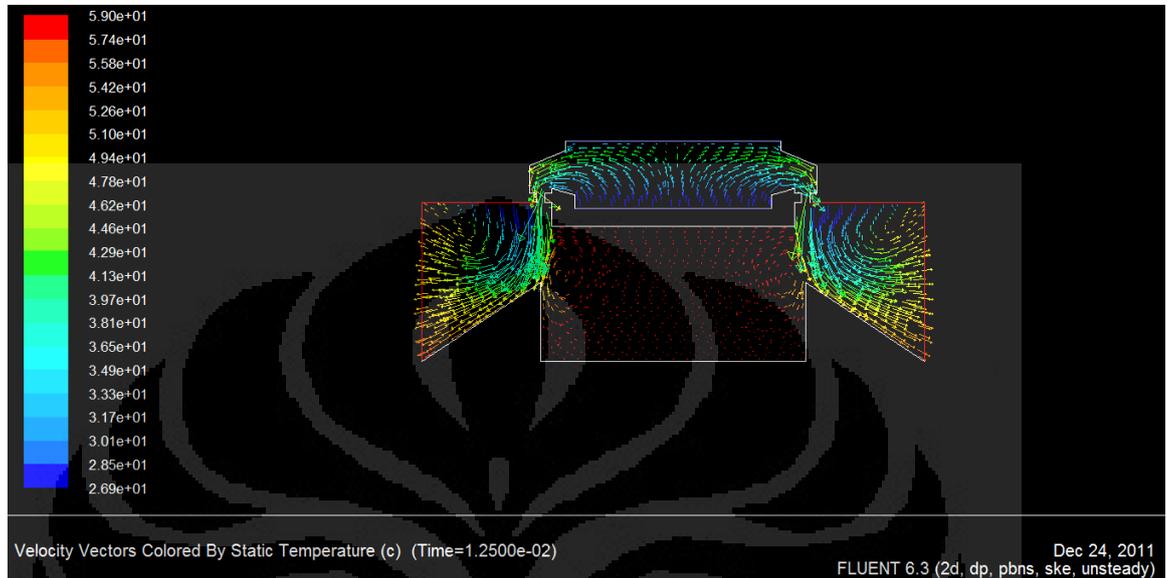
Gambar 4.12a Kontur temperatur saat detik ke 0.025 frekuensi sinusoidal 80 Hz – square 120 Hz

Pada gambar 4.12 dapat dilihat dari sisi intensitas turbulensi, dari sela waktu detik ke-0s sampai detik ke-0.00625s turbulensi mulai terbentuk pada synthetic jet, dan nilai intensitas turbulensi terbesar terjadi pada *orifice* dari Synthetic jet. Di detik ke-0.0125s intensitas turbulensi mulai merata pada heatsink di semua bagiannya. Dan pada titik akhir, yakni detik ke-0.025s nilai intensitas turbulensi mencapai maksimum pada *orifice* dan penyebarannya merata pada dinding heatsink dengan nilai yang bertambah secara signifikan.

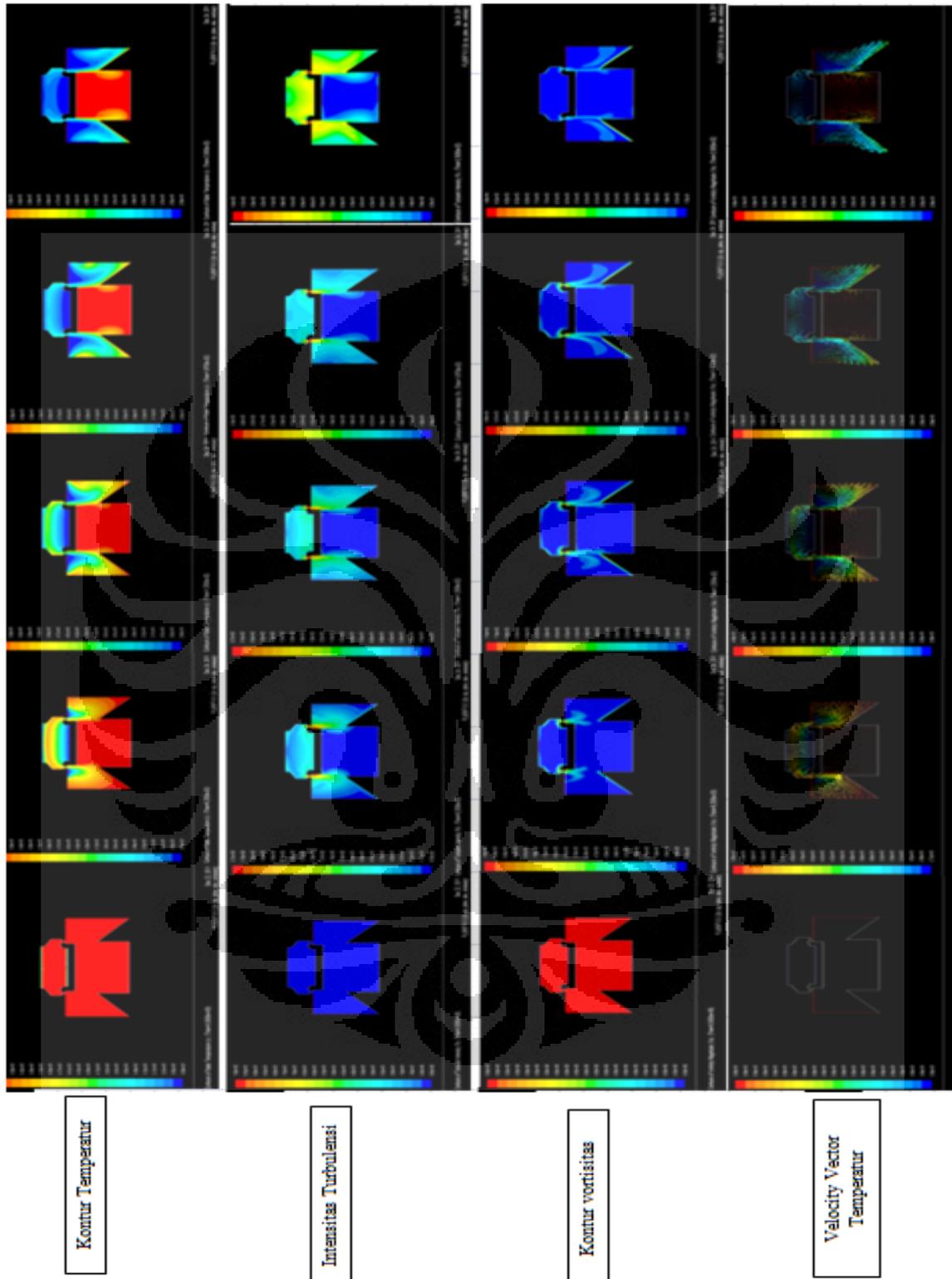
Pada gambar 4.12 terlihat dari aspek kontur vortisitas yang semakin membesar nilainya seiring waktu yang bertambah, nilai vortisitas berbanding lurus dengan nilai intensitas turbulensi yang semakin membesar. Hal ini dikarenakan nilai vortisitas sangat mempengaruhi adanya turbulensi pada suatu sistem.

Dari aspek lainnya, berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan, yakni *velocity vector by static temperature*, kecepatan laju aliran fluida yang mendinginkan heatsink nilainya membesar secara signifikan dari detik ke-0 sampai detik ke-0.0125s seperti nampak pada gambar 4.12b.

pada detik ke-0.025s terlihat bahwa laju aliran pendinginan telah mencapai seluruh permukaan sisi luar heatsink dengan nilai yang terbesar terjadi pada bagian pinggir dan bawah heatsink.



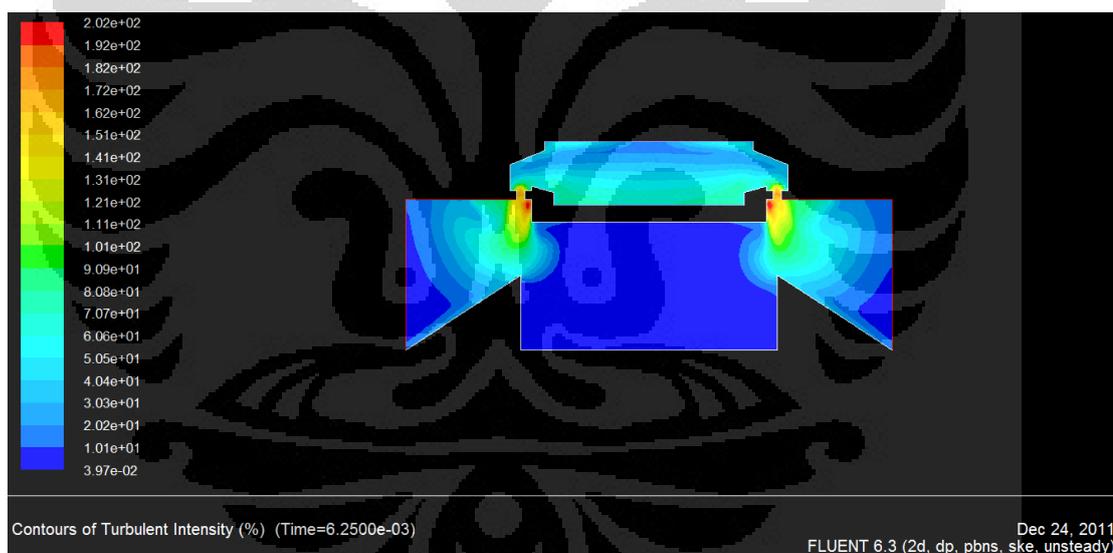
Gambar 4.12b Velocity vector saat detik ke 0.0125 frekuensi sinusoidal 80 Hz – square 120 Hz



Gambar 4.12 Kontur Temperatur, Intensitas Turbulensi, Kontur Vortisitas, Velocity Vector Temperatur pada gelombang sinusoidal 80 – Square 120

#### 4.3.2 Analisa Kontur Thermal, Intensitas Turbulensi, Kontur Vortisiti dan Velocity Vector by Temperatur untuk variasi sinyal Sinusoidal 120Hz – Square 80Hz

Pada variasi sinyal sinusoidal 120Hz – Square 80Hz, pada gambar 4.13 berdasarkan hasil simulasi dapat dilihat untuk kontur temperatur, pendinginan mulai terjadi pada detik ke-0.00625s, terlihat bahwa temperatur dari mulai detik ke-0 sampai 0.00625s memperlihatkan pergerakan pendinginan dari sythetic jet kepada *heatsink*, pada detik ke-0.0125s penurunan temperatur pada *heatsink* mulai menyebar secara merata pada sisi – sisi *heatsink* dan begitu memasuki detik ke-0.01875s temperatur pada sisi atas heatsink mulai mengalami penurunan yang signifikan dan begitu memasuki detik ke-0.025s pendinginan pada sisi atas heatsink mencapai titik tertinggi dan menyebar merata secara radial begitupula dengan sisi tengah dan bawah pada heatsink.

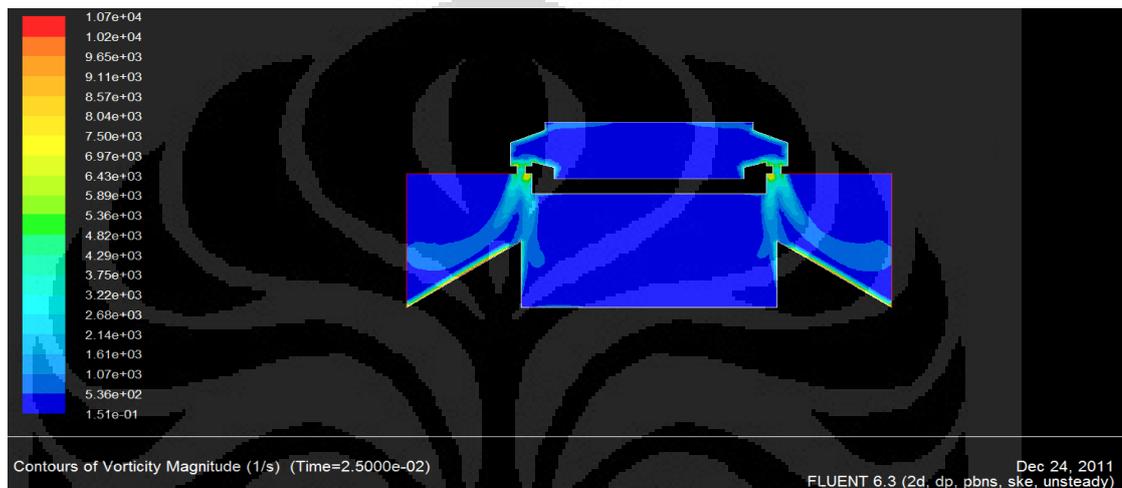


Gambar 4.13a Intensitas Turbulensi detik ke-0.00625 120 Hz – square 80 Hz

Pada gambar 4.13a dapat dilihat dari sisi intensitas turbulensi, dari sela waktu detik ke-0s sampai detik ke-0.00625s turbulensi mulai terbentuk pada synthetic jet, dan nilai intensitas turbulensi terbesar terjadi pada *orifice* dari Synthetic jet. Di detik ke-0.0125s intensitas turbulensi mulai merata pada heatsink di semua bagiannya. Dan pada titik akhir, yakni detik ke-0.025s nilai intensitas turbulensi mencapai maksimum pada

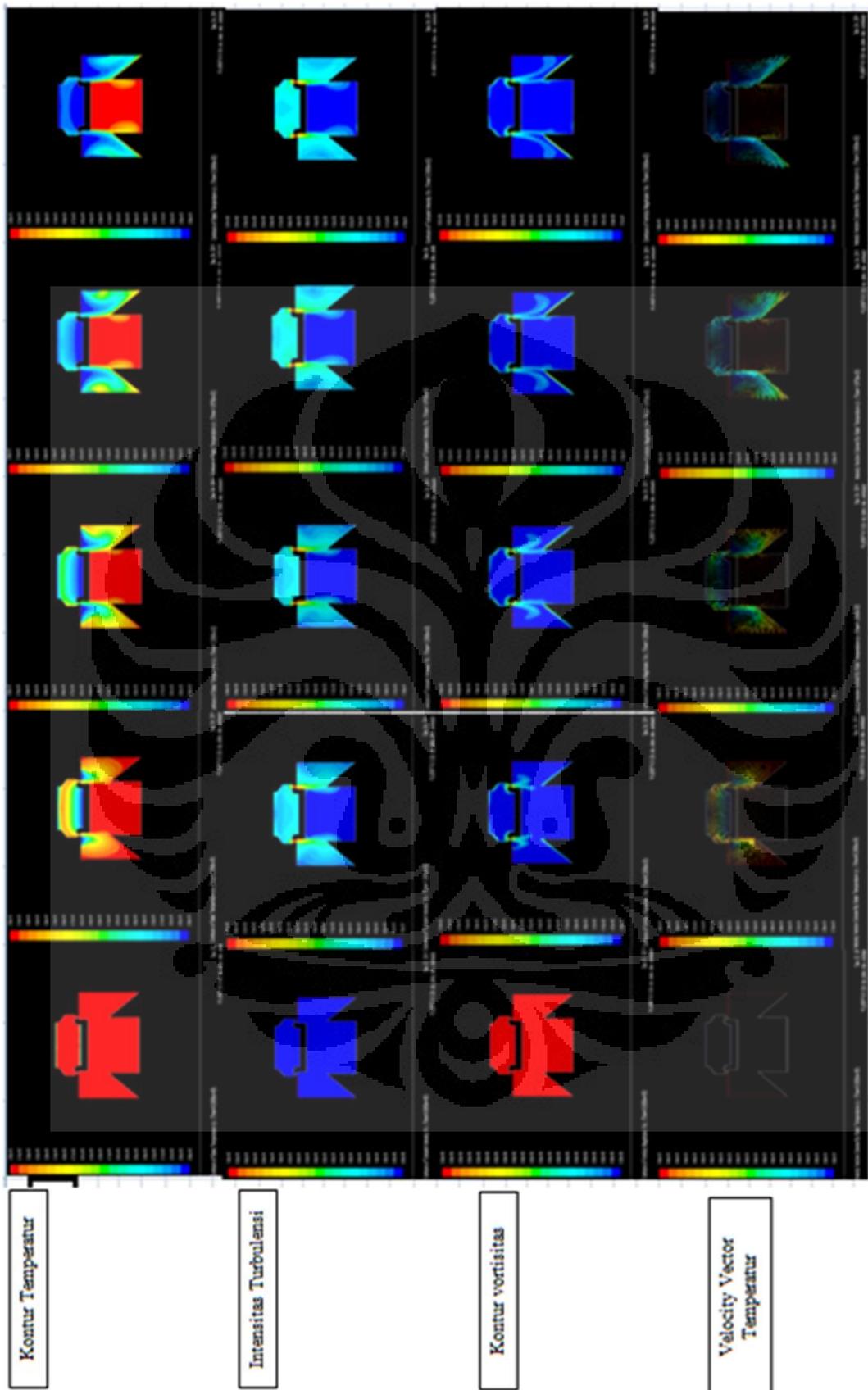
orifice dan penyebarannya merata pada dinding heatsink dengan nilai yang bertambah secara signifikan.

Pada gambar 4.13b terlihat dari aspek kontur vortisiti yang semakin membesar nilainya seiring waktu yang bertambah, nilai vortisitas berbanding lurus dengan nilai intensitas turbulensi yang semakin membesar. Hal ini dikarenakan nilai vortisitas sangat mempengaruhi adanya turbulensi pada suatu sistem.



Gambar 4.13b Kontur Vortisiti 120 Hz – square 80 Hz

Dari aspek lainnya, berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan, yakni *velocity vector by static temperature*, kecepatan laju aliran fluida yang mendinginkan heatsink nilainya membesar secara signifikan dari detik ke-0 sampai detik ke-0.025s. pada detik ke-0.025s terlihat bahwa laju aliran pendinginan telah mencapai seluruh permukaan sisi luar heatsink dengan nilai yang terbesar terjadi pada bagian pinggir dan bawah heatsink.



Gambar 4.13 Kontur Temperatur, Intensitas Turbulensi, Kontur Vortisitas, Velocity Vector Temperatur pada gelombang sinusoidal 120Hz – Square 80Hz

#### 4.4 Sudut Fasa Gelombang 0 – 1080

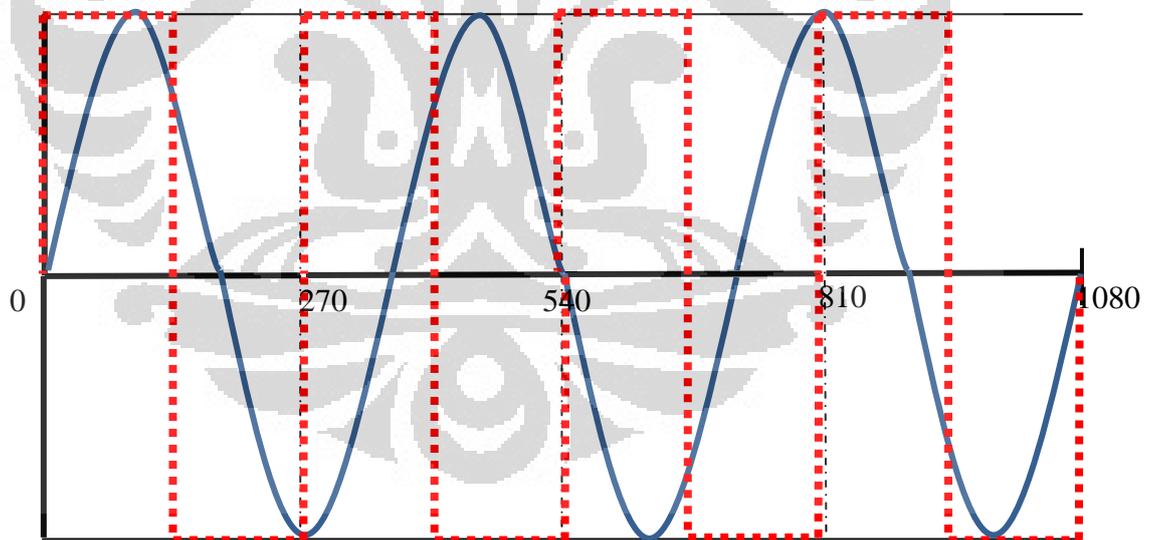
Pada saat tiga gelombang sinusoidal terjadi maka akan terjadi empat gelombang square dan begitu juga sebaliknya, dua jenis gelombang ini memiliki titik fasa serta panjang gelombang yang berbeda, kedua gelombang ini akan bertemu pada titik awalan yang sama, yakni sudut fasa ke-0 dan titik akhir yang sama yakni sudut fasa ke-1080.

Terdapat 2 gelombang yang memiliki variasi sudut fasa yang sama bertemu di awal dan akhir untuk 0 – 540, yakni :

1. Sinus 120 – Square 160
2. Sinus 160 – Square 120

##### 1. Sinusoidal 120Hz – Square 160Hz

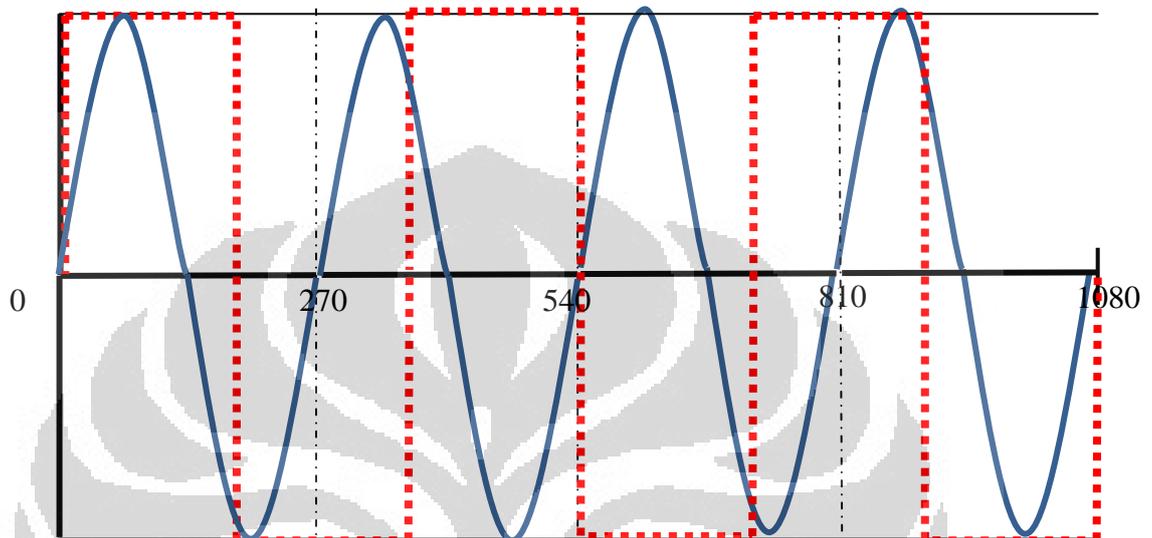
Pada variasi gelombang ini akan terdapat tigabuh gelombang sinusoidal pada saat empat buah gelombang square terjadi.



Gambar 4.14 gambar grafik sinusoidal 80Hz dan square 120Hz untuk sudut fasa 0 - 720

## 2. Sinusoidal 120Hz – 80Hz

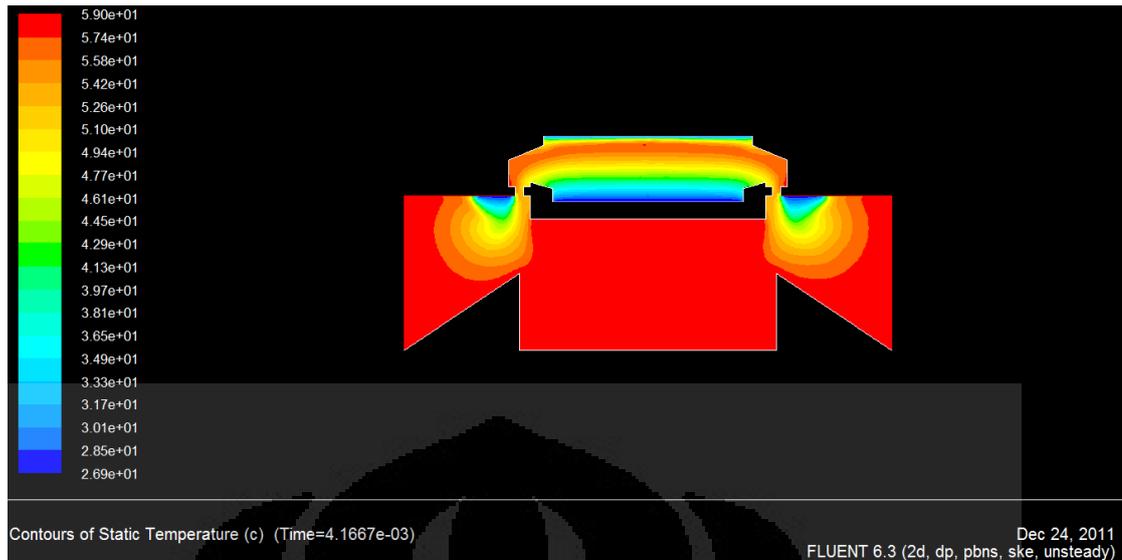
Pada variasi gelombang ini akan terdapat tiga buah gelombang sinusoidal pada saat dua buah gelombang square terbentuk.



Gambar 4.15 gambar grafik sinusoidal 120Hz dan square 80Hz untuk sudut fasa 0 - 720

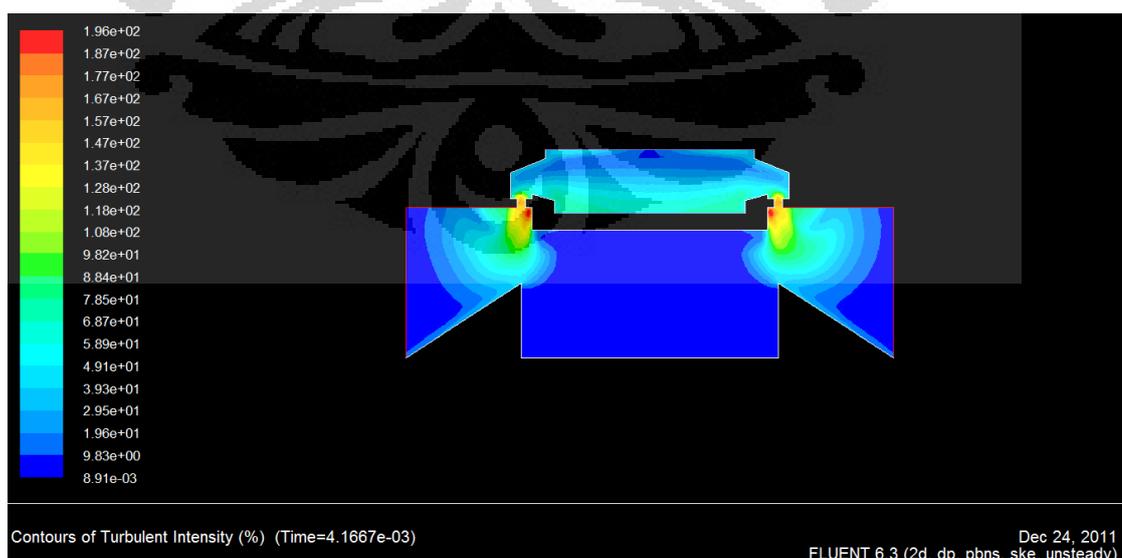
### 4.4.1 Analisa Kontur Thermal, Intensitas Turbulensi, Kontur Vortisiti dan Velocity Vector by static Temperatur untuk variasi sinyal Sinusoidal 120Hz – Square 160Hz

Pada variasi sinyal sinusoidal 120Hz – Square 160Hz, pada gambar 4.16a berdasarkan hasil simulasi dapat dilihat untuk kontur temperatur, pendinginan mulai terjadi pada detik ke-0.00416667s, terlihat bahwa temperatur dari mulai detik ke-0 sampai 0.00416667s memperlihatkan pergerakan pendinginan dari sythetic jet kepada *heatsink*, pada detik ke-0.0083333s penurunan temperatur pada *heatsink* mulai menyebar secara merata pada sisi – sisi *heatsink* dan begitu memasuki detik ke-0.0125s temperatur pada sisi atas *heatsink* mulai mengalami penurunan yang signifikan dan begitu memasuki detik ke-0.016667s pendinginan pada sisi atas *heatsink* mencapai titik tertinggi dan menyebar merata secara radial begitupula dengan sisi tengah dan bawah pada *heatsink*.



Gambar 4.16a Kontur temperatur saat detik ke 0.00416667 frekuensi sinusoidal 120 Hz – square 160 Hz

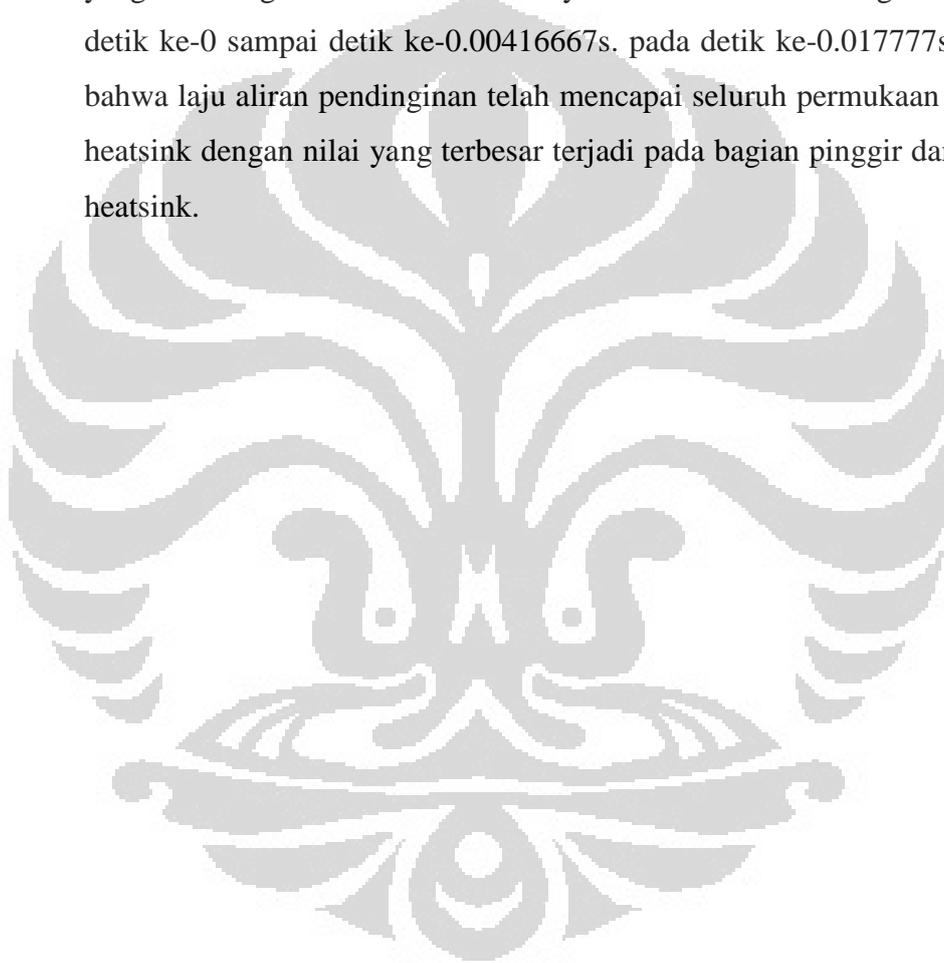
Pada gambar 4.16b dapat dilihat dari sisi intensitas turbulensi, dari sela waktu detik ke-0s sampai detik ke-0.00416667s turbulensi mulai terbentuk pada synthetic jet, dan nilai intensitas turbulensi terbesar terjadi pada *orifice* dari Synthetic jet. Di detik ke-0.0125s intensitas turbulensi mulai merata pada heatsink di semua bagiannya. Dan pada titik akhir, yakni detik ke-0.016667s nilai intensitas turbulensi mencapai maksimum pada orifice dan penyebarannya merata pada dinding heatsink dengan nilai yang bertambah secara signifikan.

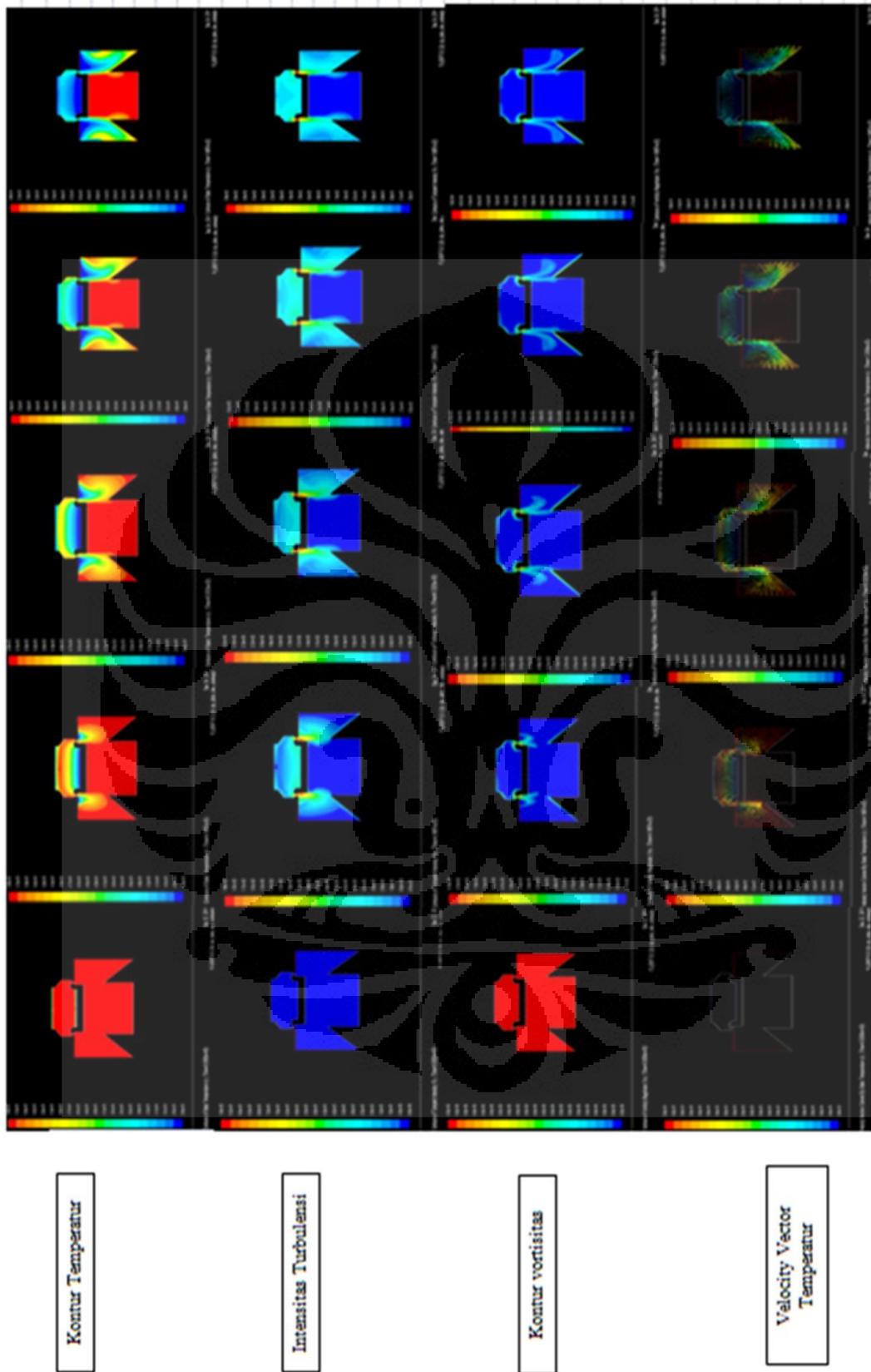


Gambar 4.16b Intensitas Turbulen saat detik ke 0.00416667 frekuensi sinusoidal 120 Hz – square 160 Hz

Pada gambar 4.16 terlihat dari aspek kontur vortisiti yang semakin membesar nilainya seiring waktu yang bertambah, nilai vortisitas berbanding lurus dengan nilai intensitas turbulensi yang semakin membesar. Hal ini dikarenakan nilai vortisitas sangat mempengaruhi adanya turbulensi pada suatu sistem.

Dari aspek lainnya, berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan, yakni *velocity vector by static temperature*, kecepatan laju aliran fluida yang mendinginkan heatsink nilainya membesar secara signifikan dari detik ke-0 sampai detik ke-0.00416667s. pada detik ke-0.017777s terlihat bahwa laju aliran pendinginan telah mencapai seluruh permukaan sisi luar heatsink dengan nilai yang terbesar terjadi pada bagian pinggir dan bawah heatsink.

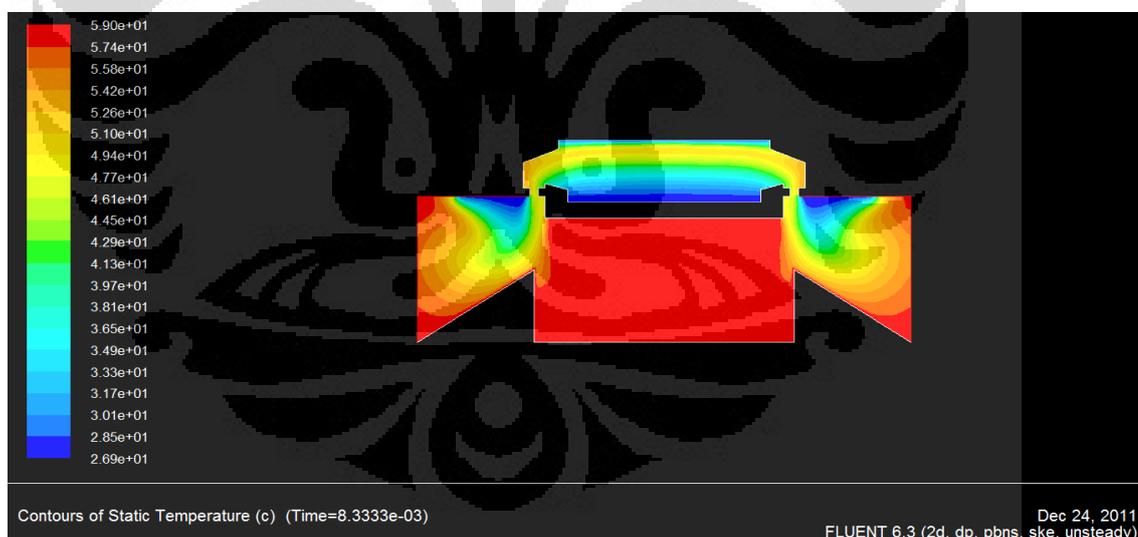




Gambar 4.16 Konur Temperatur, Intensitas Turbulensi, Konur Vortisitas, Velocity Vector Temperatur pada gelombang sinusoidal 120Hz – Square 160Hz

#### 4.4.2 Analisa Kontur Thermal, Intensitas Turbulensi, Kontur Vortisiti dan Velocity Vector by static Temperatur untuk variasi sinyal Sinusoidal 160Hz – Square 120Hz

Pada variasi sinyal sinusoidal 120Hz – Square 160Hz, pada gambar 4.17 berdasarkan hasil simulasi dapat dilihat untuk kontur temperatur, seperti dilihat pada gambar 4.17a, pendinginan mulai terjadi pada detik ke-0.00416667s, terlihat bahwa temperatur dari mulai detik ke-0 sampai 0.00416667s memperlihatkan pergerakan pendinginan dari sythetic jet kepada *heatsink*, pada detik ke-0.008333s, seperti yang terlihat pada gambar 4.17a, penurunan temperatur pada *heatsink* mulai menyebar secara merata pada sisi – sisi *heatsink* dan begitu memasuki detik ke-0.0125s temperatur pada sisi atas heatsink mulai mengalami penurunan yang signifikan dan begitu memasuki detik ke-0.016667s pendinginan pada sisi atas heatsink mencapai titik tertinggi dan menyebar merata secara radial begitupula dengan sisi tengah dan bawah pada heatsink.



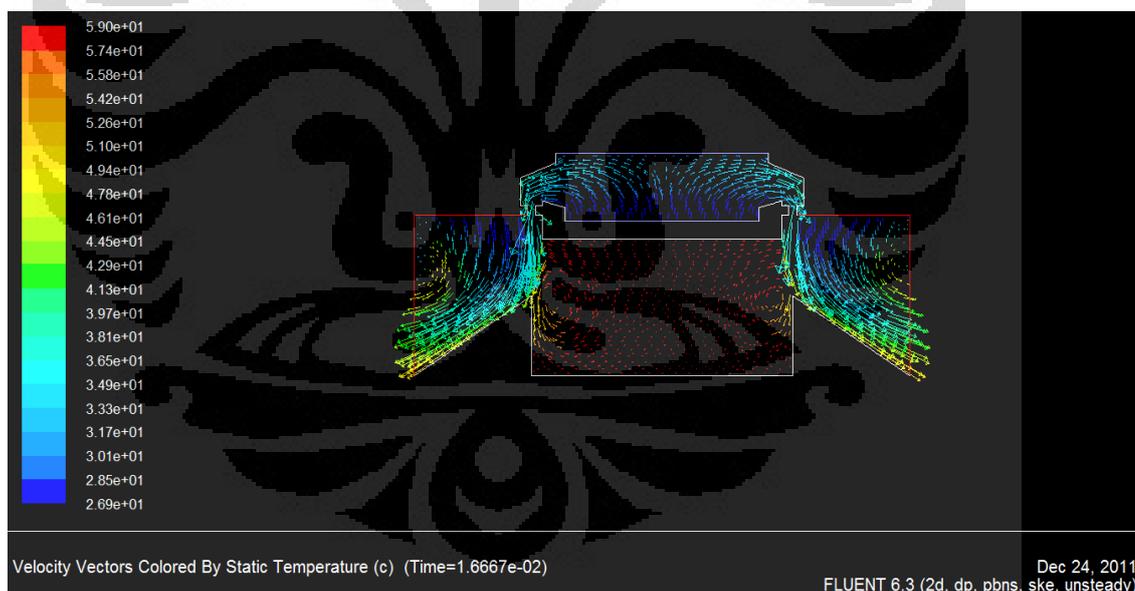
Gambar 4.17a Kontur temperatur saat detik ke 0.008333 frekuensi sinusoidal 160 Hz – square 120 Hz

Pada gambar 4.17 dapat dilihat dari sisi intensitas turbulensi, dari sela waktu detik ke-0s sampai detik ke-0.00416667s turbulensi mulai terbentuk pada sythetic jet, dan nilai intensitas turbulensi terbesar terjadi pada *orifice* dari Synthetic jet. Di detik ke-0.0125s intensitas turbulensi

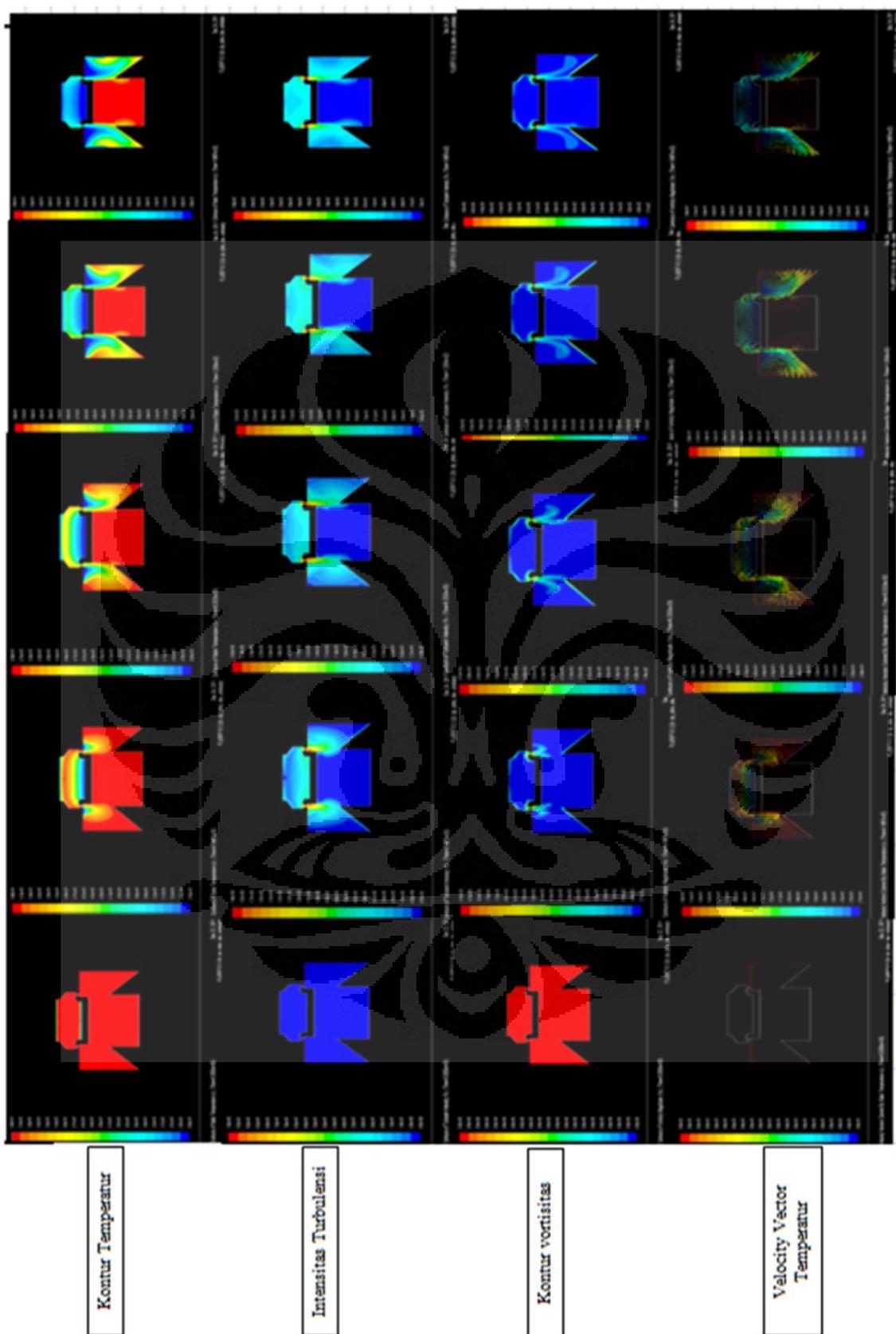
mulai merata pada heatsink di semua bagiannya. Dan pada titik akhir, yakni detik ke-0.016667s nilai intensitas turbulensi mencapai maksimum pada orifice dan penyebarannya merata pada dinding heatsink dengan nilai yang bertambah secara signifikan.

Pada gambar 4.17 terlihat dari aspek kontur vortisiti yang semakin membesar nilainya seiring waktu yang bertambah, nilai vortisitas berbanding lurus dengan nilai intensitas turbulensi yang semakin membesar. Hal ini dikarenakan nilai vortisitas sangat mempengaruhi adanya turbulensi pada suatu sistem.

Dari aspek lainnya, berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan, yang mendinginkan heatsink nilainya membesar secara signifikan dari detik ke-0 sampai detik ke-0.00416667s. pada detik ke-0.016667s terlihat bahwa laju aliran pendinginan telah mencapai seluruh permukaan sisi luar heatsink dengan nilai yang terbesar terjadi pada bagian pinggir dan bawah heatsink seperti pada gambar 4.17b.



Gambar 4.17b Vector velocity saat detik ke 0.01666667 frekuensi sinusoidal 160 Hz – square 120 Hz



Gambar 4.17 Kontur Temperatur, Intensitas Turbulensi, Kontur Vortisitas, Velocity Vector Temperatur pada gelombang sinusoidal 160Hz – Square 120Hz

## 4.5 Analisis Eksperimental

Tahap eksperimen dilakukan dengan mengamati perubahan temperatur pada enam titik berbeda yang diletakan pada bagian atas *heat sink* secara merata pada titik yang dianggap mampu merepresentasikan laju pendinginan radial *synthetic jet* terhadap *heat sink* pada kondisi ruang terbuka selama 60 menit. Pengambilan data dilakukan dengan menggunakan variasi gelombang sinusoidal untuk membran atas dan gelombang square untuk membran bawah pada variasi frekuensi 80 hz, 120 hz, dan 160 hz untuk tiap – tiap membran dengan amplitudo tetap 1 m/s serta temperatur ambient / lingkungan +/- 28-30°C dengan tingkat kelembaban ( $R_h = 76\% - 82\%$ ). Setelah dilakukan pengambilan data dan pengolahan data terhadap enam titik eksperimen, didapatkan hasil yang hampir serupa dan sama, baik secara perubahan temperatur maupun karakteristik pendinginannya dan akhirnya diputuskan untuk mengambil satu titik saja yang akan disajikan dalam analisis eksperimental ini yang dimana titik tersebut telah dianggap mampu mewakili titik lainnya.

Hasil pengambilan data disajikan dan dianalisis ke dalam dua grafik yaitu grafik perubahan temperatur terhadap waktu dan grafik koefisien perpindahan kalor konveksi terhadap waktu.

### 4.5.1 Analisis Perubahan Temperatur terhadap Waktu

Gambar 4.18 menunjukkan karakteristik temperatur *synthetic jet* terhadap waktu. Terlihat pada grafik bahwa variasi frekuensi variasi gelombang *Sinusoidal* – *Square* memiliki pengaruh terhadap pendinginan *heat sink*. Berdasarkan bentuk grafik, karakteristik pendinginan *synthetic jet* terhadap *heat sink* dengan gelombang *Sinusoidal* – *Square* 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

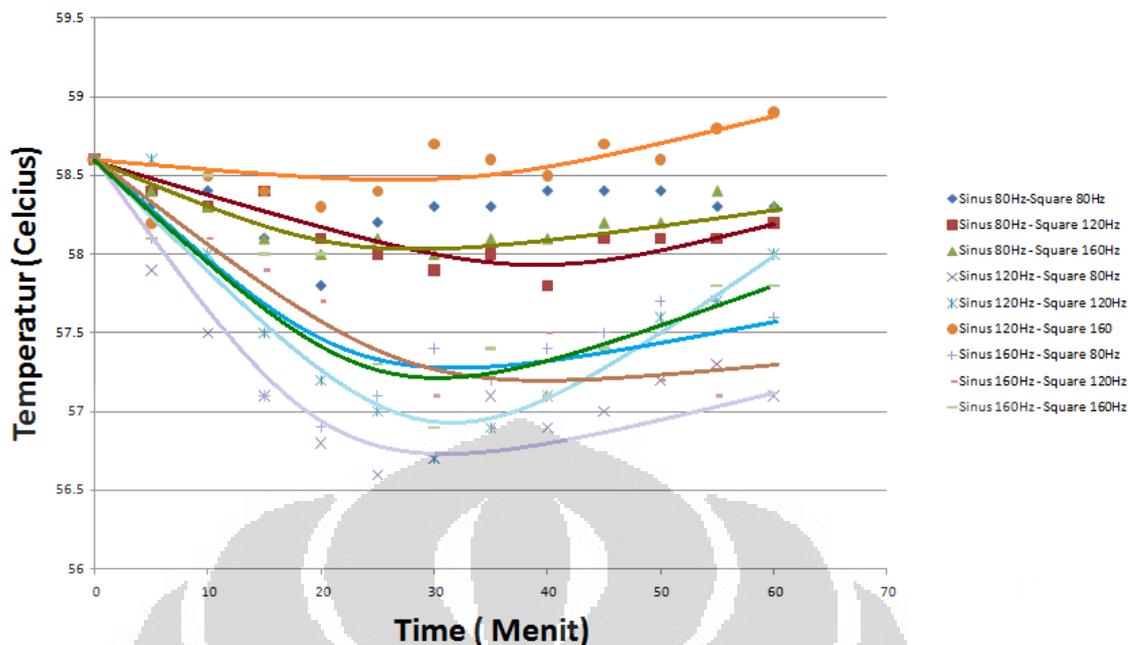
semakin tinggi. Terjadi tren penurunan temperatur pada semua variasi jenis gelombang pada tiap frekuensi dimana hal itu rata – rata terjadi pada waktu 25 menit pertama, saat memasuki menit ke 30 terjadi kecenderungan temperatur kembali naik.

Pada saat tren penurunan temperatur secara keseluruhan dari temperatur awal  $58,6^{\circ}\text{C}$ , variasi gelombang sinusoidal 120 Hz – square 80 Hz memiliki nilai penurunan temperatur terbesar dibandingkan variasi sinyal lainnya yakni sebesar  $2^{\circ}\text{C}$ , variasi gelombang sinusoidal 120 Hz – square 120 Hz memiliki nilai tertinggi kedua yakni sebesar  $1,9^{\circ}\text{C}$  dan variasi yang memiliki nilai penurunan temperatur paling rendah adalah variasi sinusoidal 120 Hz – square 160 Hz dengan penurunan maksimum hanya  $0,7^{\circ}\text{C}$ . Setelah memasuki menit ke-30, terjadi kecenderungan peningkatan temperatur kembali. Nilai kenaikan temperatur antara satu variasi gelombang dengan gelombang lainnya memiliki nilai yang bervariasi.

Pada menit ke-60, saat akhir eksperimen, didapatkan dua kondisi yang terjadi, yakni suhu setelah satu jam yang lebih tinggi dibandingkan suhu awal ( $58,6^{\circ}\text{C}$ ) serta penurunan temperatur dimana suhu akhir lebih rendah dari suhu awal.

Variasi gelombang sinusoidal 120 Hz – square 160 Hz memiliki nilai terburuk dalam penurunan suhu, hal ini dikarenakan justru suhu akhir lebih tinggi dibandingkan suhu awal, dimana setelah waktu eksperimen selama satu jam di dapatkan suhu akhir mencapai  $58,9^{\circ}\text{C}$  dimana hal ini berarti lebih tinggi  $3^{\circ}\text{C}$  selsius dibanding suhu awal dan yang terjadi disini selama satu jam justru adalah pemanasan dan bukan pendinginan.

Sedangkan untuk nilai penurunan temperatur terbaik selama satu jam dimiliki oleh variasi suhu sinusoidal 120 Hz – square 80 Hz dimana dalam waktu 60 menit variasi suhu ini mampu menurunkan suhu sebesar  $1,5^{\circ}\text{C}$ .

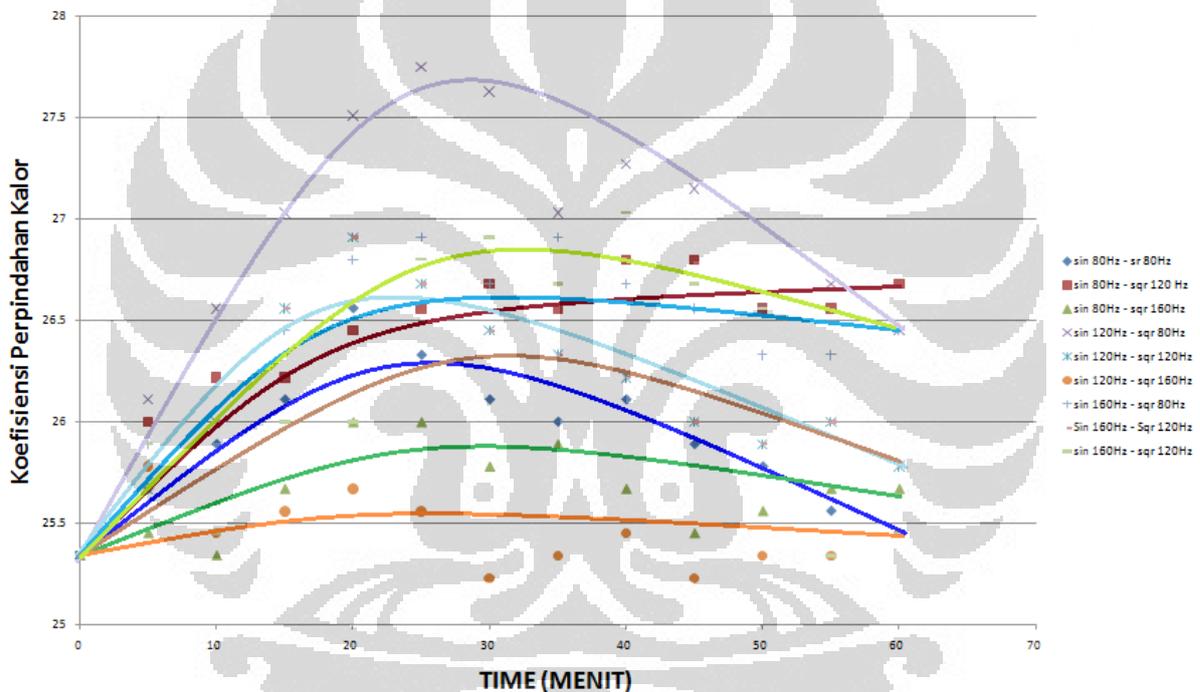


Gambar 4.18 Grafik temperatur pendinginan *synthetic jet* terhadap waktu

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

Gambar 4.19 memperlihatkan karakteristik koefisien perpindahan panas gelombang *Sinusoidal* – *Square* dengan variasi frekuensi 80Hz, 120Hz, 160Hz 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 *Sinusoidal* – *Square*. Trend koefisien perpindahan kalor gelombang *Sinusoidal* – *Square* meningkat sampai pada suatu nilai puncak kemudian mengalami penurunan. Penurunan koefisien perpindahan panas ini mulai terjadi pada waktu sekitar 25 menit setelah membran bergetar. Nilai koefisien *heat transfer* terbesar terdapat pada variasi gelombang sinusoidal 120 Hz – square 80 Hz dimana koefisien perpindahan kalor mencapai nilai puncak sekitar  $27,75 \text{ W/m}^2\text{K}$  dan setelah itu mengalami kecenderungan penurunan secara perlahan. Pada variasi gelombang lainnya terjadi tren yang sama dimana hampir semua variasi gelombang frekuensi memiliki tren meningkat di menit ke-0 sampai menit ke-25, dan setelah menit ke

30 terjadi kecenderungan penurunan nilai heat transfer coefficient. Grafik koefisien perpindahan kalor juga menunjukkan bahwa gelombang sinusoidal 120Hz – square 80 Hz efek pendinginan yang terbaik dibanding pada frekuensi lainnya. Bahkan pada frekuensi sinusoidal 120Hz - square160Hz nilai koefisien perpindahan kalor setelah 60 menit berada di bawah nilai awalnya. Hal tersebut menunjukkan buruknya efek pendinginan pada variasi gelombang tersebut. Hal itu 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*.



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

#### 4.6 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:

	Frekuensi Square	Mean	Standard Deviasi	Standard Error	Uncertainty
sinusoidal 80Hz	80 Hz	58.3	0.1891276	0.0524545	0.1028109
	120 Hz	58.2	0.2221688	0.0616185	0.1207723
	160Hz	58.3	0.1772294	0.0491546	0.096343
Sinusoidal 120Hz	80 Hz	57.3	0.5520359	0.1531072	0.300090111
	120 Hz	57.6	0.6076436	0.168530018	0.330318835
	160Hz	58.6	0.198391	0.055023753	0.107846556
Sinusoidal 160Hz	80 Hz	58.1	0.3330127	0.092361096	0.181027747
	120 Hz	57.962	0.328	0.091	0.178286342
	160Hz	58.123	0.262	0.073	0.142368525

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

	Frekuensi Square	Mean	Persentase Error
sinusoidal 80Hz	80 Hz	58.3	0.001763713
	120 Hz	58.2	0.002076773
	160Hz	58.3	0.00165494
Sinusoidal 120Hz	80 Hz	57.3	0.005238581
	120 Hz	57.6	0.330318835
	160Hz	58.6	0.107846556
Sinusoidal 160Hz	80 Hz	58.1	0.00311786
	120 Hz	57.962	0.003
	160Hz	58.123	0.002



## BAB 5

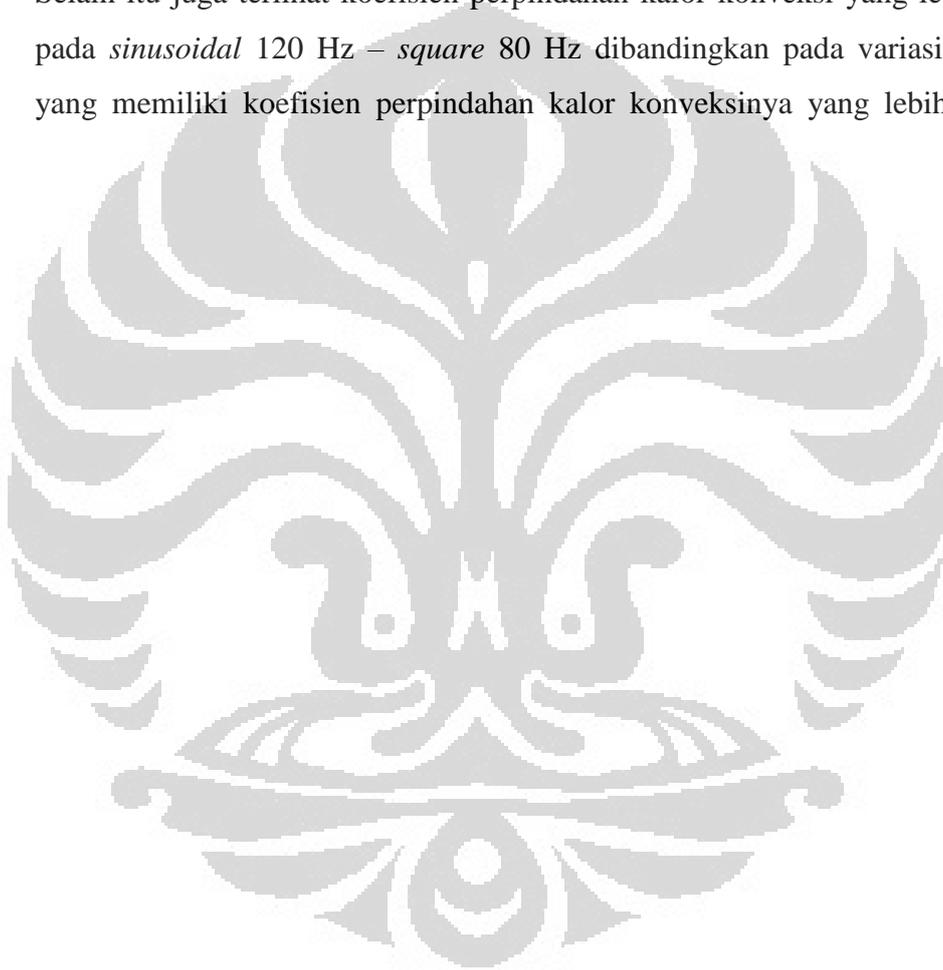
### KESIMPULAN

#### 5.1 Kesimpulan

Penelitian mengenai efek pendinginan serta karakteristik aliran dengan menggunakan *synthetic jet* dengan gelombang variasi *sinusoidal – square* pada frekuensi variasi 80Hz, 120Hz, 160 Hz yang telah dilakukan dan dianalisa telah berhasil menunjukkan karakteristik dan efek pendinginan yang menjanjikan. Studi komputasional dan eksperimental telah dilakukan pada sebuah desain orisinal jet sintetik yang digerakkan oleh dua buah membran *piezoelectric* yang digerakan oleh dua fungsi yang berbeda (membran atas digerakan dengan menggunakan fungsi sinusoidal, dan membran bawah digerakan dengan menggunakan fungsi square) dimana udara di dalam *cavity* jet sintetik akan bergerak akibat getaran yang dihasilkan oleh kedua membran *piezoelectric*.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa efek pendinginan secara radial dimana telah dilakukan pengukuran pada enam titik yang tersebar secara simetris pada permukaan atas *heatsink* telah terjadi secara merata. Efek pendinginan terjadi akibat dari gerakan *suction* dan *discharge* dari membran jet sintetik akibat variasi osilasi frekuensi serta jenis gelombang yang berbeda pada kedua membrane tersebut yang mempunyai peranan penting pada efek pendinginan, ini dikarenakan perbedaan sudut fasa serta jenis gelombang yang memungkinkan pendinginan dilakukan secara kontinyu dimana kedua membran tersebut dapat melakukan fase *suction* dan *discharge* baik secara bersamaan maupun bergantian sesuai dengan jenis gelombang dan frekuensi yang diatur dan hal ini terlihat pada hasil simulasi visualisasi aliran menggunakan *software* CFD Fluent. Pada *contour* vortisitas terlihat bahwa vortisitas akibat dari *suction* dan *discharge* membran jet sintetik 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 sintetik dan membentur

dinding *heat sink*. Pada hasil eksperimental terlihat bahwa pendinginan pada saat membran jet sintetis digerakan dengan menggunakan fungsi *sinusoidal* 120 Hz – *square* 80 Hz mempunyai efek pendinginan yang lebih baik dibandingkan pada variasi gelombang seta frekuensi lainnya. Hal ini ditandai dengan penurunan temperatur yang lebih baik pada fungsi *sinusoidal* 120 Hz – *square* 80 Hz dimana variasi gelombang tersebut dapat menurunkan suhu hingga 2°C ketika membran jet sintetis telah bersilasi selama 60 menit. Selain itu juga terlihat koefisien perpindahan kalor konveksi yang lebih baik pada *sinusoidal* 120 Hz – *square* 80 Hz dibandingkan pada variasi lainnya yang memiliki koefisien perpindahan kalor konveksinya yang lebih rendah



## 5.2 Saran

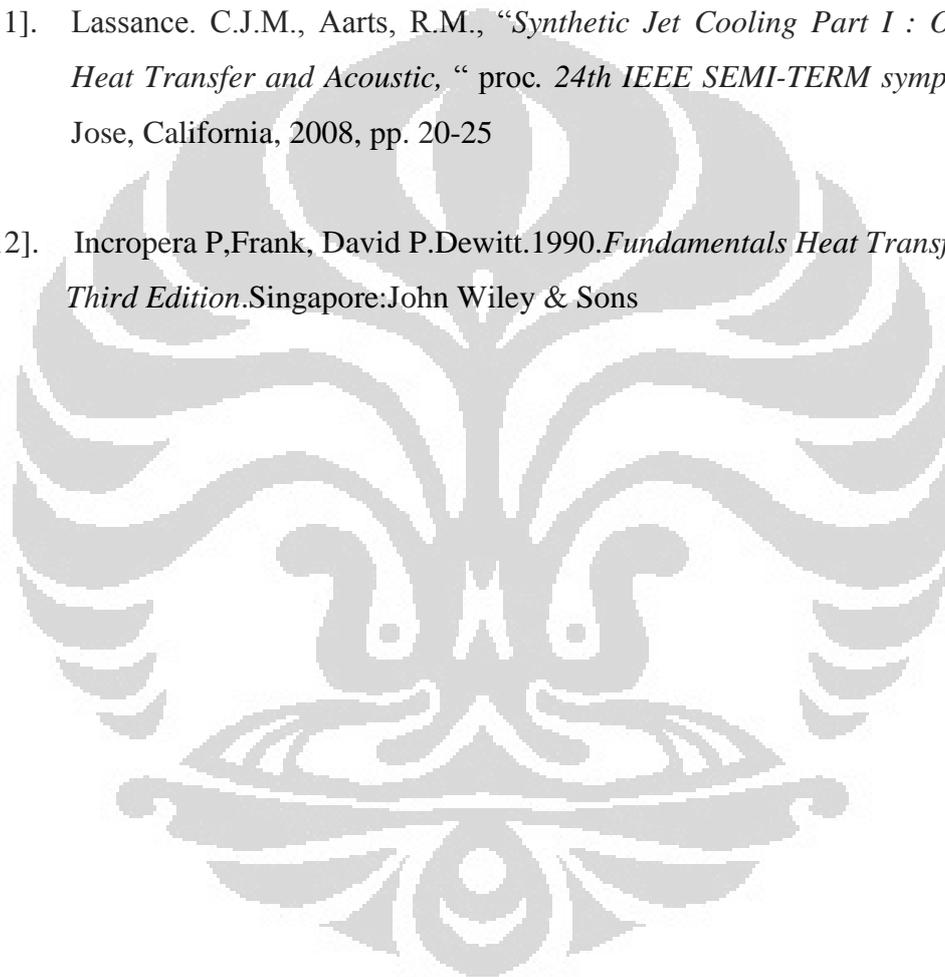
Untuk pencapaian hasil yang lebih optimal, perlu dilakukan penelitian yang lebih mendalam serta pengembangan penelitian mengenai *synthetic jet*, yaitu:

1. Studi lebih jauh mengenai efektivitas pendinginan jet sintetik terhadap bentuk geometri terutama dalam bentuk *cavity jet* serta dimensi dari jet sintetik itu sendiri.
2. Penelitian serta riset mengenai efek pendinginan dengan menggunakan jet sintetik jika jet ditembakkan pada jarak tertentu dari sumber panas.
3. Studi berkelanjutan yang bersifat paralel dengan penelitian ini dengan menggunakan jenis aliran jet yang berbeda, yakni bertipe *crossflow* untuk hasilnya dapat dibandingkan dengan tipe aliran *impinging*.
4. Kajian terhadap CFD yang harus lebih didalami karena dirasa masih banyak kekurangan pada bagian ini.
5. Penelitian terhadap efek pendinginan secara *vertical* oleh sintetik jet terhadap jenis heatsink yang menggunakan jenis aliran *impinging* agar dapat membandingkan pola pendinginan serta efek pendinginan agar dapat membandingkan pola pendinginan serta efek pendinginan *synthetic jet* baik secara *radial* maupun *vertical*.

## DAFTAR REFERENSI

- [1]. Bar-Cohen, A, “*Computer-related packaging at milenial divide.*” *Elektron. Cooling*, Vol 6 No. 1, pp. 32-40
- [2]. SIA, “*International Technology Roadmad for Semiconductors.*” *Technical report, semiconductors industries Association*, New York, 2001
- [3]. Timchenko, V., Rezes, J. “*A Numerical Study of Enhanced Micro-channel Cooling Using a Synthetic Jet Ejector*”, School of Mechanical and Manufacturing Engineering, The University of New South Wales, Sydney 2052, Australia;2004.
- [4]. Harinaldi, Damora, Rikko. “*flow and heat transfer characteristics of an impinging synthetic air jet under sinusoidal and triangular wave forces*”, *department of Mechanical Engineering University of Indonesia, kampus UI-Depok, Jawa Barat 116424, Indonesia.*
- [5]. Thompson, M.R., Denny, D.L., Black, W.Z, Hartley, J.G, and Glezer, A., “*cooling of microelectronic device using synthetic jet technology,*” *proc. 11<sup>th</sup> European Microelectronics conf.* Venice, Italy, 1992, pp. 326-366
- [6]. Russel, G.B., “*local and sistem level thermal management of a single level integrates module (SLIM) using synthetic jet,*” M.S thesis. Georgia inst. Technology, Atlanta, GA, 1999
- [7]. Mahalingam, R., and Glezer, A., “*An actively cooled heat sink integrated with synthetic jets,*” *proc. 35<sup>th</sup> national heat transfer conf.* Anaheim , CA, 2001
- [8]. Mahalingam, R., Rumigny, N., Glezer A., “*Thermal management using synthetic jet ejector,*” *IEEE trans. On Components and Packaging tech.* Vol. 27, No. 3 2004, pp.439-444

- [9]. King, S. J. C. And Jagannatha, D., “*Simulation of synthetic jets with non-sinusoidal forcing for heat transfer applications*”, *proc. 18th World IMACS / MODSIM Congress, Cairns Australia, 2009*
- [10]. Lassance, C.J.M. and Aarts, R.M., “*Synthetic Jet Cooling Using Asymmetric Acoustic Dipoles*,” *proc. 25<sup>th</sup> IEEE SEMI-TERM Symposium, San Jose, California. 2009. Pp. 253-261*
- [11]. Lassance. C.J.M., Aarts, R.M., “*Synthetic Jet Cooling Part I : Overview of Heat Transfer and Acoustic*,” *proc. 24th IEEE SEMI-TERM symposium. San Jose, California, 2008, pp. 20-25*
- [12]. Incropera P, Frank, David P. Dewitt. 1990. *Fundamentals Heat Transfer Third Edition*. Singapore: John Wiley & Sons



Data Temperatur *Synthetic Jet* dengan Fungsi Gelombang Sinusoidal - Square untuk berbagai kombinasi frekuensi tiap titik.

## Titik 1

Menit ke	Square-Square								
	Sinus 80Hz			Sinus 120 Hz			Sinus 160 Hz		
	Square 80 Hz	Square 120 Hz	Square 160 Hz	Square 80 Hz	Square 120 Hz	Square 160 Hz	Square 80 Hz	Square 120 Hz	Square 160 Hz
0	58.6	58.6	58.6	58.6	58.6	58.6	58.6	58.6	58.6
5	58.3	58.5	58.5	58.3	58.3	58.2	58.1	58.3	58.1
10	58.1	58.4	58.4	58.0	58.0	58.5	58.0	58.0	58.5
15	57.8	58.4	58.2	57.4	57.5	58.4	57.0	57.5	58.0
20	57.5	58.2	58.1	57.1	57.1	58.3	56.9	57.1	58.0
25	57.7	58.2	58.0	58.4	57.4	58.4	57.0	57.4	57.3
30	57.8	58.2	57.6	57.5	57.6	58.7	57.4	57.6	56.8
35	58.0	58.1	57.7	57.6	57.7	58.6	57.2	57.7	57.4
40	57.8	58.1	57.8	57.7	57.8	58.5	57.4	57.8	57.0
45	58.1	58.0	57.8	58.0	58.0	58.7	57.5	58.0	57.4
50	58.2	57.8	58.1	58.1	58.1	58.6	57.7	58.1	57.5
55	58.4	58.0	58.1	58.0	58.0	58.8	57.7	58.0	57.8
60	58.5	57.7	58.0	58.2	58.2	58.7	57.6	58.2	57.8

\*Catatan: Satuan temperatur dalam °C

Data Temperatur *Synthetic Jet* dengan Fungsi Gelombang Sinusoidal - Square untuk berbagai kombinasi frekuensi tiap titik.

## Titik 2

Menit ke	Sinus-Square								
	Sinus 80Hz			Sinus 120 Hz			Sinus 160 Hz		
	Square 80 Hz	Square 120 Hz	Square 160 Hz	Square 80 Hz	Square 120 Hz	Square 160 Hz	Square 80 Hz	Square 120 Hz	Square 160 Hz
0	58.6	58.6	58.6	58.6	58.6	58.6	58.6	58.6	58.6
5	58.4	58.5	58.4	58.4	58.5	58.6	58.5	58.1	58.2
10	58.1	58.5	58.3	58.3	58.3	58.4	58.3	58.0	58.5
15	58.1	58.2	58.0	58.0	57.0	57.1	57.0	57.0	58.0
20	57.5	58.2	58.0	58.0	57.2	57.1	57.1	56.9	58.0
25	58.0	58.2	57.9	57.9	57.4	57.5	57.4	57.0	57.3
30	58.0	58.0	57.6	57.6	57.4	57.5	57.4	57.4	56.9
35	58.1	58.1	57.7	57.7	57.6	57.7	57.6	57.1	57.4
40	58.1	58.2	57.5	57.5	57.7	57.6	57.7	57.4	57.0
45	58.1	58.1	57.6	57.6	57.9	58.0	57.9	57.5	57.4
50	58.2	58.1	57.9	57.9	58.0	58.1	58.0	57.7	57.5
55	58.4	57.8	58.0	58.0	57.9	58.0	57.9	57.7	57.8
60	58.4	57.8	57.9	57.9	58.1	58.0	58.1	57.6	57.8

\*Catatan: Satuan temperatur dalam °C

Data Temperatur *Synthetic Jet* dengan Fungsi Gelombang Sinusoidal - Square untuk berbagai kombinasi frekuensi tiap titik.

## Titik 3

	Sinus-Square								
	Sinus 80Hz			Sinus 120 Hz			Sinus 160 Hz		
	Square 80 Hz	Square 120 Hz	Square 160 Hz	Square 80 Hz	Square 120 Hz	Square 160 Hz	Square 80 Hz	Square 120 Hz	Square 160 Hz
Menit ke									
0	58.6	58.6	58.6	58.6	58.6	58.6	58.6	58.6	58.6
5	58.3	58.4	58.4	57.6	58.4	58.2	58.1	58.4	58.1
10	58.1	58.3	58.4	57.1	57.4	58.5	58.0	58.5	58.5
15	57.8	58.3	58.2	56.7	57.5	58.4	57.0	57.5	58.0
20	57.5	57.8	58.2	56.4	57.0	58.3	56.8	57.0	58.0
25	57.7	57.8	58.0	56.3	57.4	58.4	57.0	57.4	57.2
30	57.8	57.6	58.0	56.3	57.6	58.7	57.4	57.6	57.0
35	58.0	58.0	57.7	56.7	57.6	58.6	57.2	57.6	57.4
40	57.8	57.8	57.8	56.5	57.6	58.5	57.4	57.6	57.0
45	58.1	57.8	57.8	56.6	58.0	58.7	57.5	58.0	57.4
50	58.2	57.7	58.1	57.1	58.2	58.6	57.7	58.2	57.5
55	58.4	57.8	58.2	57.0	58.1	58.8	57.7	58.1	57.8
60	58.5	57.6	58.2	57.2	58.2	58.6	57.6	58.2	57.8

\*Catatan: Satuan temperatur dalam °C

Data Temperatur *Synthetic Jet* dengan Fungsi Gelombang Sinusoidal - Square untuk berbagai kombinasi frekuensi tiap titik.

## Titik 4

Menit ke	Sinus-square								
	Sinus 80 Hz			Sinus 120 Hz			Sinus 160 Hz		
	square 80 Hz	square 120 Hz	square 160 Hz	square 80 Hz	square 120 Hz	square 160 Hz	square 80 Hz	square 120 Hz	square 160 Hz
0	58.6	58.6	58.6	58.6	58.6	58.6	58.6	58.6	58.6
5	58.3	58.4	58.4	57.9	58.6	58.2	58.1	58.1	58.1
10	58.4	58.3	58.3	57.5	58.0	58.5	58.0	58.1	58.5
15	58.1	58.4	58.1	57.1	57.5	58.4	57.1	57.9	58
20	57.8	58.1	58.0	56.8	57.2	58.3	56.9	57.7	58
25	58.2	58.0	58.1	56.6	57.0	58.4	57.1	57.3	57.3
30	58.3	57.9	58.0	56.7	56.7	58.7	57.4	57.1	56.9
35	58.3	58.0	58.1	57.1	56.9	58.6	57.2	56.9	57.4
40	58.4	57.8	58.1	56.9	57.1	58.5	57.4	57.5	57.1
45	58.4	58.1	58.2	57.0	57.4	58.7	57.5	57.4	57.4
50	58.4	58.1	58.2	57.2	57.6	58.6	57.7	57.2	57.5
55	58.3	58.1	58.4	57.3	57.7	58.8	57.7	57.1	57.8
60	58.3	58.2	58.3	57.1	58.0	58.9	57.6	57.3	57.8

\*Catatan: Satuan temperatur dalam °C

Data Temperatur *Synthetic Jet* dengan Fungsi Gelombang Sinusoidal - Square untuk berbagai kombinasi frekuensi tiap titik.

## Titik 5

Menit ke	Sinus-Square								
	sin 80			sin 120			sin 160		
	square 80 Hz	square 120 Hz	square 160 Hz	square 80 Hz	square 120 Hz	square 160 Hz	square 80 Hz	square 120 Hz	square 160 Hz
0	58.6	58.6	58.6	58.6	58.6	58.6	58.6	58.6	58.6
5	58.3	58.0	58.5	57.9	58.3	58.2	58.1	58.3	58.1
10	58.1	57.8	58.6	57.5	58.0	58.5	58.0	58.0	58.5
15	57.9	57.8	58.3	57.1	57.5	58.4	57.6	57.5	58.0
20	57.5	57.6	58.0	56.7	57.2	58.3	57.3	57.2	58.0
25	57.7	57.5	58.0	56.5	57.4	58.4	57.2	57.4	57.3
30	57.9	57.4	58.2	56.6	57.6	58.7	57.4	57.6	57.2
35	58.0	57.5	58.1	57.1	57.7	58.6	57.2	57.7	57.4
40	57.9	57.3	58.3	56.9	57.8	58.5	57.4	57.8	57.1
45	58.1	57.3	58.5	57.0	58.0	58.7	57.5	58.0	57.4
50	58.2	57.5	58.4	57.5	58.1	58.6	57.7	58.1	57.5
55	58.4	57.5	58.3	57.4	58.0	58.6	57.7	58.0	58.6
60	58.5	57.4	58.3	57.6	58.2	58.5	57.6	58.2	58.5

\*Catatan: Satuan temperatur dalam °C

Data Temperatur *Synthetic Jet* dengan Fungsi Gelombang Sinusoidal - Square untuk berbagai kombinasi frekuensi tiap titik.

## Titik 6

Menit ke	Sinus-Square								
		Sinus 80Hz			Sinus 120 Hz			Sinus 160 Hz	
	Square 80 Hz	Square 120 Hz	Square 160 Hz	Square 80 Hz	Square 120 Hz	Square 160 Hz	Square 80 Hz	Square 120 Hz	Square 160 Hz
0	58.6	58.6	58.6	58.6	58.6	58.6	58.6	58.6	58.6
5	58.3	58.0	58.5	57.9	58.3	58.2	58.1	58.3	58.1
10	58.1	57.8	58.6	57.5	58.0	58.5	58.0	58.0	58.5
15	57.9	57.8	58.3	57.1	57.5	58.4	57.6	57.5	58.0
20	57.5	57.6	58.0	56.7	57.2	58.3	57.3	57.2	58.0
25	57.7	57.5	58.0	56.5	57.4	58.4	57.2	57.4	57.3
30	57.9	57.4	58.2	56.6	57.6	58.7	57.4	57.6	57.2
35	58.0	57.5	58.1	57.1	57.7	58.6	57.2	57.7	57.4
40	57.9	57.3	58.3	56.9	57.8	58.5	57.4	57.8	57.1
45	58.1	57.3	58.5	57.0	58.0	58.7	57.5	58.0	57.4
50	58.2	57.5	58.4	57.5	58.1	58.6	57.7	58.1	57.5
55	58.4	57.5	58.3	57.4	58.0	58.6	57.7	58.0	58.6
60	58.5	57.4	58.3	57.6	58.2	58.5	57.6	58.2	58.5

\*Catatan: Satuan temperatur dalam °C

Data *Heat Transfer Coefficient Synthetic Jet* dengan Fungsi Gelombang Sinusoidal – square untuk berbagai kombinasi tiap titik.

## Titik 1

Sinus-square									
Heat transfer coefficient									
	Sin 80			Sin 120			Sin 160		
Menit ke-	80 Hz sin	120 Hz sin	160 Hz sin	80 Hz sin	120 Hz sin	160 Hz sin	80 Hz sin	120 Hz sin	160 Hz sin
0	21.88	21.88	21.88	21.88	21.88	21.88	21.88	21.88	21.88
5	22.16	21.97	21.97	22.16	22.16	22.25	22.35	22.16	22.35
10	22.35	22.06	22.06	22.44	22.44	21.97	22.44	22.44	21.97
15	22.64	22.06	22.25	23.03	22.93	22.06	23.44	22.93	22.44
20	22.93	22.25	22.35	23.33	23.33	22.16	23.54	23.33	22.44
25	22.73	22.25	22.44	22.06	23.03	22.06	23.44	23.03	23.13
30	22.64	22.25	22.83	22.93	22.83	21.78	23.03	22.83	23.64
35	22.44	22.35	22.73	22.83	22.73	21.88	23.23	22.73	23.03
40	22.64	22.35	22.64	22.73	22.64	21.97	23.03	22.64	23.44
45	22.35	22.44	22.64	22.44	22.44	21.78	22.93	22.44	23.03
50	22.25	22.64	22.35	22.35	22.35	21.88	22.73	22.35	22.93
55	22.06	22.44	22.35	22.44	22.44	21.69	22.73	22.44	22.64
60	21.97	22.73	22.44	22.25	22.25	21.78	22.83	22.25	22.64

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

Data *Heat Transfer Coefficient Synthetic Jet* dengan Fungsi Gelombang Sinusoidal – square untuk berbagai kombinasi tiap titik.

## Titik 2

Sinus-square									
Heat transfer coefficient									
	Sin 80			Sin 120			Sin 160		
Menit ke-	80 Hz sin	120 Hz sin	160 Hz sin	80 Hz sin	120 Hz sin	160 Hz sin	80 Hz sin	120 Hz sin	160 Hz sin
0	21.88	21.88	21.88	21.88	21.88	21.88	21.88	21.88	21.88
5	22.06	21.97	22.06	22.06	21.97	21.88	21.97	22.35	22.25
10	22.35	21.97	22.16	22.16	22.16	22.06	22.16	22.44	21.97
15	22.35	22.25	22.44	22.44	23.44	23.33	23.44	23.44	22.44
20	22.93	22.25	22.44	22.44	23.23	23.33	23.33	23.54	22.44
25	22.44	22.25	22.54	22.54	23.03	22.93	23.03	23.44	23.13
30	22.44	22.44	22.83	22.83	23.03	22.93	23.03	23.03	23.54
35	22.35	22.35	22.73	22.73	22.83	22.73	22.83	23.33	23.03
40	22.35	22.25	22.93	22.93	22.73	22.83	22.73	23.03	23.44
45	22.35	22.35	22.83	22.83	22.54	22.44	22.54	22.93	23.03
50	22.25	22.35	22.54	22.54	22.44	22.35	22.44	22.73	22.93
55	22.06	22.64	22.44	22.44	22.54	22.44	22.54	22.73	22.64
60	22.06	22.64	22.54	22.54	22.35	22.44	22.35	22.83	22.64

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

Data *Heat Transfer Coefficient Synthetic Jet* dengan Fungsi Gelombang Sinusoidal – square untuk berbagai kombinasi tiap titik.

## Titik 3

Sinus-square									
Heat transfer coefficient									
	Sin 80			Sin 120			Sin 160		
Menit ke-	80 Hz sin	120 Hz sin	160 Hz sin	80 Hz sin	120 Hz sin	160 Hz sin	80 Hz sin	120 Hz sin	160 Hz sin
0	21.88	21.88	21.88	21.88	21.88	21.88	21.88	21.88	21.88
5	22.16	22.06	22.06	22.83	22.06	22.25	22.35	22.06	22.35
10	22.35	22.16	22.06	23.33	23.03	21.97	22.44	21.97	21.97
15	22.64	22.16	22.25	23.75	22.93	22.06	23.44	22.93	22.44
20	22.93	22.64	22.25	24.07	23.44	22.16	23.64	23.44	22.44
25	22.73	22.64	22.44	24.17	23.03	22.06	23.44	23.03	23.23
30	22.64	22.83	22.44	24.17	22.83	21.78	23.03	22.83	23.44
35	22.44	22.44	22.73	23.75	22.83	21.88	23.23	22.83	23.03
40	22.64	22.64	22.64	23.96	22.83	21.97	23.03	22.83	23.44
45	22.35	22.64	22.64	23.85	22.44	21.78	22.93	22.44	23.03
50	22.25	22.73	22.35	23.33	22.25	21.88	22.73	22.25	22.93
55	22.06	22.64	22.25	23.44	22.35	21.69	22.73	22.35	22.64
60	21.97	22.83	22.25	23.23	22.25	21.88	22.83	22.25	22.64

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

Data *Heat Transfer Coefficient Synthetic Jet* dengan Fungsi Gelombang Sinusoidal – square untuk berbagai kombinasi tiap titik.

## Titik 4

Sinus-square									
Heat transfer coefficient									
	Sin 80			Sin 120			Sin 160		
Menit ke-	80 Hz sin	120 Hz sin	160 Hz sin	80 Hz sin	120 Hz sin	160 Hz sin	80 Hz sin	120 Hz sin	160 Hz sin
0	21.88	21.88	21.88	21.88	21.88	21.88	21.88	21.88	21.88
5	22.16	22.44	21.97	22.54	22.16	22.25	22.35	22.16	22.35
10	22.35	22.64	21.88	22.93	22.44	21.97	22.44	22.44	21.97
15	22.54	22.64	22.16	23.33	22.93	22.06	22.83	22.93	22.44
20	22.93	22.83	22.44	23.75	23.23	22.16	23.13	23.23	22.44
25	22.73	22.93	22.44	23.96	23.03	22.06	23.23	23.03	23.13
30	22.54	23.03	22.25	23.85	22.83	21.78	23.03	22.83	23.23
35	22.44	22.93	22.35	23.33	22.73	21.88	23.23	22.73	23.03
40	22.54	23.13	22.16	23.54	22.64	21.97	23.03	22.64	23.33
45	22.35	23.13	21.97	23.44	22.44	21.78	22.93	22.44	23.03
50	22.25	22.93	22.06	22.93	22.35	21.88	22.73	22.35	22.93
55	22.06	22.93	22.16	23.03	22.44	21.88	22.73	22.44	21.88
60	21.97	23.03	22.16	22.83	22.25	21.97	22.83	22.25	21.97

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

Data *Heat Transfer Coefficient Synthetic Jet* dengan Fungsi Gelombang Sinusoidal – square untuk berbagai kombinasi tiap titik.

## Titik 5

Sinus-square									
Heat transfer coefficient									
	sin 80			Sin 120			Sin 160		
Menit ke-	80 Hz sin	120 Hz sin	160 Hz sin	80 Hz sin	120 Hz sin	160 Hz sin	80 Hz sin	120 Hz sin	160 Hz sin
0	21.88	21.88	21.88	21.88	21.88	21.88	21.88	21.88	21.88
5	22.16	22.44	21.97	22.54	22.16	22.25	22.35	22.16	22.35
10	22.35	22.64	21.88	22.93	22.44	21.97	22.44	22.44	21.97
15	22.54	22.64	22.16	23.33	22.93	22.06	22.83	22.93	22.44
20	22.93	22.83	22.44	23.75	23.23	22.16	23.13	23.23	22.44
25	22.73	22.93	22.44	23.96	23.03	22.06	23.23	23.03	23.13
30	22.54	23.03	22.25	23.85	22.83	21.78	23.03	22.83	23.23
35	22.44	22.93	22.35	23.33	22.73	21.88	23.23	22.73	23.03
40	22.54	23.13	22.16	23.54	22.64	21.97	23.03	22.64	23.33
45	22.35	23.13	21.97	23.44	22.44	21.78	22.93	22.44	23.03
50	22.25	22.93	22.06	22.93	22.35	21.88	22.73	22.35	22.93
55	22.06	22.93	22.16	23.03	22.44	21.88	22.73	22.44	21.88
60	21.97	23.03	22.16	22.83	22.25	21.97	22.83	22.25	21.97

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

Data *Heat Transfer Coefficient Synthetic Jet* dengan Fungsi Gelombang Sinusoidal – square untuk berbagai kombinasi tiap titik.

## Titik 6

Sinus-square									
Heat transfer coefficient									
	Sin 80			Sin 120			Sin 160		
Menit ke-	80 Hz sin	120 Hz sin	160 Hz sin	80 Hz sin	120 Hz sin	160 Hz sin	80 Hz sin	120 Hz sin	160 Hz sin
0	21.88	21.88	21.88	21.88	21.88	21.88	21.88	21.88	21.88
5	22.16	22.06	22.06	22.54	21.88	22.25	22.35	22.35	22.35
10	22.06	22.16	22.16	22.93	22.44	21.97	22.44	22.35	21.97
15	22.35	22.06	22.35	23.33	22.93	22.06	23.33	22.54	22.44
20	22.64	22.35	22.44	23.64	23.23	22.16	23.54	22.73	22.44
25	22.25	22.44	22.35	23.85	23.44	22.06	23.33	23.13	23.13
30	22.16	22.54	22.44	23.75	23.75	21.78	23.03	23.33	23.54
35	22.16	22.44	22.35	23.33	23.54	21.88	23.23	23.54	23.03
40	22.06	22.64	22.35	23.54	23.33	21.97	23.03	22.93	23.33
45	22.06	22.35	22.25	23.44	23.03	21.78	22.93	23.03	23.03
50	22.06	22.35	22.25	22.93	22.83	21.88	22.73	23.23	22.93
55	22.16	22.35	22.06	23.03	22.73	21.69	22.73	23.33	22.64
60	22.16	22.25	22.16	22.83	22.44	21.60	22.83	23.13	22.64

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