



UNIVERSITAS INDONESIA

**KARAKTERISTIK ALIRAN DAN PERPINDAHAN PANAS
PADA JET SINTETIK DENGAN VARIASI FREKUENSI
GELOMBANG SINUSOIDAL DAN SEGIEMPAT**

SKRIPSI

**CHRISTOFORUS DEBERLAND SITUNGKIR
0806329905**

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



UNIVERSITAS INDONESIA

**KARAKTERISTIK ALIRAN DAN PERPINDAHAN PANAS
PADA JET SINTETIK DENGAN VARIASI FREKUENSI
GELOMBANG SINUSOIDAL DAN SEGIEMPAT**

SKRIPSI

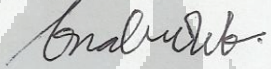
Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

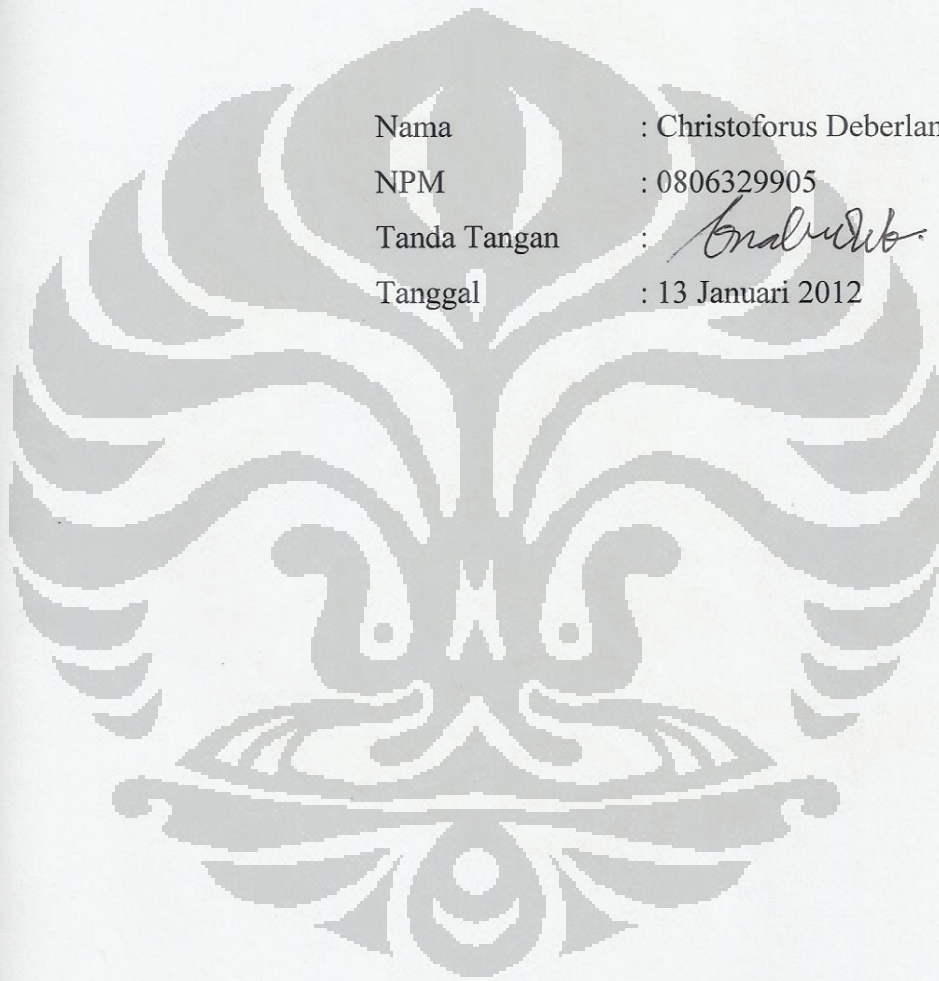
**CHRISTOFORUS DEBERLAND SITUNGKIR
0806329905**

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

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Christoforus Deberland S
NPM : 0806329905
Tanda Tangan : 
Tanggal : 13 Januari 2012



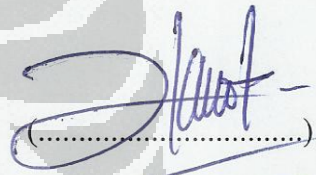
HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Christoforus Deberland S
NPM : 0806329905
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Skripsi : **Karakteristik Aliran dan Perpindahan Panas pada Jet Sintetik dengan Variasi Frekuensi Gelombang Sinusoidal 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



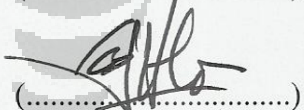
(.....)

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



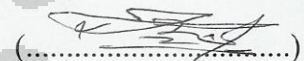
(.....)

Penguji : Ir. Warjito, M.Sc, Ph.D



(.....)

Penguji : Dr.Ir.Engkos A Kosasih,MT



(.....)

Ditetapkan di : Depok (Universitas Indonesia)

Tanggal : 13 Januari 2012

UCAPAN TERIMA KASIH

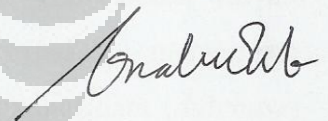
Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yesus, karena atas Kasih dan Karunia-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Mesin pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Dalam penulisan 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, dosen Pembimbing Skripsi dan Pembimbing Akademis selama 6 (enam) semester sekaligus Kepala Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia atas segala waktu, tenaga dan kesabaran dalam membimbing dan mengarahkan dari awal sampai akhir pembuatan skripsi ini.
2. Mama-ku tercinta Urasni Silitonga , Bapa-ku tersayang Edison Situngkir, dan adik-adikku di rumah Aloysius Unsal Pancamotan dan Maria Bernadeth S R serta keluarga yang telah memberikan doa dan dukungannya kepada saya untuk tetap semangat.
3. Dosen – dosen DTM FTUI yang telah mengajar saya dari awal perkuliahan hingga penulisan skripsi ini, terutama Prof I Made Kartika Dhiputra, Prof Raldi Artono Koestoer, Prof Bambang Sugiarto, Prof Nandy Putra, Pak Hendri DS Budiono, Pak Engkos Kosasih, Pak Warjito, dan Pak Danardono yang banyak memberikan inspirasi kepada saya selama kuliah.
4. Damora Rhakasywi ST., M.T dan Rikko Defriadi ST. Selaku mahasiswa S3 dan S2 yang telah memberikan banyak ilmu dan pengalamannya dalam pembuatan alat pengujian skripsi.
5. Hannah Marron Glorya. Sebagai teman wanita terkasih yang membantu saya dengan doa dan semangat.
6. Arief Randy Wicaksono. Sebagai rekan satu tim yang selalu bersemangat, kreatif dan aktif untuk mengerjakan skripsi ini hingga nantinya dilanjutkan ke thesis S2.

7. Zein Hamid, salah satu sahabat terbaik di kampus yang telah membantu dan memberikan semangat dan dorongan selama 7 semester kuliah. “*Buktikan skripsi anda selesai Februari 2012!* “
8. Rio Wirawan , Retsa Anugrah, Ashar Okta, Rachmi Satarsyah, Hudi Wibowo, Edwin Dwi Novianto, Aditya Primaperkasa, dan Muhamad Yudha. Kumpulan Sahabat terbaik selama kuliah yang telah membantu, menemani, dan menghibur saya sehingga akhirnya saya bisa menyelesaikan tugas akhir di semester 7.
9. Teman – teman lab mekanika fluida dan lab pendingin yang banyak memberikan bantuan, saran dan motivasinya dalam mengerjakan skripsi.
10. Teman – teman teknik mesin 2008 yang telah berkontribusi membantu dan mendukung skripsi ini.
11. 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, 13 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 : Christoforus Deberland S

NPM : 0806329905

Program Studi : Teknik Mesin

Departemen : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

Jenis karya : Skripsi

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

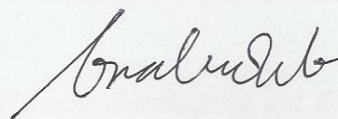
KARAKTERISTIK ALIRAN DAN PERPINDAHAN PANAS PADA JET SINTETIK DENGAN VARIASI FREKUENSI GELOMBANG SINUSOIDAL DAN SEGIEMPAT

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

Dibuat di : Depok (Universitas Indonesia)

Pada tanggal : 13 Januari 2012

Yang menyatakan



(Christoforus Deberland S)

ABSTRAK

Nama : Christoforus Deberland S
Program Studi : Teknik Mesin
Judul : **Karakteristik Aliran dan Perpindahan Panas pada Jet Sintetik dengan Variasi Frekuensi Gelombang Sinusoidal dan Segiempat**

Dalam teknologi yang berkembang cepat, dikarenakan pengoperasian yang lebih cepat dari tiap transistor dan densitas dari IC yang tinggi, piranti mikroelektronik membutuhkan disipasi panas yang tinggi pula.. Beban panas yang semakin besar akibat miniaturisasi produk elektronik menyebabkan diperlukannya sistem pendingin baru yang lebih efisien atau mempunyai efisiensi termal yang tinggi. Penelitian ini akan membahas karakteristik aliran dan perpindahan panas konveksi pada *impinging* jet sintetik yang akan diosilasikan dengan menggunakan gelombang kombinasi persegi-sinusoidal. Penelitian ini dilakukan dalam dua tahapan yaitu tahap komputasional dan eksperimental.

Tahap komputasional pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan software *CFD Fluent* dengan model turbulensi *k- ω SST* dengan elemen *meshing* Tet/Hybrid tipe Tgrid untuk melihat distribusi aliran pada jet sintetik, sedangkan pada tahap eksperimental akan dilihat karakteristik perpindahan panas konveksi dengan menggerakkan membran jet sintetik pada gelombang kombinasi persegi-sinusoidal dengan variasi frekuensi square pada membran atas-bawah *square* 80 Hz-Sinus 80 Hz, *square* 80 Hz-Sinus 120 Hz, *square* 80 Hz-Sinus 160 Hz, *square* 120 Hz-Sinus 80 Hz, *square* 120 Hz-Sinus 120 Hz, *square* 120 Hz-Sinus 160 Hz, *square* 160 Hz-Sinus 80 Hz, *square* 160 Hz-Sinus 120 Hz, *square* 160 Hz-Sinus 160 Hz dengan menggunakan *function generator*. Hasil penelitian menunjukkan adanya pengaruh gelombang dan frekuensi yang signifikan terhadap laju perpindahan panas yang didapat. Pada penelitian ini juga dibuktikan bahwa bilangan *Reynolds* tidak berpengaruh terhadap laju perpindahan panas pada jet sintetik.

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

ABSTRACT

Name : Christoforus Deberland S
Study Program : Mechanical Engineering
Title : **Characteristics of Flow and Heat Transfer of a Synthetic Jet with Frequency Variation of Sinusoidal and Square Wave Forcing**

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

Computational stage was conducted by Fluent CFD software with turbulence model of $k-\omega$ SST with meshing elements Tet / Hybrid Tgrid type to see the flow distribution in synthetic jet. In the experimental phase, it will be seen the characteristics of convective heat transfer by moving the synthetic jet membrane using combination of square-sinusoidal wave with a variation frequency of upper-lower membrane by square80 Hz-sine80 Hz, square80 Hz-sine120 Hz, square80 Hz-sine160 Hz, square120 Hz-sine80 Hz, square120 Hz-sine120 Hz, square120 Hz-sine160 Hz, square160 Hz-sine80 Hz, square160 Hz-sine120 Hz, square160 Hz-sine160 Hz using a function generator. The results showed the significant influence of waves mode and frequencies to the heat transfer rate that obtained. In this research, result that reynolds number is not significantly influence heat transfer rate of synthetic jet.

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

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
UCAPAN TERIMA KASIH.....	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	vi
ABSTRAK.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiv
DAFTAR NOTASI.....	xv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvi
BAB 1. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Pembatasan Masalah.....	1
1.3 Metodologi.....	2
1.4 Tujuan Penelitian.....	2
1.5 Sistematika Penulisan.....	3
BAB 2. DASAR TEORI.....	4
2.1 Jet Sintetik.....	4
2.2 Gelombang.....	8
2.3 Perpindahan Kalor.....	13
2.3.1 Perpindahan Kalor Konduksi.....	13
2.3.2 Perpindahan Kalor Konveksi.....	14
2.3.3 Perpindahan Kalor Radiasi.....	15
2.4 Aliran Fluida.....	16
2.4.1 Aliran Laminar.....	16
2.4.2 Aliran Transisi.....	16
2.4.3 Aliran Turbulen.....	17
2.5 CFD Fluent.....	18

2.5.1 Gambit	18
2.5.2 Fluent	19
BAB 3. SISTEM PENDINGINAN DENGAN JET SINTETIK.....	22
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	22
3.2 Modul Jet Sintetik.....	23
3.3 Tahap Komputasional.....	24
3.4 Tahap Eksperimen	25
3.4.1 Komponen dan Peralatan Tambahan	29
3.4.2 Prosedur Pengambilan Data.....	30
BAB 4. ANALISA DATA	33
4.1 Analisa Data Komputasional.....	33
4.1.1 <i>Turbulent Intensity Contours</i>	43
4.1.2 <i>Vorticity Contours</i>	53
4.2 Analisa Data Eksperimental	63
4.2.1 Analisa Perubahan Temperatur terhadap Waktu	63
4.2.2 Analisa Koefisien Perpindahan Panas Konveksi terhadap Waktu	81
4.3 TingkatKepercayaan (<i>Level of Confidence</i>) dan Persentase Error Pengukuran Penelitian	90
BAB 5. KESIMPULAN	93
5.1 Kesimpulan.....	93
5.2 Saran	94
DAFTAR REFERENSI.....	96

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Sketsa Synthetic jet	4
Gambar 2.2	Model <i>Impinging Jet</i>	6
Gambar 2.3	Model <i>Cross-Flow Jet</i>	6
Gambar 2.4	Gelombang yang merambat pada sebuah tali.....	8
Gambar 2.5	Gelombang Transversal.....	9
Gambar 2.6	Gelombang Longitudinal.....	10
Gambar 2.7	Gelombang satu dimensi yang berjalan ke arah kanan dengan kecepatan v pada $t=0$	10
Gambar 2.8	Gelombang satu dimensi yang berjalan ke arah kanan dengan kecepatan v setelah berjalan selama t detik.....	11
Gambar 2.9	Gelombang sinusoidal yang berjalan ke arah kanan dengan kecepatan v	12
Gambar 2.10	Skematik perpindahan kalor konveksi.....	14
Gambar 2.11	Aliran Laminar.....	16
Gambar 2.12	Aliran Turbulen.....	17
Gambar 2.13	Skematik proses kerja step by step <i>Gambit-CFD</i>	18
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian.....	22
Gambar 3.2	Model fisik <i>synthetic jet</i>	23
Gambar 3.3	Gambaran daerah komputasi jet sintetik.....	24
Gambar 3.4	<i>Experimental setup</i>	26
Gambar 3.5	<i>Thermostat</i>	26
Gambar 3.6	<i>Heater Mat</i>	27
Gambar 3.7	Jet sintetik tampak atas dan tampak bawah.....	27
Gambar 3.8	Digital multimeter.....	28
Gambar 3.9	<i>Heat sink</i>	29
Gambar 3.10	<i>Function Generator</i>	29

Gambar 3.11 Komputer.....	30
Gambar 3.12 <i>Thermocouple</i>	31
Gambar 3.13 <i>Glue Gun</i>	31
Gambar 3.14 <i>Hygrometer</i>	32
Gambar 4.1 <i>Gelombang Square 80Hz-Sinus 80Hz</i>	34
Gambar 4.2 <i>Gelombang Square 80Hz-Sinus 120Hz</i>	35
Gambar 4.3 <i>Gelombang Square 80Hz-Sinus 160Hz</i>	36
Gambar 4.4 <i>Gelombang Square 120Hz-Sinus 80Hz</i>	37
Gambar 4.5 <i>Gelombang Square 120Hz-Sinus 120Hz</i>	38
Gambar 4.6 <i>Gelombang Square 120Hz-Sinus 160Hz</i>	39
Gambar 4.7 <i>Gelombang Square 160Hz-Sinus 80Hz</i>	40
Gambar 4.8 <i>Gelombang Square 160Hz-Sinus 120Hz</i>	41
Gambar 4.9 <i>Gelombang Square 160Hz-Sinus 160Hz</i>	42
Gambar 4.10 <i>Frame simulasi CFD untuk kontur temperatur statik variasi Square 80 Hz – sinus 80 Hz selama 3/40 s</i>	43
Gambar 4.11 <i>Frame simulasi CFD untuk kontur temperatur statik variasi Square 80 Hz – sinus 120 Hz selama 3/40 s</i>	45
Gambar 4.12 <i>Frame simulasi CFD untuk kontur temperatur statik variasi Square 80 Hz – sinus 160 Hz selama 3/40 s</i>	46
Gambar 4.13 <i>Frame simulasi CFD untuk kontur temperatur statik variasi Square 120 Hz – sinus 80 Hz selama 3/40 s</i>	47
Gambar 4.14 <i>Frame simulasi CFD untuk kontur temperatur statik variasi Square 120 Hz – sinus 120 Hz selama 3/40 s</i>	47
Gambar 4.15 <i>Frame simulasi CFD untuk kontur temperatur statik variasi Square 120 Hz – sinus 160 Hz selama 3/40 s</i>	49
Gambar 4.16 <i>Frame simulasi CFD untuk kontur temperatur statik variasi Square 160 Hz – sinus 80 Hz selama 3/40 s</i>	51
Gambar 4.17 <i>Frame simulasi CFD untuk kontur temperatur statik variasi Square 160 Hz – sinus 120 Hz selama 3/40 s</i>	52

Gambar 4.18 <i>Frame</i> simulasi CFD untuk kontur temperatur statik variasi <i>Square</i> 160 Hz – sinus 160 Hz selama 3/40 s	52
Gambar 4.19 <i>Frame</i> simulasi CFD untuk vektor temperatur variasi <i>Square</i> 80 Hz – sinus 80 Hz selama 3/40 s	53
Gambar 4.20 <i>Frame</i> simulasi CFD untuk vektor temperatur variasi <i>Square</i> 80 Hz – sinus 120 Hz selama 3/40 s	55
Gambar 4.21 <i>Frame</i> simulasi CFD untuk vektor temperatur variasi <i>Square</i> 80 Hz – sinus 160 Hz selama 3/40 s	56
Gambar 4.22 <i>Frame</i> simulasi CFD untuk vektor temperatur variasi <i>Square</i> 120 Hz – sinus 80 Hz selama 3/40 s	56
Gambar 4.23 <i>Frame</i> simulasi CFD untuk vektor temperatur variasi <i>Square</i> 120 Hz – sinus 120 Hz selama 3/40 s	58
Gambar 4.24 <i>Frame</i> simulasi CFD untuk vektor temperatur variasi <i>Square</i> 120 Hz – sinus 160 Hz selama 3/40 s	59
Gambar 4.25 <i>Frame</i> simulasi CFD untuk vektor temperatur variasi <i>Square</i> 160 Hz – sinus 80 Hz selama 3/40 s	59
Gambar 4.26 <i>Frame</i> simulasi CFD untuk vektor temperatur variasi <i>Square</i> 160 Hz – sinus 120 Hz selama 3/40 s	61
Gambar 4.27 <i>Frame</i> simulasi CFD untuk vektor temperatur variasi <i>Square</i> 160 Hz – sinus 160 Hz selama 3/40 s	62

DAFTAR TABEL

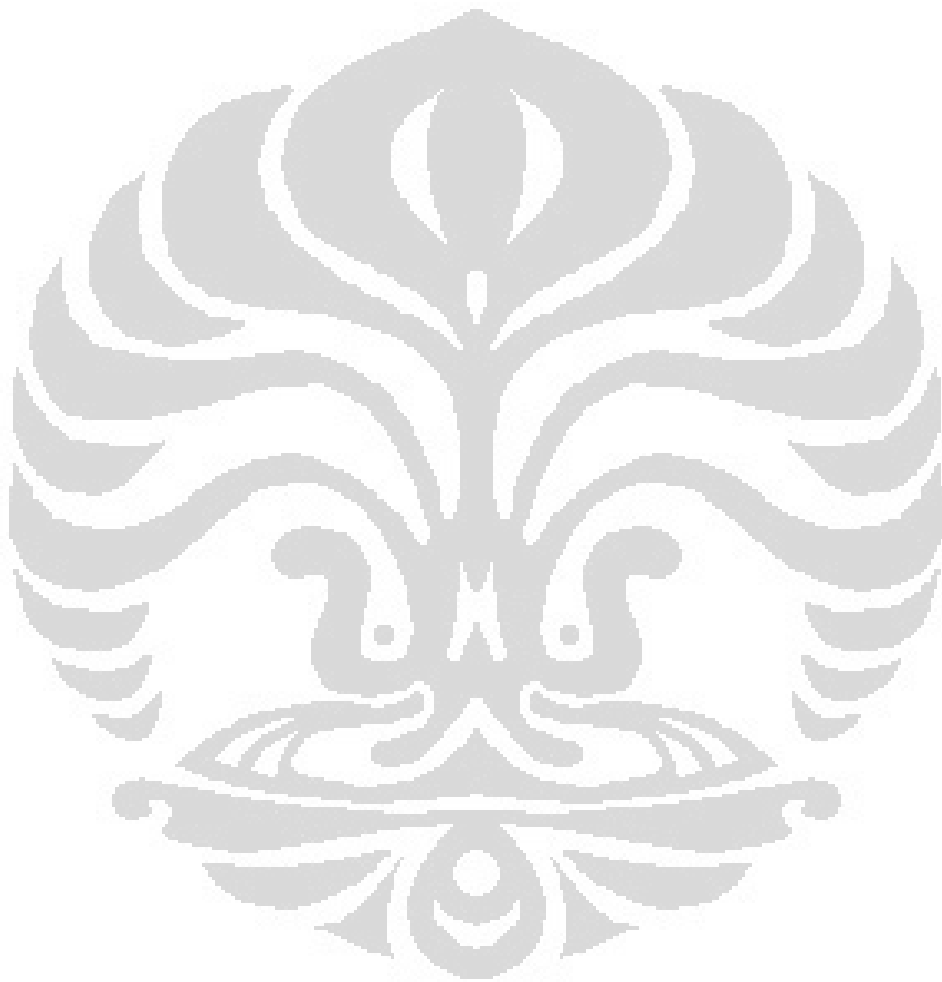
Tabel 4.1 <i>Turbulent Intensity Contours</i> pada frekuensi membran atas 80 Hz	44
Tabel 4.2 <i>Turbulent Intensity Contours</i> pada frekuensi membran atas 120 Hz	48
Tabel 4.3 <i>Turbulent Intensity Contours</i> pada frekuensi membran atas 160 Hz	50
Tabel 4.4 <i>Vorticity Contours</i> pada frekuensi membran atas 80 Hz	54
Tabel 4.5 <i>Vorticity Contours</i> pada frekuensi membran atas 120 Hz	57
Tabel 4.6 <i>Vorticity Contours</i> pada frekuensi membran atas 160 Hz	60
Tabel 4.7 tabel Varian Analisis (ANOVA) dari titik-titik termokopel pengukuran suhu.....	66
Tabel 4.8 tabel tingkat kepercayaan pengukuran suhu ditinjau dari alat ukur dan variasi frekuensi.	75
Tabel 4.9 tabel Standar Deviasi pengukuran suhu ditinjau dari alat ukur dan variasi frekuensi.	76
Tabel 4.10 tabel <i>error standard</i> pengukuran suhu ditinjau dari alat ukur dan variasi frekuensi.	76

DAFTAR NOTASI

f	frekuensi (hz)
k	konduktivitas,kehantaran termal benda (W/m.K)
q_{joule}	fluks kalo <i>heater</i> (W/m ²)
q_{loss}	fluks kalor konveksi natural (W/m ²)
q_{net}	fluks kalor konveksi yang dihasilkan jet sintetik (W/m ²)
s	jarak tempuh (m)
t	waktu (s)
v	kecepatan partikel (m/s)
A	luasan penampang (m ²)
Δ	defleksi membran (m)
D	diameter pipa (m)
Re	bilangan Reynolds
Nu	bilangan Nusselts
T	periode (s)
T_w	temperatur dinding (°C)
T_∞	temperatur <i>freestream</i> (°C)
V	kecepatan rambat gelombang; kecepatan rata-rata fluida yang mengalir (m/s)
V_o	kecepatan awal gelombang (m/s)
z	Jarak aksial jet sintetik
d	diameter orifis (m)
D	diameter membran piezoelektrik (m)
k	Amplitudo Gelombang (m ⁻¹)
λ	panjang gelombang (m)
μ	viskositas dinamik fluida (kg/m.s)
L	tinggi heat sink (m)
Ra	bilangan Rayleigh
Gr	bilangan Grashof
Pr	bilangan Prandtl
π	pi, bilangan tak berdimensi
ρ	massa jenis fluida (kg/m ³)
Σ	sigma
θ	sudut antara sumbu simetri dengan arah gerak(°)
σ	konstanta proporsionalitas / Stefan-Boltzman (5,669x10 ⁻⁸ W/m ² K ⁴)
ϕ	beda fasa
∂T	gradien temperatur

DAFTAR LAMPIRAN

- L1 Data Temperatur *Synthetic Jet* pada termokopel di titik 1
- L2 Data Temperatur *Synthetic Jet* pada termokopel di titik 2
- L3 Data Temperatur *Synthetic Jet* pada termokopel di titik 3
- L4 Data Temperatur *Synthetic Jet* pada termokopel di titik 4
- L5 Data Temperatur *Synthetic Jet* pada termokopel di titik 5
- L6 Data Temperatur *Synthetic Jet* pada termokopel di titik 6
- L7 Data Perbedaan suhu selama 1 jam pemanasan dengan heater *Synthetic Jet* pada termokopel di titik 4
- L8 Data Koefisien Konveksi *Synthetic Jet* pada termokopel di titik 4
- L9 Data perubahan Temperatur *Synthetic Jet* pada termokopel di titik 4
- L10 Data Tegangan Listrik, Arus Listrik, dan Daya Listrik pada membran *Synthetic Jet* pada termokopel di titik 4
- L11 Data kalor heater, kalor konveksi bebas, dan kalor net *Synthetic Jet* pada termokopel di titik 4
- L12 Data bilangan Nusselts pada termokopel di titik 4
- L13 Data bilangan Reynolds pada termokopel di titik 4



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam teknologi yang berkembang cepat, dikarenakan pengoperasian yang lebih cepat dari tiap transistor dan densitas dari IC yang tinggi, piranti mikroelektronik membutuhkan disipasi panas yang tinggi pula. Sejalan dengan perkembangan tersebut, dibutuhkannya sistem pendingin pada produk elektronik tersebut karena banyak konsumen mengeluh tentang banyaknya masalah pada produk mereka mengenai sistem pendinginannya, dimana konsumen menginginkan sistem pendingin yang efisien dan juga tidak bising. Saat ini alat-alat elektronik dijalankan menggunakan sumber daya kering (*dry cell*). Ini menjadi tinjauan lain karena sistem pendingin diharapkan mengkonsumsi daya yang kecil untuk menghemat daya pada alat elektronik tersebut. Salah satu sistem pendinginan saat ini pada alat elektronik masih menggunakan sebuah kipas dan untuk menjawab permasalahan di atas maka dipilihlah jet sintetik untuk menggantikan kipas dimana diharapkan jet sintetik mempunyai efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan kipas konvensional saat ini.

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

1.2 Pembatasan Masalah

Pada laporan ini akan dibahas mengenai sistem pendinginan pada heat sink menggunakan jet sintetik yang telah di desain sebelumnya dan kemudian dikontrol menggunakan function generator. Pada percobaan ini menggunakan gelombang kombinasi pada membran atas-bawah yaitu persegi-sinusoidal dengan variasi frekuensi gelombang *square* 80 Hz-Sinus 80 Hz, *square* 80 Hz-Sinus 120 Hz, *square* 80 Hz-Sinus 160 Hz, *square* 120 Hz-Sinus 80 Hz, *square* 120 Hz-Sinus 120 Hz, *square* 120 Hz-Sinus 160 Hz, *square* 160 Hz-

Sinus 80 Hz, *square* 160 Hz-Sinus 120 Hz, *square* 160 Hz-Sinus 160 Hz dan suhu temperatur lingkungan $\pm 28\text{ }^{\circ}\text{C} - 30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kemudian dilakukan simulasi aliran dan analisa data perubahan panas dari waktu ke waktu serta analisa terhadap karakteristik perpindahan panas konvektif pada sintetik jet dengan variasi frekuensi gelombang tersebut.

1.3 Metodologi

Dalam pengerjaan laporan ini dilakukan pengumpulan data dengan menggunakan

1. Studi Literatur

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

2. Software CFD FLUENT

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

3. Software Autodesk Inventor

Software ini digunakan untuk mendesain *Synthetic Jet*.

1.4 Tujuan Penelitian

1. Mendapatkan nilai frekuensi pada membran jet sintetik untuk penurunan panas optimal.
2. Mendapatkan studi awal tentang pengaruh bilangan *Reynolds* terhadap perpindahan panas pada Jet Sintetik.
3. Mendapatkan studi awal tentang pengaruh frekuensi kombinasi terhadap karakteristik perpindahan panas pada Jet Sintetik.

1.5 Sistematika Penulisan

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

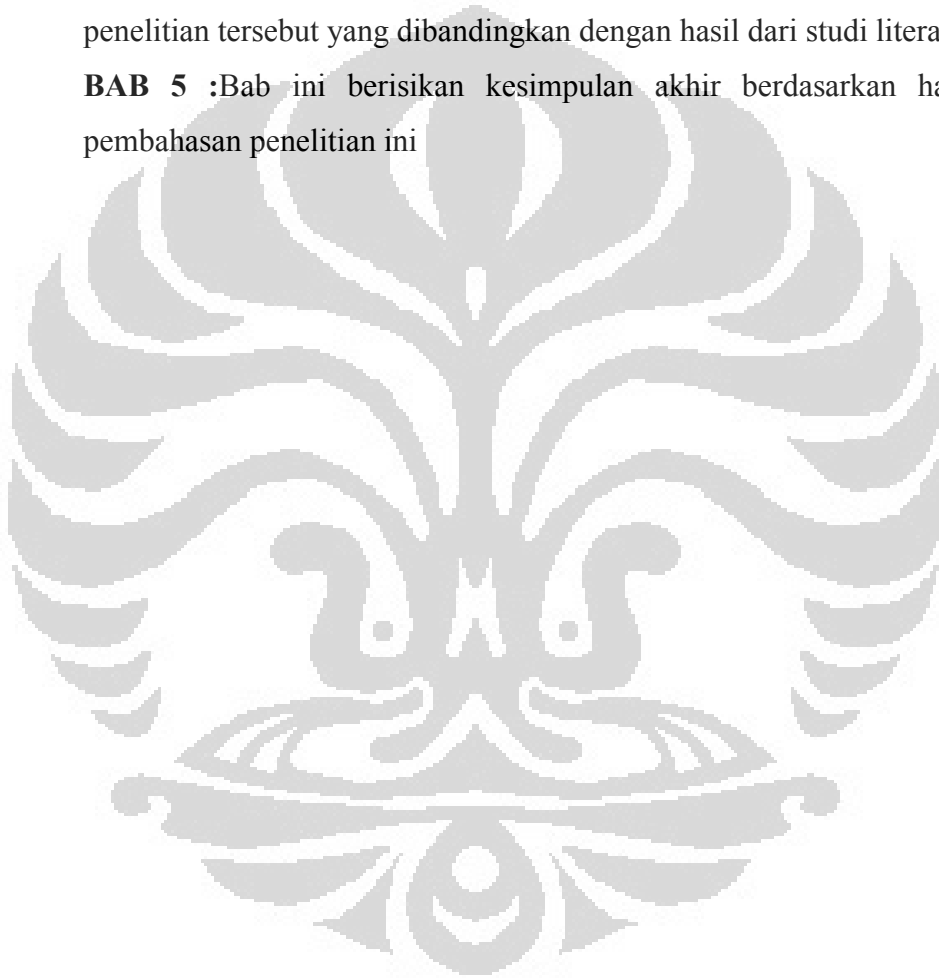
BAB 1 :Pada bab ini dijelaskan tentang latar belakang penelitian, tujuan, batasan masalah, dan sistematika penulisan penelitian.

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

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

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

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

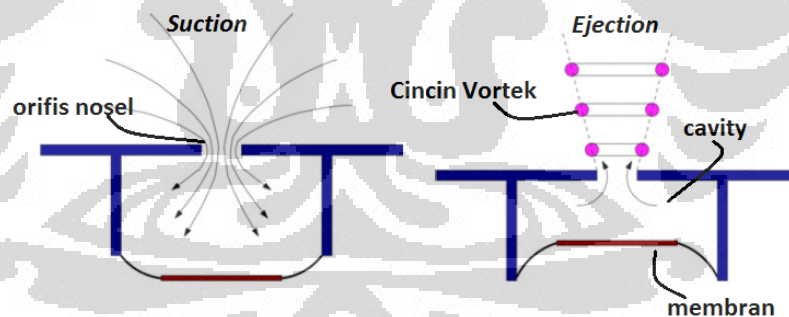


BAB 2

DASAR TEORI

2.1 Jet Sintetik

Jet sintetik merupakan aliran dengan input mass netto nol (*Zero-net-mass*) yang dihasilkan melalui gerak hisap (*suction*) - tiup (*ejection*) fluida yang dihasilkan oleh gerak harmonik membran dan keluar melalui celah sempit/orifis (Smith & Glezer, 1998). Jet Sintetik adalah jet seperti aliran gerak fluida yang dibentuk oleh perubahan waktu ke waktu, suction dan ejection fluida yang berulang melewati orifis, dengan gerakan diafragma per periode waktu yang dibangun menjadi satu kesatuan dengan dinding ruangan (Zhang & Tan, 2007). Jet sintetik digerakkan oleh sebuah aktuator berupa membran *piezoelektrik* yang memiliki input *massa netto* nol tetapi menghasilkan output momentum *netto* tidak nol. Jet sintetik secara visual dapat digambarkan seperti pada gambar 2.1.



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

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

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

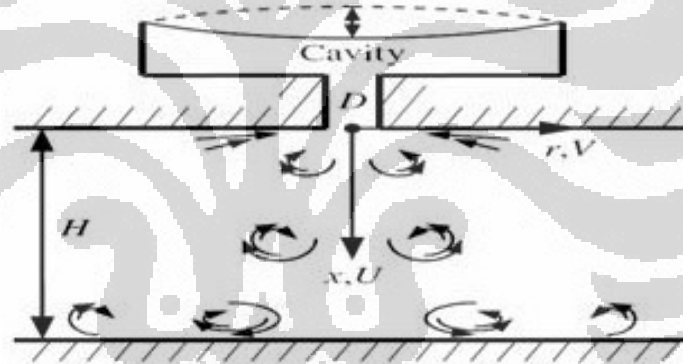
Setiap tahunnya, jet sintetik dikembangkan terus menerus dimana diharapkan jet sintetik dapat menggantikan pendinginan konvensional saat ini seperti fan. Jet sintetik memiliki beberapa keuntungan dibandingkan dengan sistem pendinginan konvensional fan. Pada sistem fan kebutuhan suplai udara dipenuhi dengan mengalirkan fluida udara dari satu tempat ke tempat lainnya, sedangkan sistem jet sintetik menawarkan keuntungan utama yaitu hanya menggunakan udara yang sama yang terus diputar oleh sistemnya (Sharma, 2007). Selain itu fan dinilai kurang efisien pada besarnya panas yang dibuang terhadap besarnya volume aliran (Mahalingam dkk, 2006). Keuntungan lain dari sistem pendinginan menggunakan jet sintetik dibanding fan untuk performa *heat transfer* yang sama, antara lain (Lasance & Aarts, 2008):

- Tingkat kebisingan yang jauh lebih rendah
- Efisiensi (termodinamik) yang lebih baik, kebutuhan daya hanya setengahnya atau kurang
- Memiliki form factor yang jauh lebih baik sehingga bersifat “*design-friendly*”
- Reliability (tahan uji) intrinsik yang lebih tinggi

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

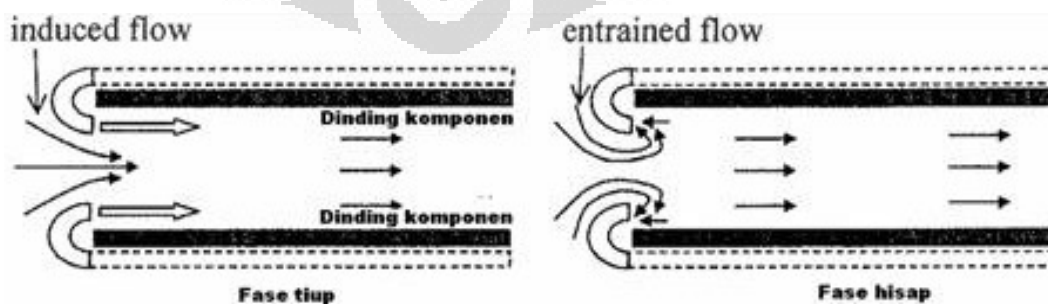
Jet sintetik juga memiliki kelemahan, terutama pada jenis *impinging*. Hal ini terlihat pada fluida udara yang dihisap kembali pada fase *suction* saat membran jet sintetik berosilasi. Jika udara yang dibuang pada fase *discharge* terdapat udara panas dan dihisap kembali ke dalam *cavity* maka akan timbul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

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



Gambar 2.2 Model *Impinging* Jet

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



Gambar 2.3 Model *Cross-Flow* Jet

(Sumber: Raghav Mahalingam, 2007)

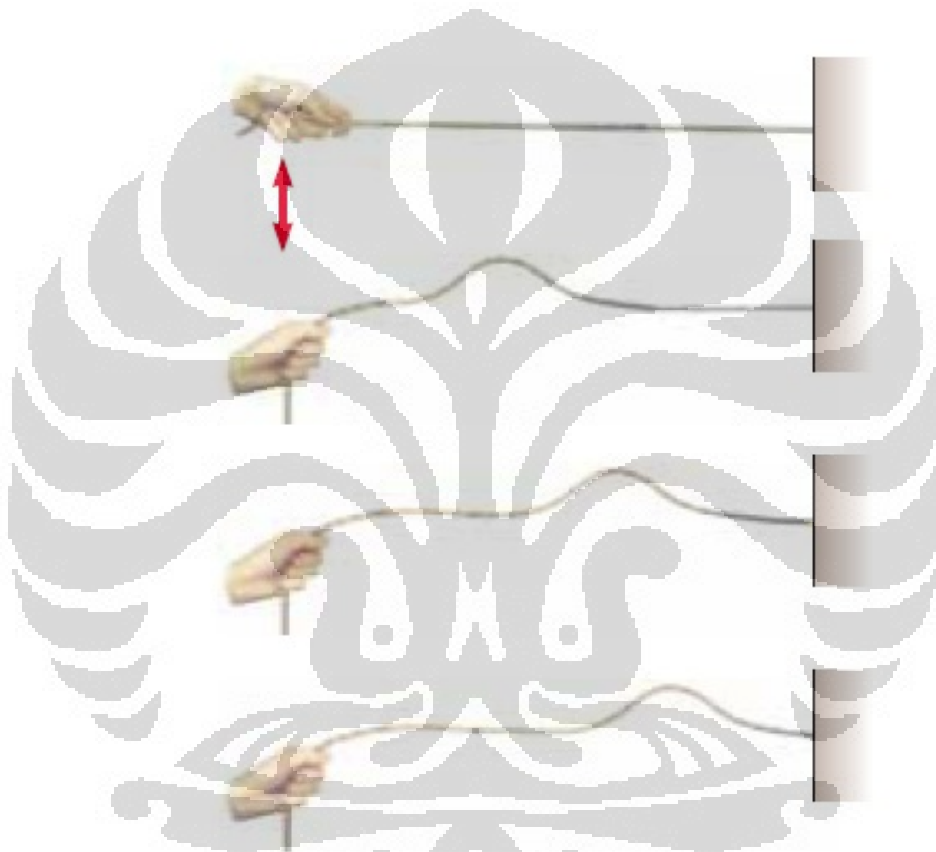
Model *impinging* dan *cross-flow* jet memiliki perbedaan pada bagian bidang aliran fluida yang dituju. Pada *Impinging* jet, arah aliran *vortex* diarahkan menuju *heated wall* sehingga aliran *vortex* membentur *heated wall* dan kemudian aliran *vortex* bergerak sepanjang dinding, sementara *cross-flow* jet mengarahkan *vortex* yang keluar dari orifis langsung melewati dinding komponen dan bergerak sejajar dinding. Terdapat tiga variabel utama yang mempengaruhi perpindahan kalor pada *synthetic jet impinging* yaitu frekuensi eksitasi, panjang langkah dan ketinggian orifis terhadap permukaan (Mc Guinn dkk, 2008).

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

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

2.2 Gelombang

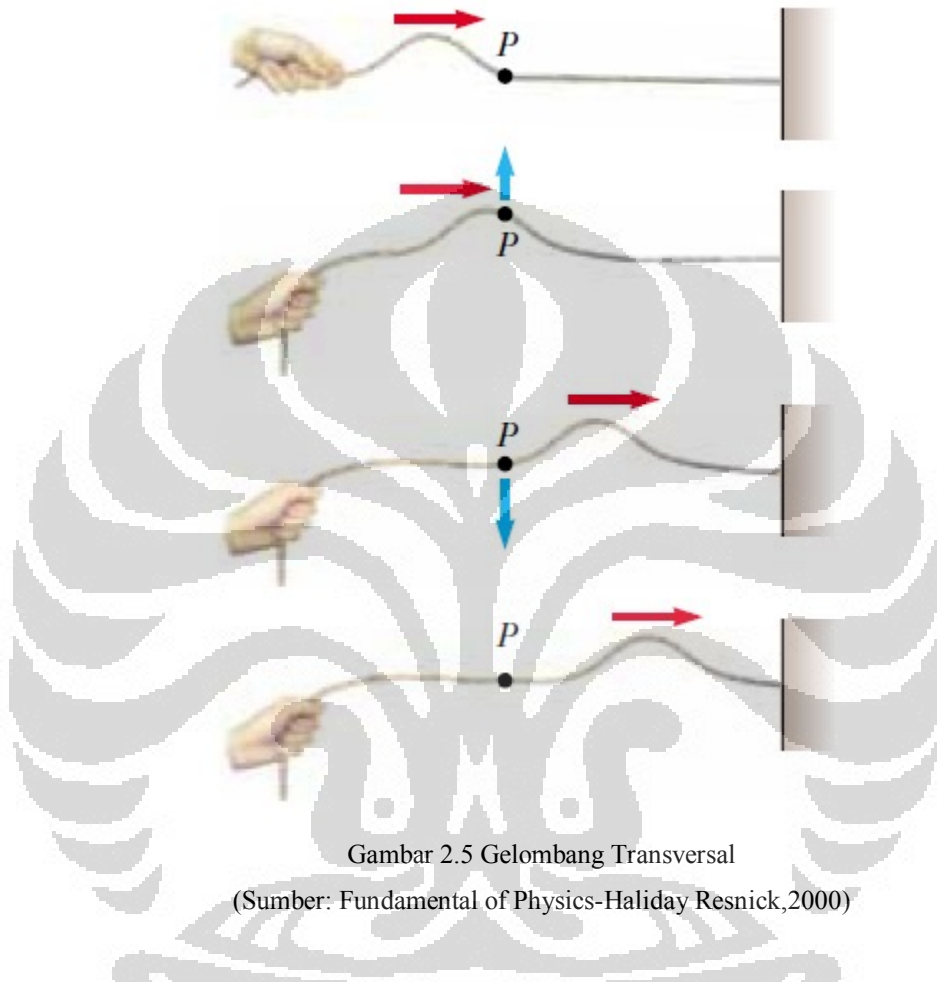
Gelombang merupakan perubahan energi dan momentum dari satu titik di dalam ruang ke titik lain tanpa perpindahan materi. Contohnya pada sebuah tali yang digerakkan dimana ujungnya diikat di sebuah dinding, maka ketika tali itu digerakkan, energi dan momentum yang diberikan akan menjalar melalui tali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



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

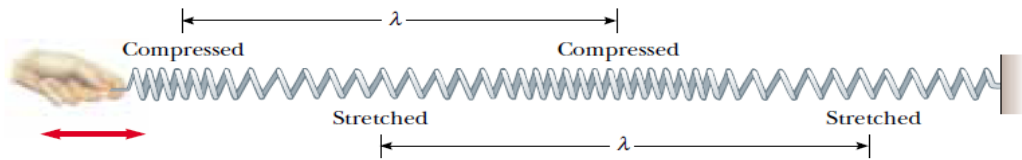
Di alam semesta ini terdapat banyak gelombang. Gelombang dibedakan menjadi dua jenis yaitu: 1) berdasarkan arah rambat gelombang, 2) berdasarkan mediumnya. Berdasarkan arah rambat gelombang, gelombang dibedakan lagi menjadi dua yaitu gelombang transversal dan gelombang longitudinal. Gelombang transversal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

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



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

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

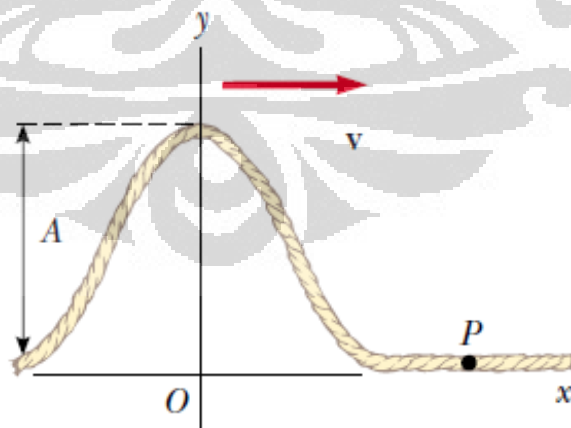


Gambar 2.6 Gelombang Longitudinal
(Sumber: Fundamental of Physics-Haliday Resnick,2000)

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

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

$$y = f(x) \tag{2.1}$$



Gambar 2.7 Gelombang satu dimensi yang berjalan ke arah kanan dengan kecepatan v pada $t = 0$
(Sumber: Fundamental of Physics-Haliday Resnick,2000)

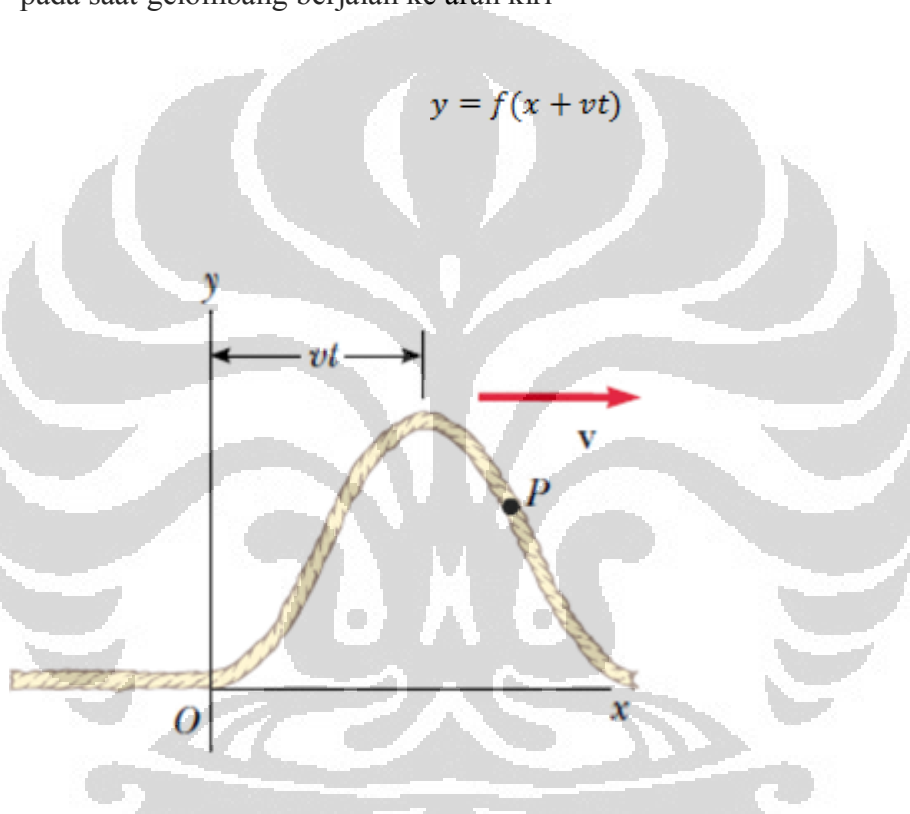
Setelah gelombang berjalan selama t detik sejauh vt , dimana v adalah besarnya kecepatan gelombang yang dianggap konstan maka persamaan pada tali tersebut dapat dinyatakan oleh

-pada saat gelombang berjalan ke arah kanan

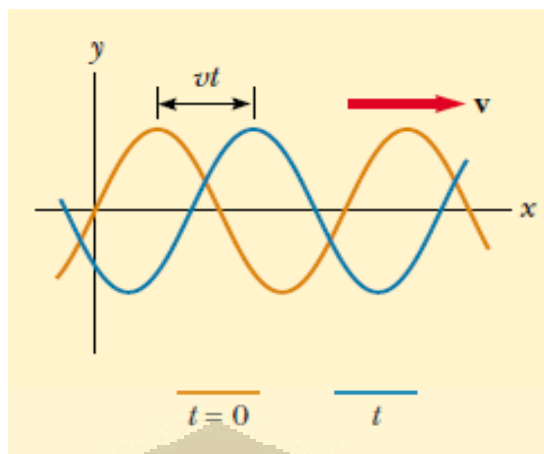
$$y = f(x - vt) \quad (2.2)$$

-pada saat gelombang berjalan ke arah kiri

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



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



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

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

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

dimana A adalah amplitude, λ adalah panjang gelombang. Jika gelombang bergerak ke arah kanan dengan kecepatan v , maka fungsi gelombang setelah t detik adalah

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

dimana

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

maka persamaan menjadi,

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

Selain persamaan di atas, kita juga dapat menulis fungsi gelombang dengan mendefinisikan *angular wave number* k dan *angular frequency* ω :

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

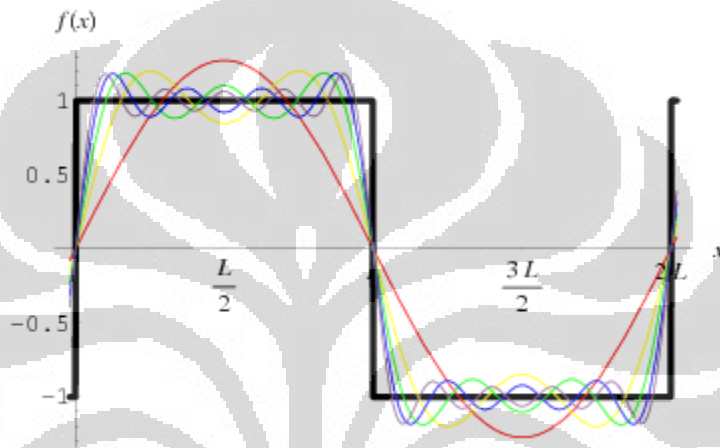
$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2.9)$$

Maka,

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

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

Sedangkan gelombang square dapat dijabarkan sebagai berikut :



Gambar 2.10 Transformasi gelombang sinus menjadi square

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

Fungsi gelombang square dinyatakan dengan deret *Fourier* yaitu:

$$f(x) = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right). \quad (2.12)$$

2.3 Perpindahan Kalor

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

2.3.1 Perpindahan kalor konduksi

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

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

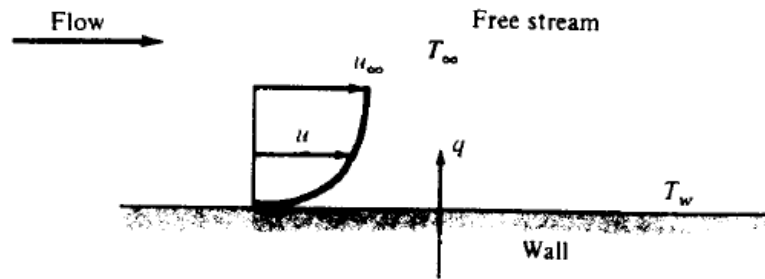
Dengan memasukkan konstanta proporsionalitas atau tetapan kesebandingan:

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

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

2.3.2 Perpindahan kalor konveksi

Perpindahan kalor konveksi merupakan perpindahan kalor yang terjadi pada permukaan suatu benda (tidak padat) dengan suatu fluida dikarenakan adanya pergerakan dari partikel-partikel fluida pada dua temperature yang berbeda. Mekanisme perpindahan kalor konveksi terdiri atas dua yaitu difusi dan gerakan fluida. Gerakan fluida ditimbulkan karena adanya perbedaan temperatur pada fluida sehingga terjadi proses perpindahan kalor. Proses perpindahan kalor konveksi dapat digambarkan seperti pada gambar 2.10 di bawah ini.



Gambar 2.11 Skematik perpindahan kalor konveksi

(Sumber: JP.Holman, p.11)

Gambar 2.11 menggambarkan interaksi permukaan suatu dinding dengan medan aliran fluida dimana medan aliran fluida mewakili aliran fluida sepanjang permukaan panas. Interaksi antara permukaan dinding dengan fluida akan menghasilkan medan kecepatan yang bervariasi, dimulai dari nol pada daerah dekat permukaan sampai dengan kecepatan maksimum pada aliran. Jika pada permukaan dinding dengan aliran fluida ini memiliki perbedaan temperatur maka akan membentuk suatu daerah batas termal yang besarnya bervariasi (terdapat distribusi temperature) dari T_w sampai dengan T_∞ . Jika besar $T_w > T_\infty$ maka konveksi akan terjadi.

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

2.3.3 Perpindahan kalor radiasi

Mekanisme perpindahan kalor tanpa melalui medium antara disebut radiasi. Radiasi merupakan perpindahan kalor melalui daerah hampa

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

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

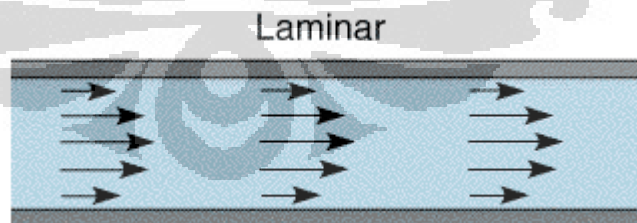
di mana σ merupakan konstanta proporsionalitas atau konstanta Stefan – Boltzmann dengan nilai $5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$. Persamaan tersebut berlaku hanya untuk radiasi termal saja.

2.4 Aliran Fluida

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

2.4.1 Aliran Laminar

Aliran fluida yang mengalir dengan lancar pada setiap lapisan disebut aliran laminar. Viskositas yang terjadi di dalam aliran menyebabkan efek peredaman gerakan antar lapisan fluida dengan dinding. Aliran laminar ini dapat digambarkan pada gambar 2.12.



Gambar 2.12 Aliran Laminar

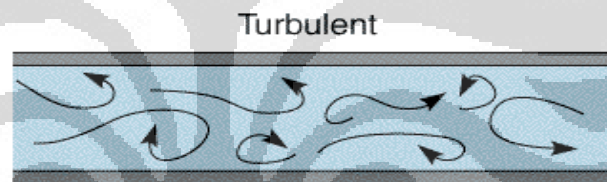
(Sumber: <http://www.ceb.cam.ac.uk/pages/hydrodynamic-voltammetry.html>)

2.4.2 Aliran Transisi

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

2.4.3 Aliran Turbulen

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



Gambar 2.13 Aliran Turbulen

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

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

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

dimana,

ρ = massa jenis fluida (kg/m^3)

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

D = diameter pipa (m)

μ = viskositas dinamik fluida (kg/m.s)

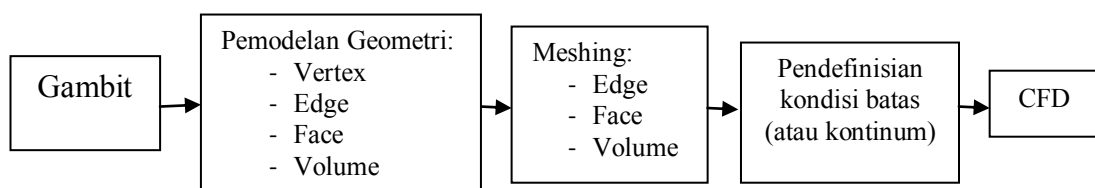
Secara umum untuk aliran di dalam pipa bundar, jika besar bilangan *Reynolds* kurang dari 2100 maka aliran laminar dan jika lebih dari 4000 maka aliran turbulen. Nilai di antara keduanya merupakan aliran transisi.

2.5 CFD Fluent

Dalam kehidupan sehari-hari banyak fenomena yang terjadi seperti contohnya fenomena fluida baik dalam bentuk gas maupun cair. Fenomena-fenomena fluida tersebut bisa terjadi dalam bentuk sederhana maupun dalam bentuk kompleks. Dalam mempelajari fenomena fluida yang kompleks tersebut dibutuhkan sebuah *tools* yang dapat memprediksi dan menganalisa aliran fluida yang terjadi pada suatu benda. Salah satu *tools* yang dapat digunakan untuk mempermudah dalam mempelajari fenomena fluida tersebut adalah *software CFD Fluent*. *Software CFD Fluent* ini dikembangkan agar dapat memenuhi kebutuhan akan ilmu yang dinamakan *Computational Fluid Dynamics* atau CFD. Ilmu CFD dapat diartikan sebagai ilmu yang mempelajari cara memprediksi aliran fluida, perpindahan panas, reaksi kimia dan fenomena-fenomena lain dengan menyelesaikan persamaan Matematika. Prediksi aliran fluida dengan CFD berdasarkan tiga hal yaitu model Matematika (Navier-Stokes), metode numerik, dan *tools* (*Pre-* dan *postprocessing, Solvers*).

2.5.1 Gambit

Gambit (*Geometry And Mesh Building Intelligent Toolkit*) adalah alat *preprocessor* yang dibuat untuk membantu menciptakan model dan diskritisasi (*meshing*) yang selanjutnya dianalisis menggunakan program CFD. Penggunaan Gambit untuk pemodelan dan analisis CFD secara garis besar digambarkan oleh gambar 2.11.



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

2.5.2 Fluent

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

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

Dalam melakukan simulasi model dengan menggunakan fluent, maka dibutuhkan *solver* untuk menyelesaikan simulasi tersebut dengan memilih formula *solver* yang tersedia di dalam fluent. Salah satu *solver* tersebut adalah model turbulensi k- ω SST. Model turbulensi k- ω SST adalah dua persamaan model eddy-viskositas yang menjadi sangat populer. Model ini menggunakan

model 2D *Double Precision*. Penggunaan formula k- ω di bagian dalam lapisan batas membuat model secara langsung dapat digunakan sepanjang dinding sub-lapisan viskos, maka model turbulensi k- ω SST dapat digunakan sebagai model turbulensi dengan *Reynold* rendah tanpa fungsi redaman tambahan. Model k- ω SST mirip dengan model k- ω standar, tetapi juga meliputi perbaikan sebagai berikut:

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

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

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

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

Dimana

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

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

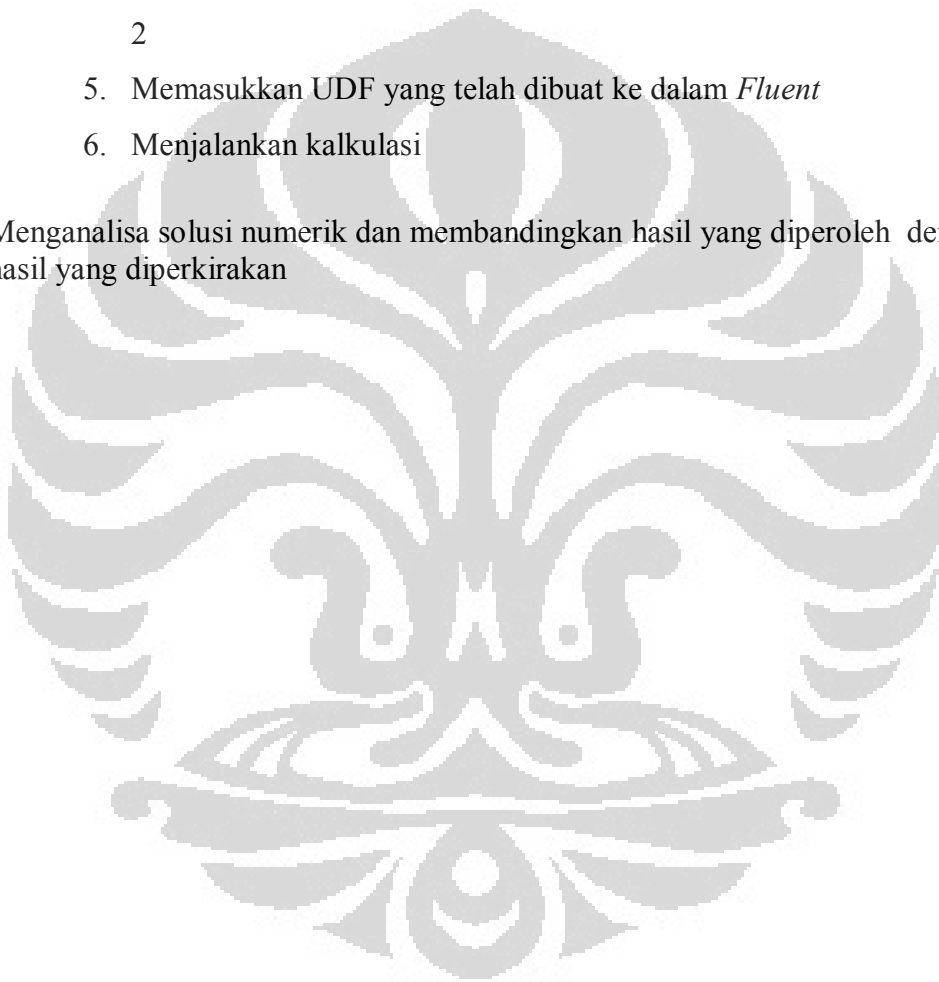
$$M_{t0} = 0.25, \quad \sigma_k = 2.0, \quad \sigma_\omega = 2.0$$

Selain solver k- ω SST, jika ingin menyelesaikan permasalahan yang lebih kompleks dan detail, maka diperlukan formula *solver* yang dibuat sendiri. Hal ini dapat dilakukan dengan menggunakan *software fluent* dimana formula

solver dapat dimasukkan dalam bentuk bahasa pemrograman C yang disebut *User Define Function*(UDF). Langkah-langkah dalam pembuatan *User Define Function* adalah sebagai berikut:

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

Menganalisa solusi numerik dan membandingkan hasil yang diperoleh dengan hasil yang diperkirakan

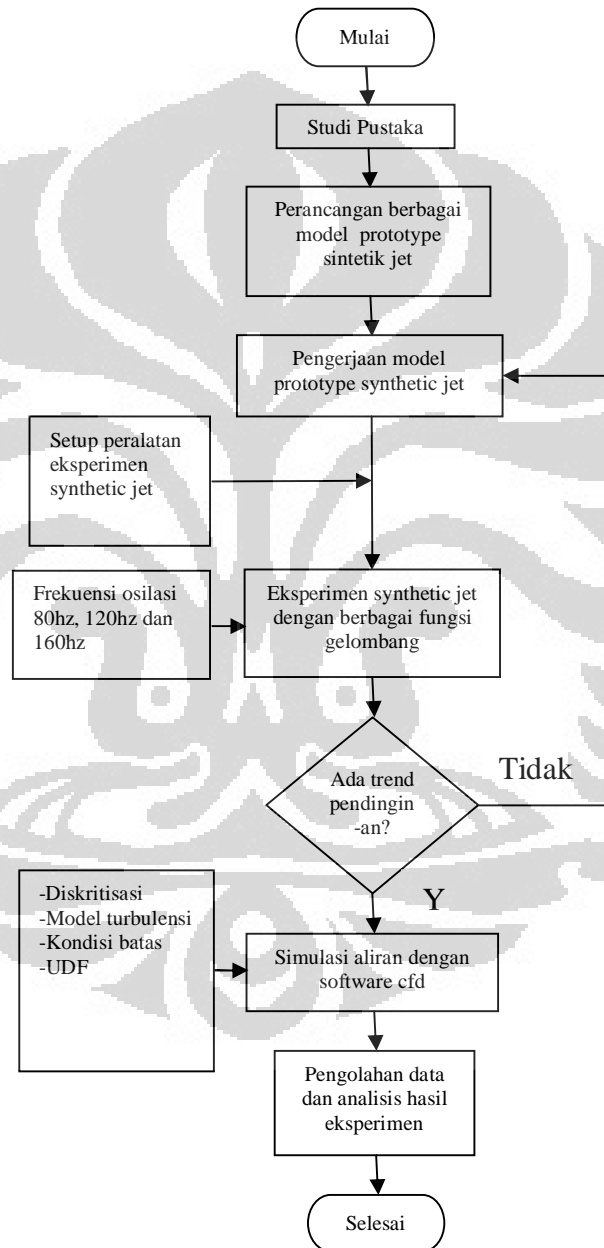


BAB 3

Sistem Pendinginan dengan Jet Sintetik

3.1 Diagram Alir Penelitian

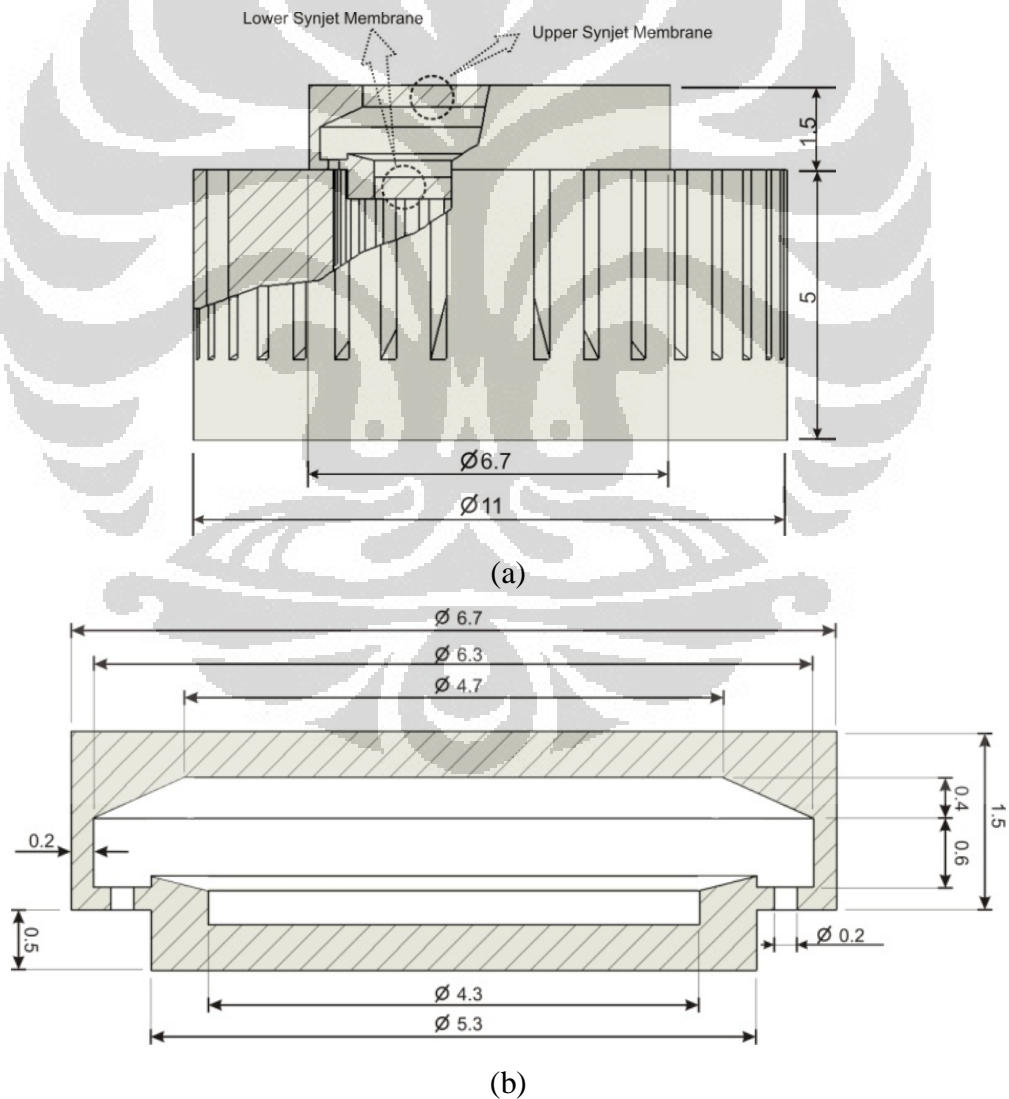
Pada penelitian ini, jalannya eksperimen dapat dijabarkan melalui gambar 3.1 di bawah ini



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Modul Jet Sintetik

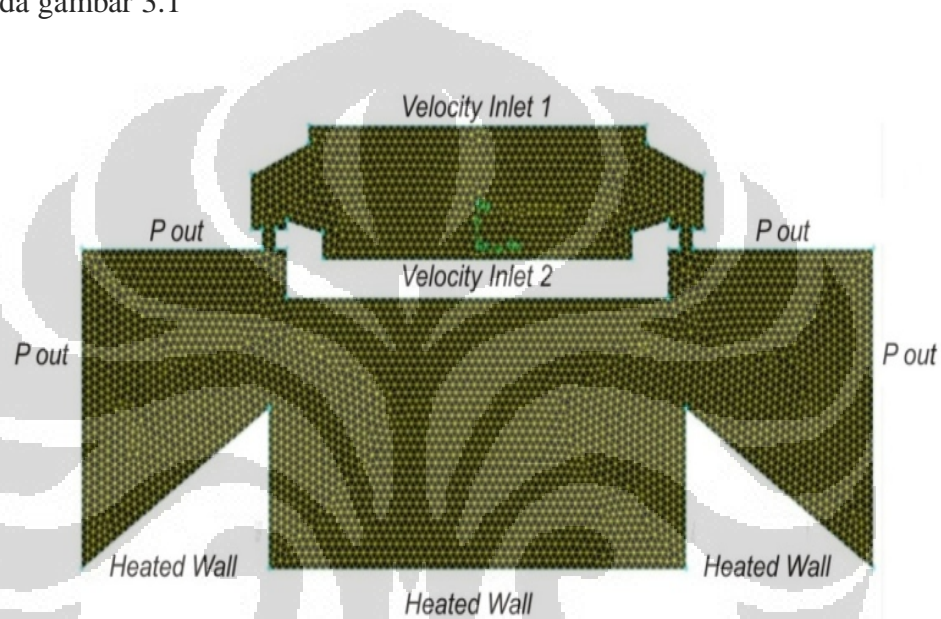
Pada penelitian ini dibutuhkan jet sintetik untuk melakukan percobaan sehingga dirancanglah sebuah *prototype* jet sintetik dimana diharapkan rancangan *prototype* jet sintetik yang telah dirancang mampu menghasilkan aliran jet sintetik yang memiliki *heat transfer coefficient* yang baik. Rancangan *prototype*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



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

3.3 Tahap Komputasional

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



Gambar 3.3 Gambaran daerah komputasi jet sintetik

Model komputasi ini digunakan untuk menganalisis daerah aliran termal pada jet sintetik dengan menggunakan model matematika $k-\omega$ SST (*Shear Stress Transport*). Pada daerah kerja, udara diasumsikan *isothermal* dan juga *incompressible*. Suhu lingkungan diasumsikan $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan suhu bagian bawah dari dinding yang dipanaskan, dipertahankan pada suhu *isothermal* $58.4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dinding batas di kedua sisi *actuator* diasumsikan memiliki tekanan statik konstan dengan tekanan 1 atm. Detail lain dari kondisi komputasi dituliskan pada tabel di bawah ini.

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.

Tabel Kondisi komputasi

Computation Condition		
Model settings		
2D, Unsteady		
Fluid		
Air		
Fluid Properties	Density	1.225 kg/m ³
	Viscosity	1.7894 e ⁻⁰⁵ 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	58.4oC
	Frequency	80 Hz, 120 Hz, and 160 Hz
	Amplitude	UDF

Pada saat awal ($t=0$), posisi diafragma berada pada bagian bawah *cavity*. Gerakan diafragma diasumsikan sama dengan gerakan piston di dalam sebuah silinder, dimana membran atas menggunakan variasi gelombang Square dan membran bawah menggunakan variasi gelombang sinusoidal.

Fungsi *Square* yang dimasukkan ke dalam UDF *Fluent* adalah fungsi kecepatan atau turunan pertama dari fungsi defleksi membran atas.

Fungsi defleksi membran atas,

$$Y(t) = \frac{4k}{\pi} \left(\sin(2\pi ft) + \frac{1}{3} \sin 3(2\pi ft) + \frac{1}{5} \sin 5(2\pi ft) \right) \quad (3.1)$$

Fungsi kecepatan membran atas,

$$V(t) = \frac{4k}{\pi} \left(2\pi f \cos(2\pi ft) + \frac{1}{3} 2\pi f \cos 3(2\pi ft) + \frac{1}{5} 2\pi f \cos 5(2\pi ft) \right) \quad (3.2)$$

Fungsi *Sinusoidal* yang dimasukkan ke dalam UDF *Fluent* adalah fungsi kecepatan atau turunan pertama dari fungsi defleksi membran bawah.

Fungsi defleksi membran bawah,

$$Y(t) = k \sin(2\pi ft) \quad (3.3)$$

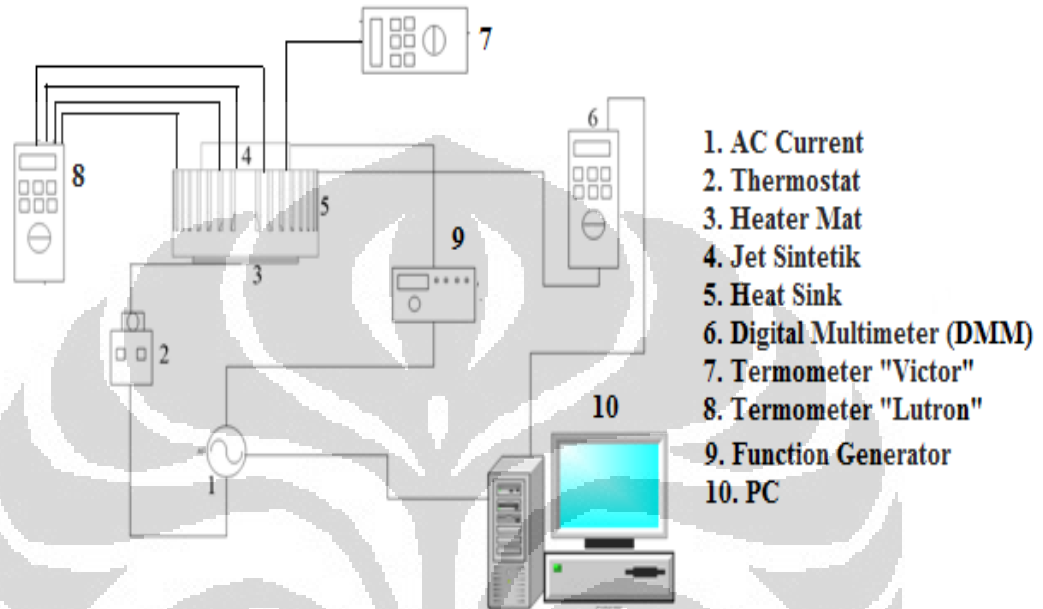
Fungsi kecepatan membran bawah,

$$V(t) = Y'(t) = k 2\pi f \cos(2\pi ft) \quad (3.4)$$

Dengan k adalah amplitudo dan f adalah frekuensi gelombang yang terdiri dari beberapa variasi yaitu 80Hz, 120 Hz, dan 160 Hz.

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 3.4



Gambar 3.4 *Experimental Setup*

Komponen yang digunakan pada sistem eksperimen tersebut ialah sebagai berikut:

1. *Thermostat*

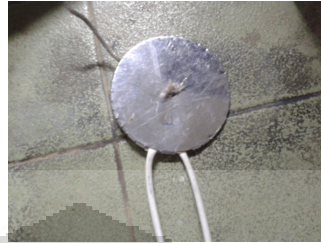
Thermostat merupakan alat yang digunakan sebagai pengatur suhu pada *heater mat*. Suhu yang diset pada *heater mat* ini adalah 60 °C.



Gambar 3.5 *Thermostat*

2. Heater Mat

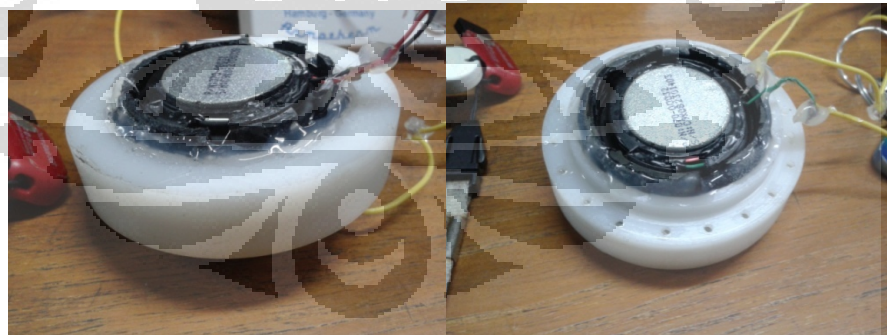
Heater mat merupakan alat yang digunakan sebagai sumber panas yang ditempatkan di bawah *heatsink*.



Gambar 3.6 *Heater Mat*

3. Jet Sintetik

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



Gambar 3.7 Jet Sintetik tampak atas dan tampak bawah

4. Digital Multimeter

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



Gambar 3.8 Digital Multimeter

5. Heat sink

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



Gambar 3.9 Heat sink

6. Sweep Function Generator

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



Gambar 3.10 *Function Generator*

7. Komputer

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



Gambar 3.11 Komputer

3.4.1 Komponen dan peralatan tambahan

Komponen dan peralatan tambahan pada eksperimen ini meliputi:

1. Thermocouple

Merupakan komponen untuk mengukur temperatur di suatu titik pada sistem



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.



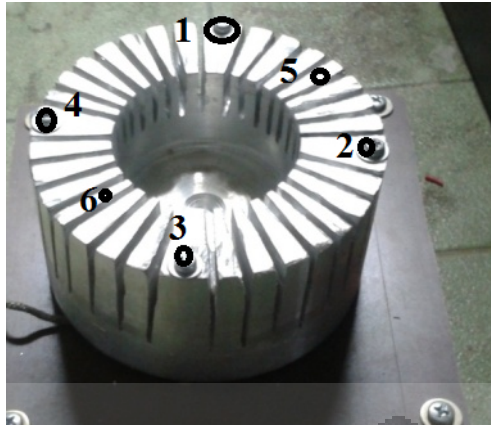
Gambar 3.14 *Hygrometer*

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 ± 0.05 °C. Sebelum dilakukan eksperimen, dilakukan pengaturan suhu pada *heat sink*. Sumber panas pada *heat sink* didapatkan dengan menempatkan *heater mat* pada bagian bawah *heat sink* dengan suhu 60 °C yang diatur menggunakan *thermostat* dan pengukuran dilakukan pada suhu lingkungan 30 °C.

Kemudian dilakukan pengaturan bentuk gelombang sinusoidal yang dipakai pada eksperimen ini, serta pengaturan frekuensi gelombang dengan variasi frekuensi square pada membran atas-bawah *square* 80 Hz-Sinus 80 Hz, *square* 80 Hz-Sinus 120 Hz, *square* 80 Hz-Sinus 160 Hz, *square* 120 Hz-Sinus 80 Hz, *square* 120 Hz-Sinus 120 Hz, *square* 120 Hz-Sinus 160 Hz, *square* 160 Hz-Sinus 80 Hz, *square* 160 Hz-Sinus 120 Hz, *square* 160 Hz-Sinus 160 Hz menggunakan *function generator*. Setelah semua pengaturan dilakukan, maka dilakukan pengambilan data dengan meletakkan *thermocouple* di 6 (enam) titik pada *heatsink* yang kemudian dibaca menggunakan 3 buah alat ukur suhu yaitu termometer “Lutron” yang dapat mengukur 4 titik tetapi dengan pengambilan data manual, termometer “Viktor” yang dapat mengukur 1 buah titik dengan akuisisi manual pula, dan digital multimeter yang dapat mengambil data 1 titik dengan akuisisi data dilakukan oleh Komputer.

Pengambilan data pada eksperimen ini dilakukan selama 1 jam dengan interval data per 1 detik pada digital multimeter, sedangkan untuk pengambilan data manual dilakukan selama 1 jam dengan interval 2 menit. Gambar letak termokopel pada *heat sink* berikut alat ukur suhunya dapat dilihat pada gambar 3.15



Letak Termokopel pada *Heat Sink*

Titik 1 : Lutron 1

Titik 2 : Lutron 2

Titik 3 : Lutron 3

Titik 4 : Digital Multimeter

Titik 5 : Lutron 4

Titik 6 : Victor

Gambar 3.15 letak 6 (enam) buah termokopel pada *heat sink* dan alat pengukurnya

Adapun tujuan penggunaan enam (6) termokopel adalah untuk melihat pola penyebaran penurunan suhu secara radial pada permukaan *heat sink*. Selanjutnya data dianalisa dengan menggunakan Analisa Varian (ANOVA) faktor tunggal untuk mengetahui titik mana yang memiliki variasi data yang lebih kecil, dengan mengasumsikan bahwa semakin kecil nilai varian dari suatu kelompok data berarti *repeatability* dari alat ukur tersebut masih dalam keadaan baik.

Bukan berarti data pada titik lain dianggap tidak valid, tetapi asumsi ini digunakan untuk mengambil sampel perhitungan laju perpindahan kalor konveksi, bilangan *Reynolds*, dan bilangan *Nusselts* sebagai parameter kehandalan pendinginan dengan Jet Sintetik yang hemat energi.

BAB 4

Hasil dan Pembahasan

4.1 Analisa Data Komputasional

Pada tahap komputasional, analisa yang dilakukan adalah analisa terhadap *instantaneous Turbulent Intensity contours* dan *instantaneous vorticity contours*. Dengan tahap komputasional yang telah dilakukan, maka akan didapatkan hasil simulasi seperti yang disebutkan sebelumnya dimana tahap komputasional dilakukan dengan menggunakan *software fluent*. Dengan memasukkan persamaan 4.2 dan 4.4, model UDF untuk sintetik jet dapat dibuat dengan memasukkan frekuensi 80 Hz, 120 Hz dan 160 Hz ke dalam persamaan tersebut dimana UDF tersebut dibuat dalam bahasa pemrograman C. Pada simulasi ini, simulasi dilakukan dengan melihat kondisi aliran saat membran jet sintetik telah beresilasi selama periode (T) dengan kelipatan persekutuan terkecil yaitu 3/40 s atau 0,075 s.

Fungsi *Square* yang dimasukkan ke dalam UDF *Fluent* adalah fungsi kecepatan atau turunan pertama dari fungsi defleksi membran atas.

Fungsi defleksi membran atas,

$$Y(t) = \frac{4k}{\pi} \left(\sin(2\pi ft) + \frac{1}{3} \sin 3(2\pi ft) + \frac{1}{5} \sin 5(2\pi ft) \right) \quad (4.1)$$

Fungsi kecepatan membran atas,

$$V(t) = \frac{4k}{\pi} \left(2\pi f \cos(2\pi ft) + \frac{1}{3} 2\pi f \cos 3(2\pi ft) + \frac{1}{5} 2\pi f \cos 5(2\pi ft) \right) \quad (4.2)$$

Dengan k adalah amplitudo sebesar 1,1 mm dan f adalah frekuensi gelombang *square* yang terdiri dari beberapa variasi yaitu 80Hz, 120 Hz, dan 160 Hz.

Fungsi *Sinusoidal* yang dimasukkan ke dalam UDF *Fluent* adalah fungsi kecepatan atau turunan pertama dari fungsi defleksi membran bawah.

Fungsi defleksi membran bawah,

$$Y(t) = k \sin(2\pi ft) \quad (4.3)$$

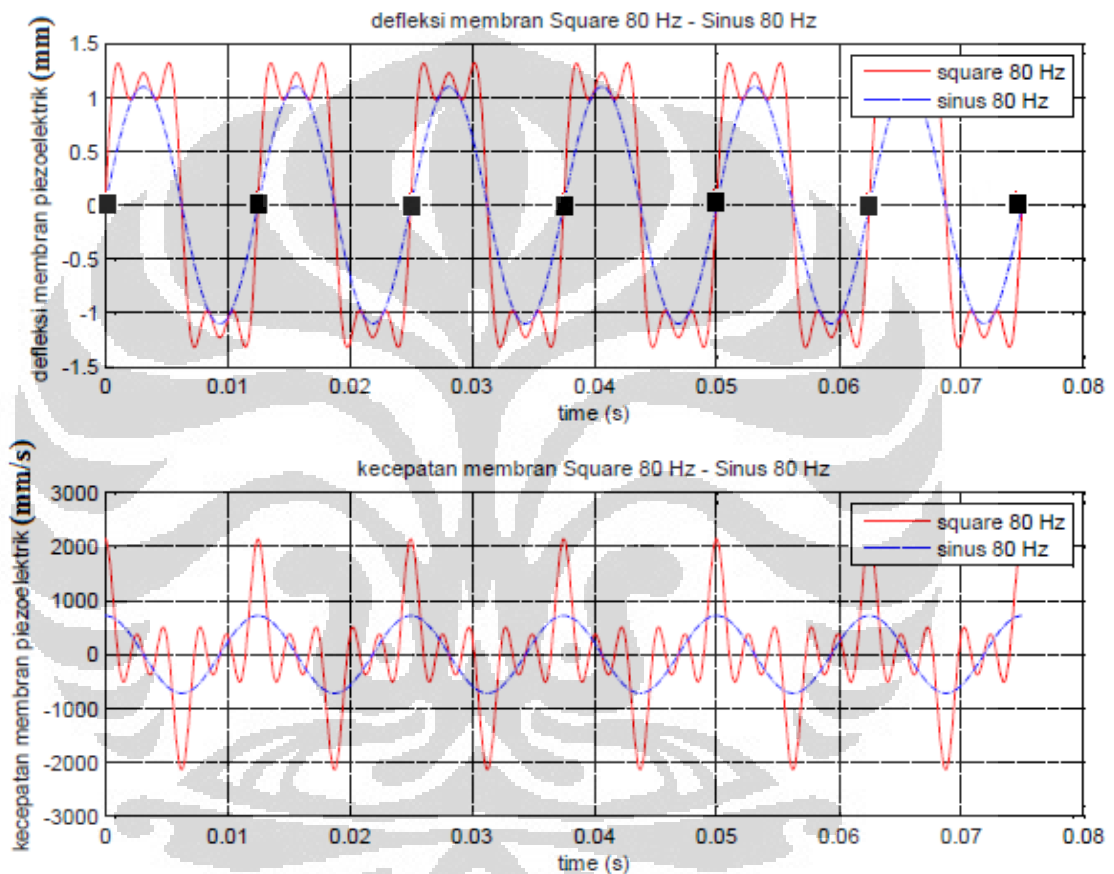
Fungsi kecepatan membran bawah,

$$V(t) = Y'(t) = k 2\pi f \cos(2\pi ft) \quad (4.4)$$

Dengan k adalah amplitudo sebesar 1,1 mm dan f adalah frekuensi angular gelombang sinusoidal yang terdiri dari beberapa variasi yaitu 80Hz, 120 Hz, dan 160 Hz.

i. Variasi *square* 80Hz-sinus80Hz

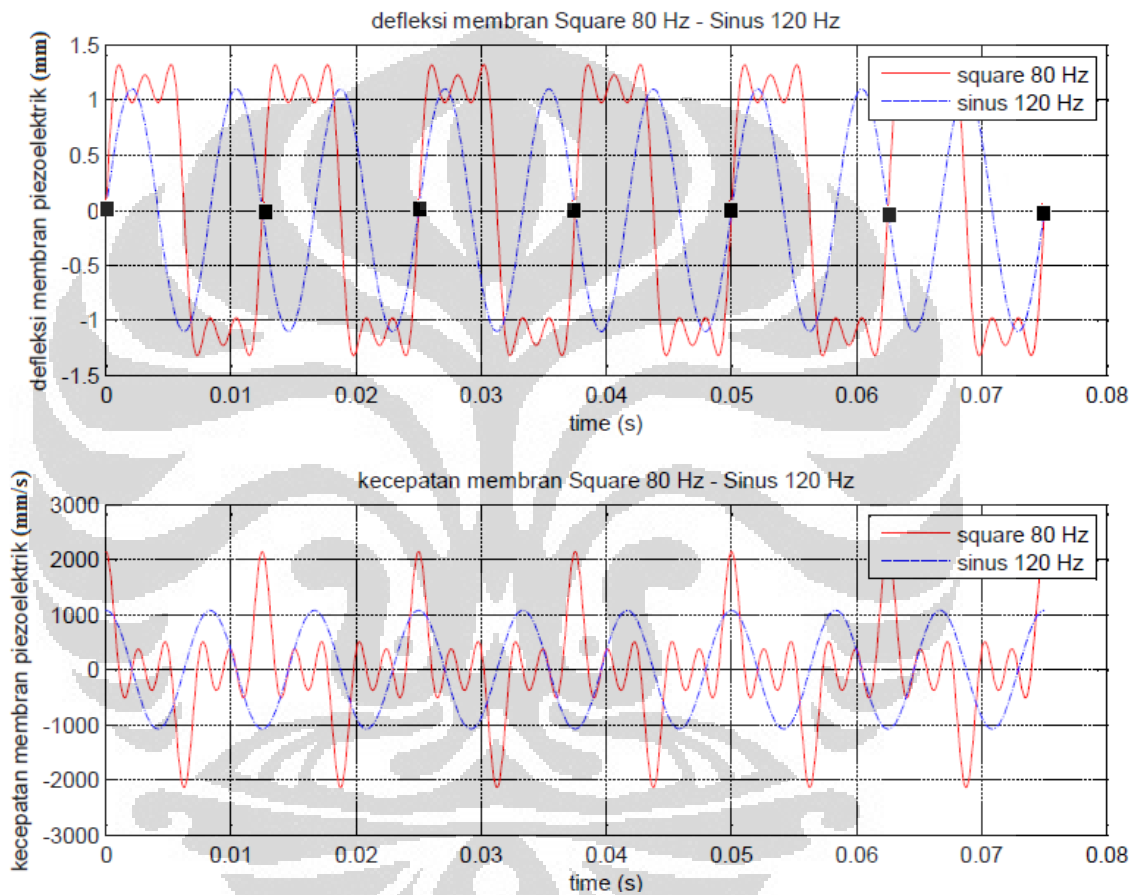
Grafik fungsi *square* 80Hz-sinus80Hz diperlihatkan pada gambar 4.1. karakteristiknya adalah kedua gelombang memiliki periode gelombang yang sama. Sehingga diperkirakan nilai turbulensinya adalah yang paling kecil diantara variasi lainnya. Dalam simulasi CFD dibagi atas 7 bagian yaitu 0/6 T, 1/6 T, 2/6 T, 3/6 T, 4/6 T, 5/6 T, dan 6/6 T.



Gambar 4.1 gelombang *Square* 80Hz-Sinus 80Hz

ii. Variasi *square* 80Hz-Sinus 120Hz

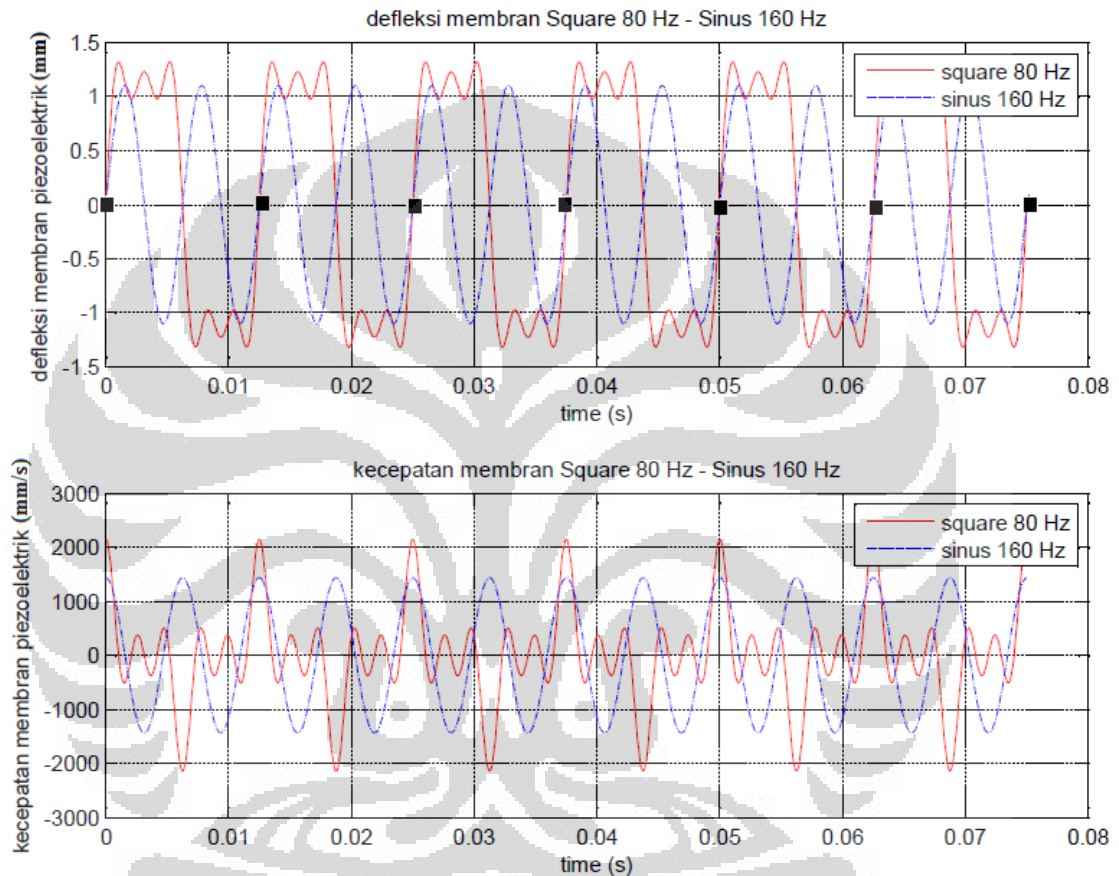
Grafik fungsi *square* 80Hz-sinus120Hz diperlihatkan pada gambar 4.2. karakteristiknya adalah saat gelombang sinusoidal sudah beresilasi 3 kali, gelombang *square* baru beresilasi 2 kali. Dalam simulasi CFD dibagi atas 7 bagian yaitu $0/6 T$, $1/6 T$, $2/6 T$, $3/6 T$, $4/6 T$, $5/6 T$, dan $6/6 T$.



Gambar 4.2 gelombang *Square* 80Hz-Sinus 120Hz

iii. Variasi *square* 80Hz-sinus 160Hz

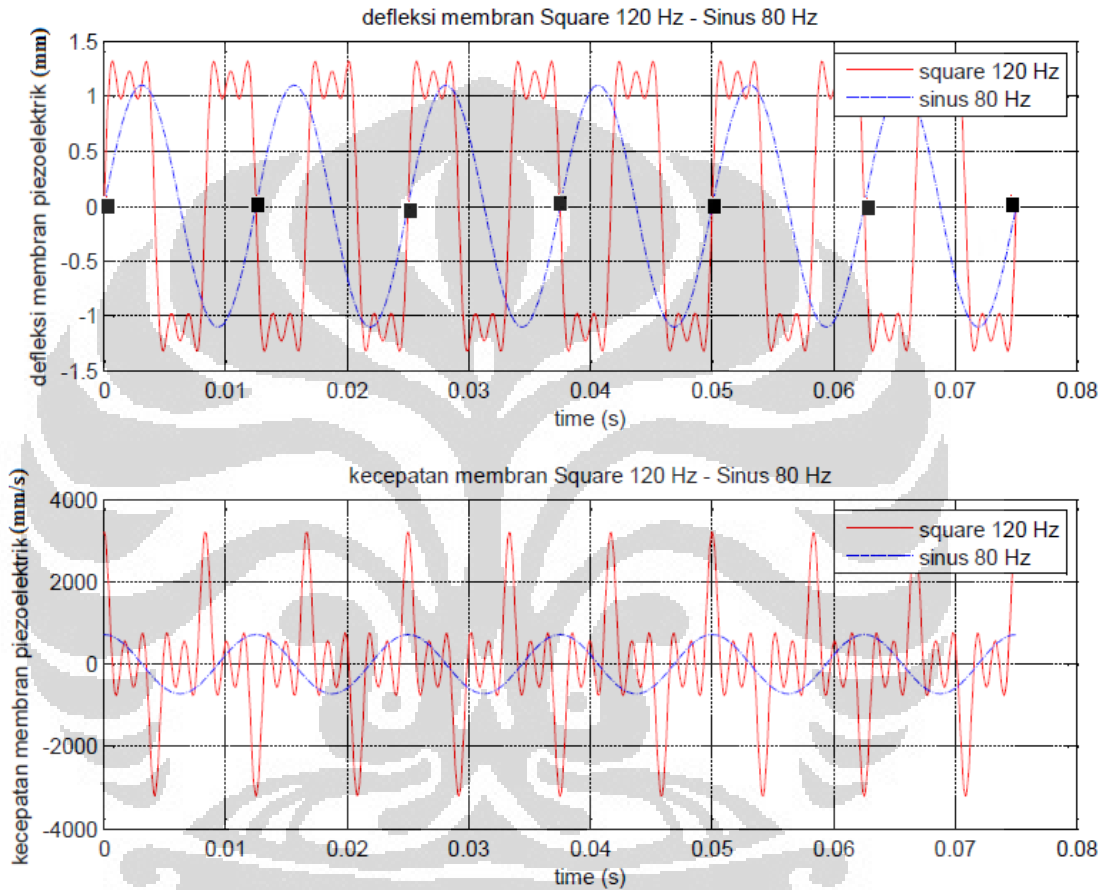
Grafik fungsi *square* 80Hz-sinus 160Hz diperlihatkan pada gambar 4.3. karakteristiknya adalah saat gelombang sinus sudah beresilasi 2 kali, gelombang *square* baru beresilasi 1 kali. Dalam simulasi CFD dibagi atas 7 bagian yaitu $0/6 T$, $1/6 T$, $2/6 T$, $3/6 T$, $4/6 T$, $5/6 T$, dan $6/6 T$.



Gambar 4.3 gelombang *Square* 80Hz-Sinus 160Hz

iv. Variasi *square* 120Hz-sinus 80Hz

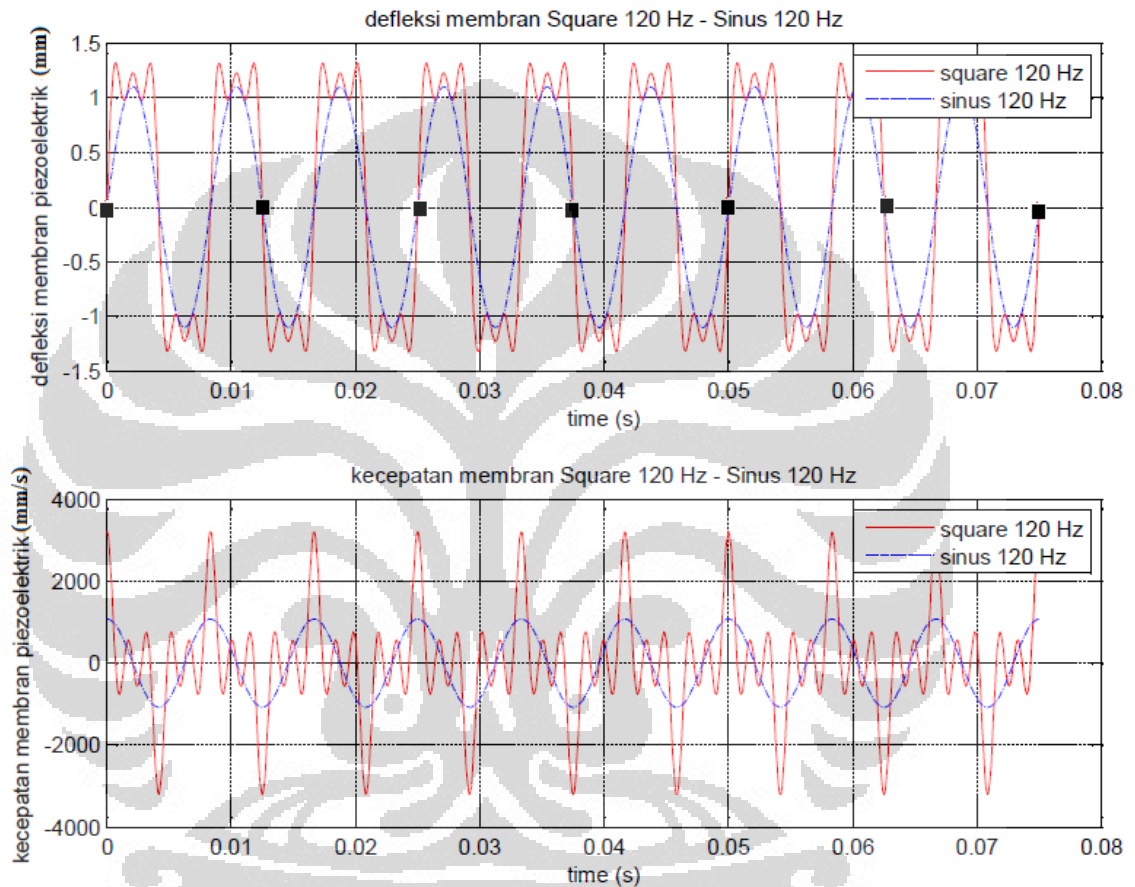
Grafik fungsi *square* 120Hz-sinus 80Hz diperlihatkan pada gambar 4.4. karakteristiknya adalah saat gelombang *square* sudah beresilasi 3 kali, gelombang sinusoidal baru beresilasi 2 kali. Dalam simulasi CFD dibagi atas 7 bagian yaitu 0/6 T, 1/6 T, 2/6 T, 3/6 T, 4/6 T, 5/6 T, dan 6/6 T.



Gambar 4.4 gelombang *Square* 120Hz-Sinus 80Hz

v. Variasi *square* 120Hz-sinus 120Hz

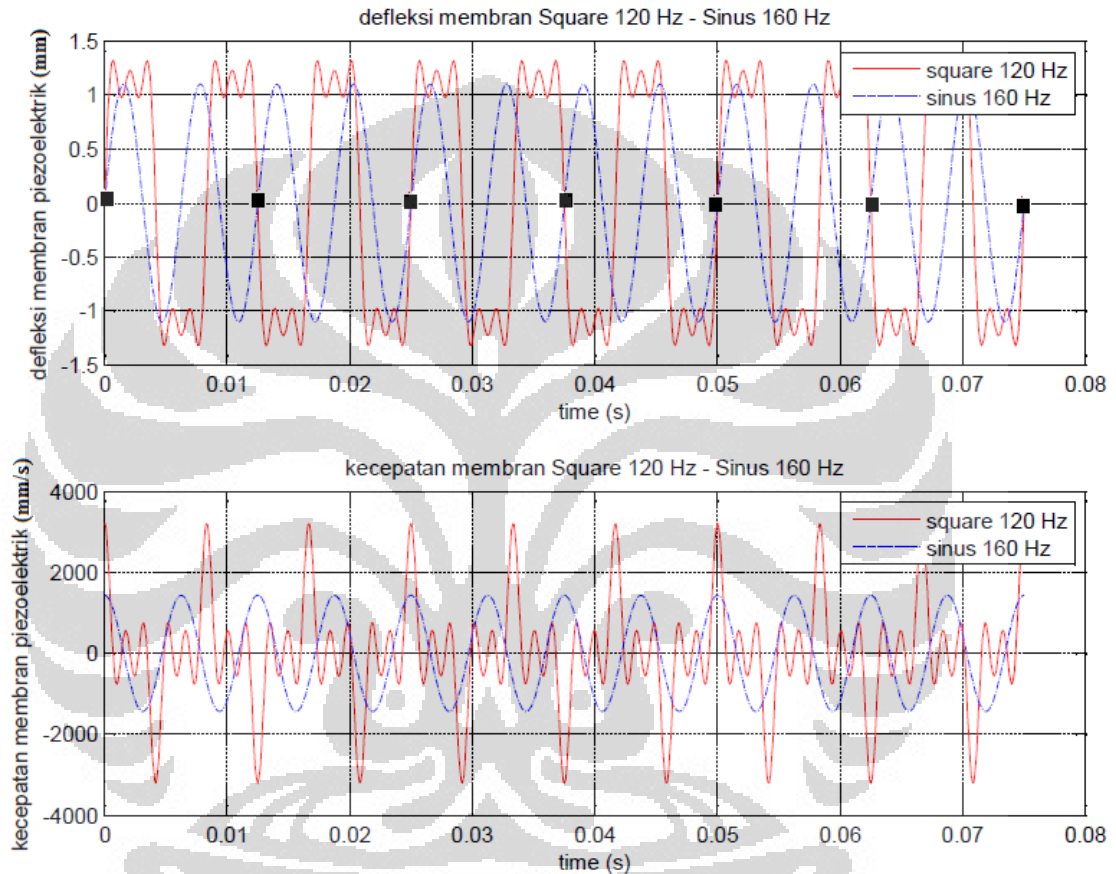
Grafik fungsi *square* 120Hz-sinus 120Hz diperlihatkan pada gambar 4.5. karakteristiknya adalah kedua gelombang memiliki periode gelombang yang sama. Dalam simulasi CFD dibagi atas 7 bagian yaitu $0/6 T$, $1/6 T$, $2/6 T$, $3/6 T$, $4/6 T$, $5/6 T$, dan $6/6 T$.



Gambar 4.5 gelombang *Square* 120Hz-Sinus 120Hz

vi. Variasi *square* 120Hz-sinus 160Hz

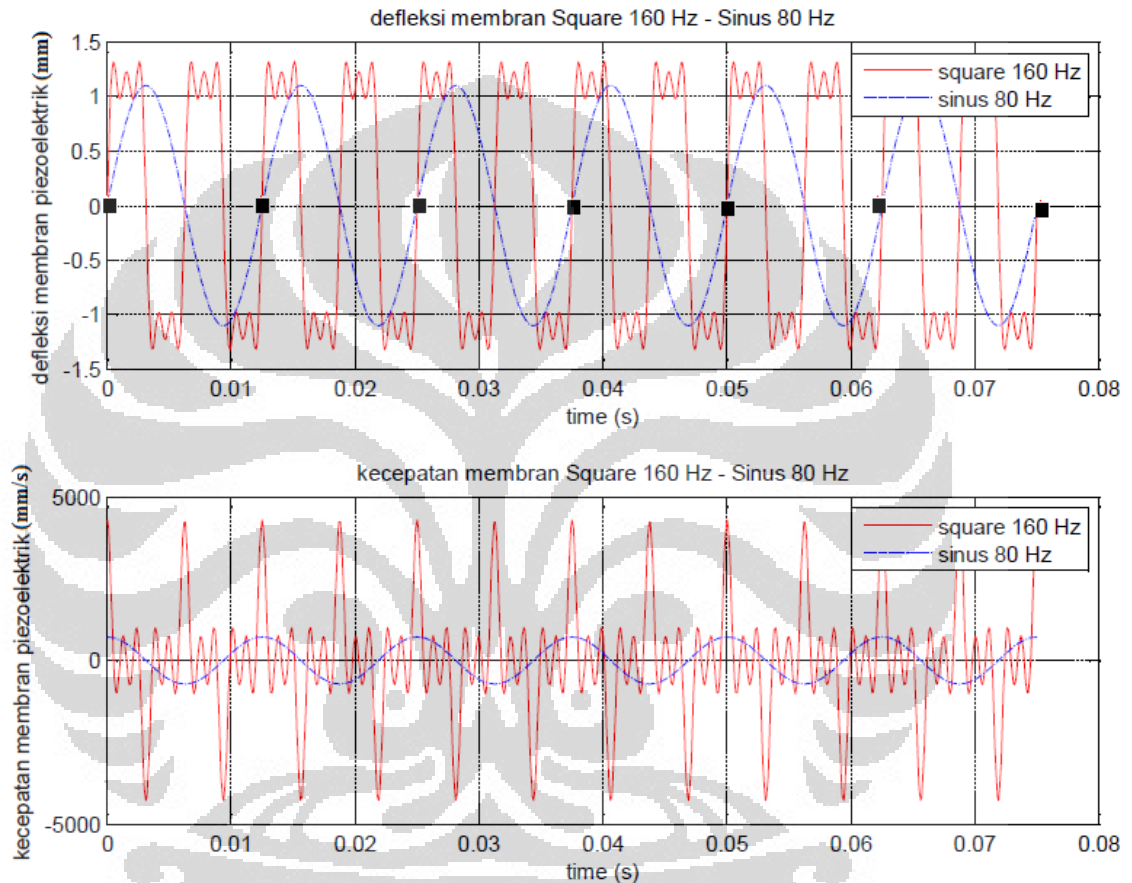
Grafik fungsi *square* 120Hz-sinus 160Hz diperlihatkan pada gambar 4.6. karakteristiknya adalah saat gelombang sinusoidal sudah beresilasi 4 kali, gelombang *square* baru beresilasi 3 kali. Potongan waktu simulasi terdiri dari 7 bagian yaitu $0/6 T$, $1/6 T$, $2/6 T$, $3/6 T$, $4/6 T$, $5/6 T$, dan $6/6 T$.



Gambar 4.6 gelombang *Square* 120Hz-Sinus 160Hz

vii. Variasi *square* 160Hz-sinus 80Hz

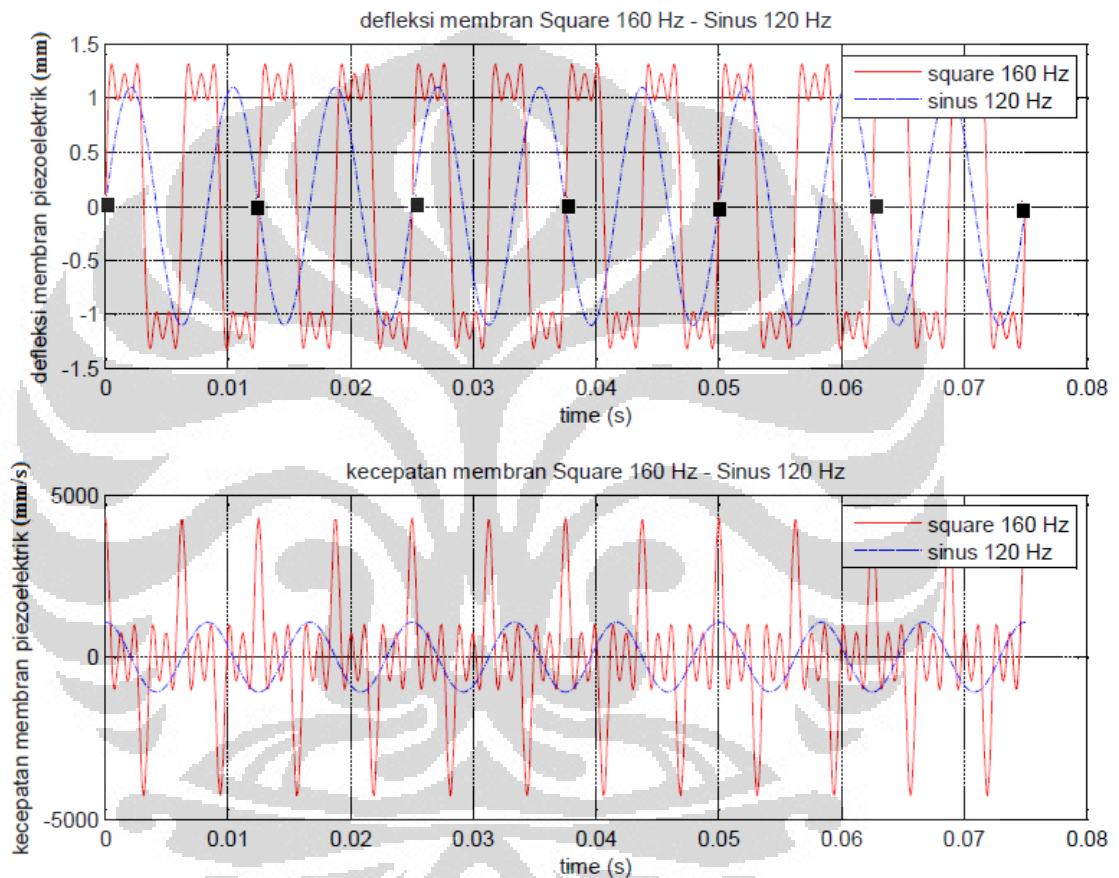
Grafik fungsi *square* 160Hz-sinus 80Hz diperlihatkan pada gambar 4.7. karakteristiknya adalah saat gelombang *square* sudah beresilasi 2 kali, gelombang sinusoidal baru beresilasi 1 kali. Dalam simulasi CFD dibagi atas 7 bagian yaitu $0/6 T$, $1/6 T$, $2/6 T$, $3/6 T$, $4/6 T$, $5/6 T$, dan $6/6 T$.



Gambar 4.7 gelombang *Square* 160Hz-Sinus 80Hz

viii. Variasi *square* 160Hz-sinus 120Hz

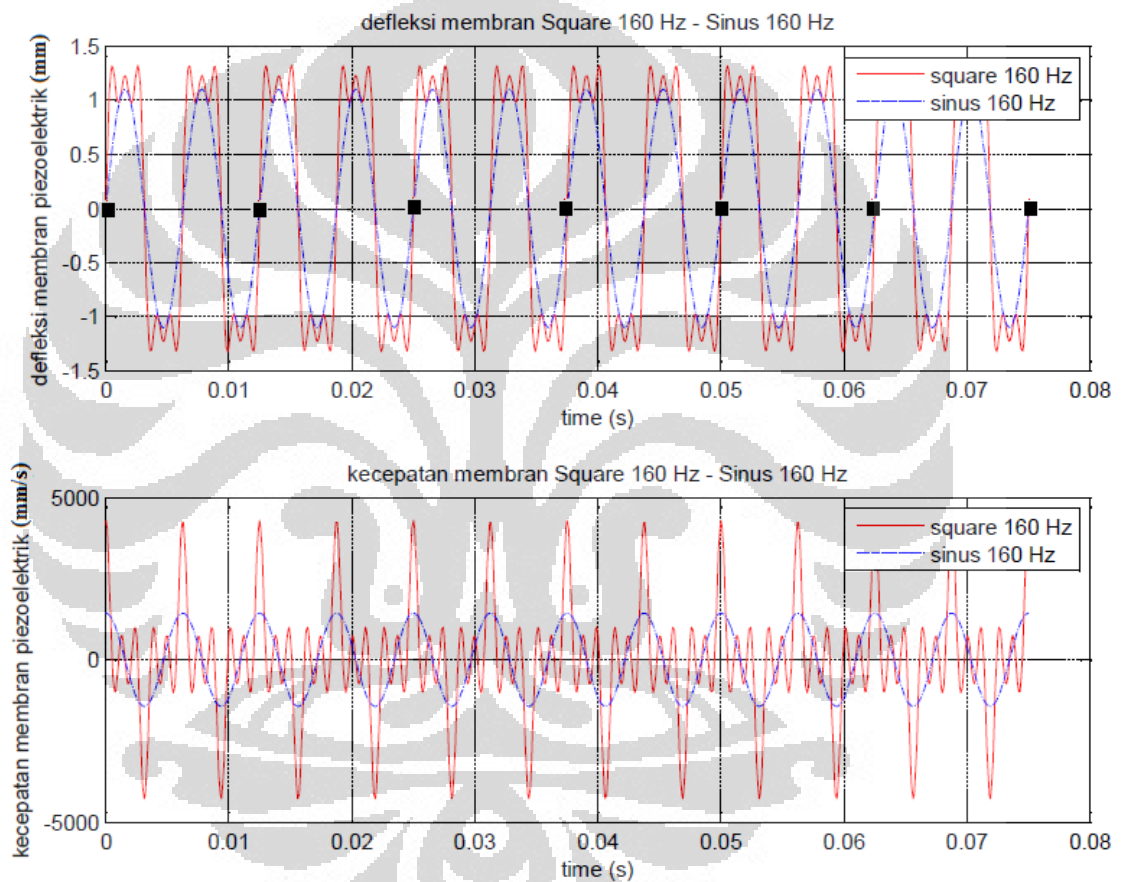
Grafik fungsi *square* 160Hz-sinus 120Hz diperlihatkan pada gambar 4.8. karakteristiknya adalah saat gelombang *square* sudah beresilasi 4 kali, gelombang sinusoidal baru beresilasi 3 kali. Potongan waktu simulasi terdiri dari 7 bagian yaitu $0/6 T$, $1/6 T$, $2/6 T$, $3/6 T$, $4/6 T$, $5/6 T$, dan $6/6 T$.



Gambar 4.8 gelombang *Square* 160Hz-Sinus 120Hz

ix. Variasi *square* 160Hz-sinus 160Hz

Grafik fungsi *square* 160Hz-sinus160Hz diperlihatkan pada gambar 4.9. karakteristiknya adalah kedua gelombang memiliki periode gelombang yang sama dan kombinasi frekuensi yang paling besar diantara variasi lain. Sehingga diperkirakan nilai turbulensinya adalah yang paling besar diantara variasi lainnya. Dalam simulasi CFD dibagi atas 7 bagian yaitu 0/6 T, 1/6 T, 2/6 T, 3/6 T, 4/6 T, 5/6 T, dan 6/6 T.



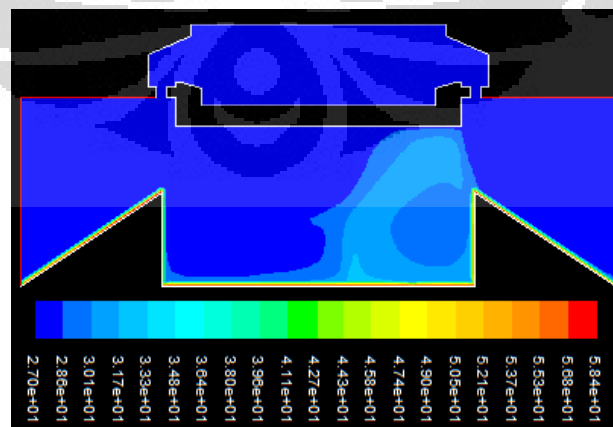
Gambar 4.9 gelombang *Square* 160Hz-Sinus 160Hz

4.1.1 Turbulent Intensity Contours

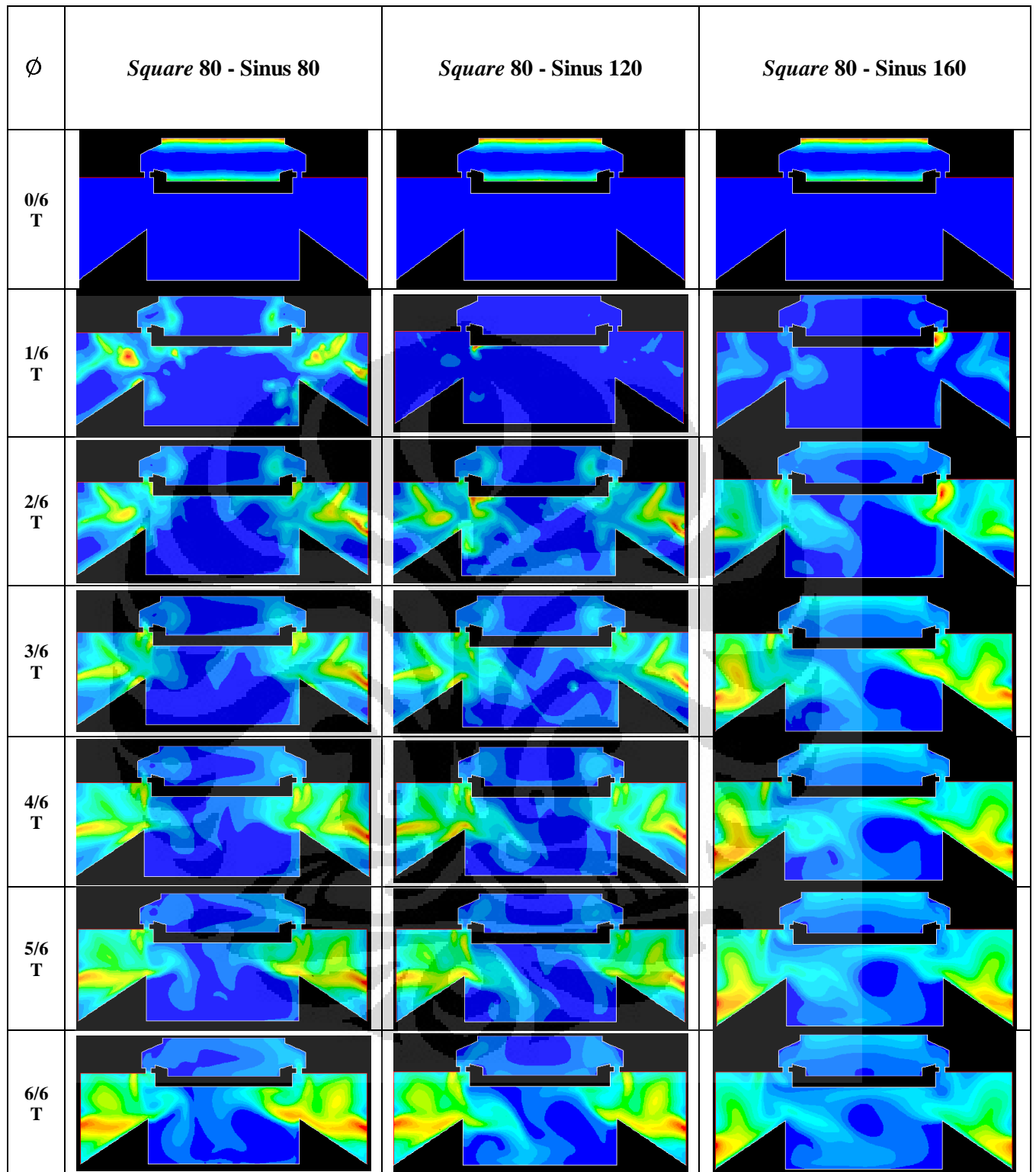
Pada simulasi ini, hal yang dilihat adalah profil intensitas turbulensi yang terbentuk akibat membran jet sintetik yang berosilasi. Setelah dilakukan simulasi aliran dengan menggunakan *software fluent*, maka dapat dilihat *turbulent intensity contours* yang dihasilkan selama satu periode kelipatan pesekutuan terbesar (T), $3/40$ s atau 0.075 s. Hasil simulasi menggunakan *software CFD Fluent* untuk *turbulent intensity contours* diperlihatkan pada tabel 4.1 , tabel 4.2 dan tabel 4.3.

Pada tabel 4.1 diperlihatkan hasil simulasi CFD untuk *turbulent intensity contours* pada variasi membran atas 80 Hz selama periode (T) $3/40$ s atau 0.075 s dengan interval pengambilan *frame* $1/6$ T.

Untuk Variasi *Square* 80 Hz – sinus 80 Hz, dalam satu interval *frame* membran atas dan membran bawah sama-sama telah menempuh satu gelombang penuh. Sehingga dalam satu periode simulasi (T = $3/40$ s), membran atas dan bawah telah menempuh 6 gelombang penuh. Variasi ini merupakan variasi dengan intensitas turbulensi yang paling kecil dibandingkan yang lain. Intensitas turbulensi saat satu interval pertama mencapai maksimum pada daerah sebelah kiri dari *heated wall* yaitu sebesar $5.02E+4$. Sedangkan intensitas turbulensi maksimum pada satu periode simulasi berada di sekitar orifis dengan nilai sebesar $4.7E+4$. Pola persebaran suhu di sekitar *heated wall* dalam satu simulasi juga belum merata, hanya di sekitar bagian kanan *heated wall* seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.10.



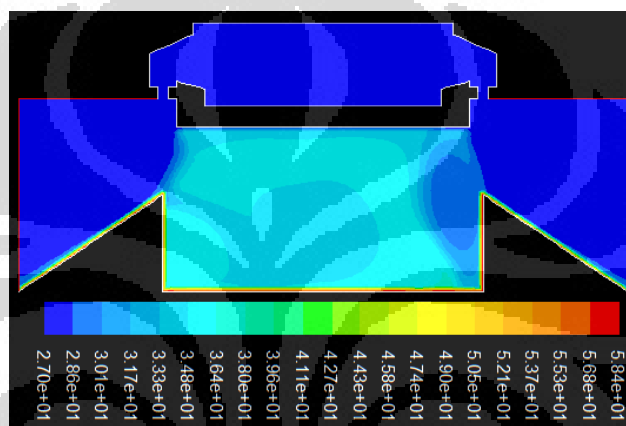
Gambar 4.10 *Frame* simulasi CFD untuk kontur temperatur statik variasi *Square* 80 Hz – sinus 80 Hz selama $3/40$ s



Tabel 4.1 *Turbulent Intensity Contours* pada frekuensi membran atas 80 Hz

Untuk Variasi *Square 80 Hz – sinus 120 Hz*, dalam satu interval simulasi, membran atas telah mencapai satu gelombang *square* penuh saat membran

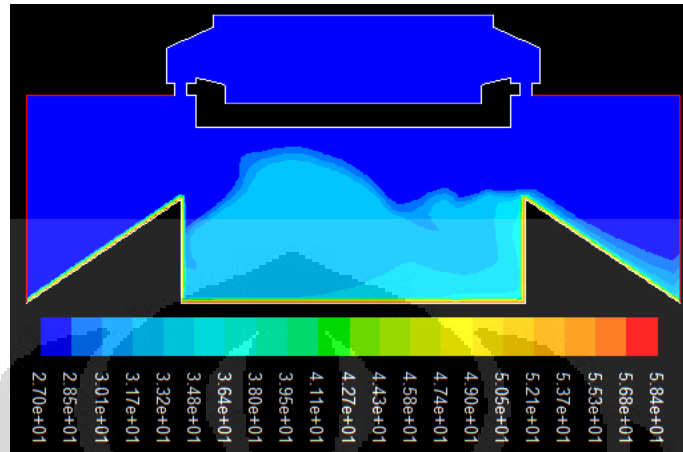
bawah sudah mencapai $1 \frac{1}{2}$ gelombang sinusoidal. Selama satu periode simulasi ($T= 3/40$ s), membran atas menempuh 6 gelombang *square* penuh sedangkan membran bawah telah menempuh 9 gelombang sinusoidal penuh. Pada satu interval pertama, nilai intensitas turbulensi dari variasi ini maksimal pada daerah membran bawah bagian kiri dengan nilai sebesar $6.0E+5$. Pada satu periode simulasi, intensitas turbulensi tertinggi ditemukan pada daerah sekitar orifis dengan nilai sebesar $4.29E+4$. Pola penyebaran suhu akibat jet sintetis dalam satu periode simulasi terlihat paling rata diantara variasi lain membran atas 80 Hz seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.11.



Gambar 4.11 *Frame* simulasi CFD untuk kontur temperatur statik variasi *Square* 80 Hz – sinus 120 Hz selama $3/40$ s

Untuk Variasi *Square* 80 Hz – sinus 160 Hz, dalam satu interval simulasi, membran atas telah mencapai satu gelombang *square* penuh saat membran bawah sudah mencapai 2 gelombang sinusoidal. Selama satu periode simulasi ($T= 3/40$ s), membran atas menempuh 6 gelombang *square* penuh sedangkan membran bawah telah menempuh 12 gelombang sinusoidal penuh. Pada satu interval pertama, nilai intensitas turbulensi dari variasi ini maksimal pada daerah bagian orifis sebelah kanan dengan nilai sebesar $1.35E+5$, letak intensitas turbulensi pada variasi bergeser ke bawah bila dibandingkan dengan variasi membran atas 80 Hz yang lain. Pada satu periode simulasi, intensitas turbulensi tertinggi ditemukan pada daerah sekitar *heated wall* dengan nilai sebesar $6.2E+4$. Pola penyebaran suhu akibat jet sintetis dalam satu periode

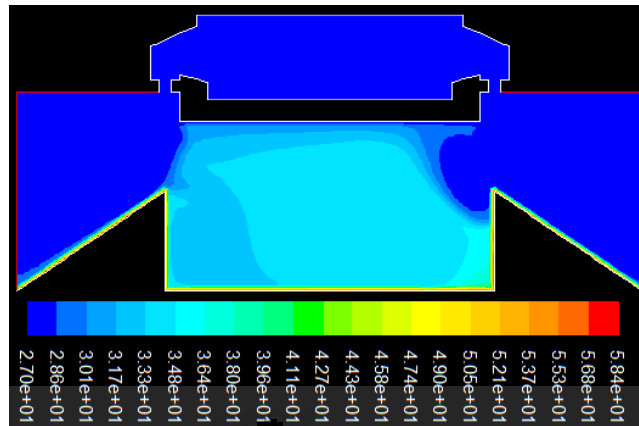
simulasi terlihat cukup rata tetapi tidak lebih rata dibandingkan variasi *square* 80 Hz-sinus 120Hz seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.12.



Gambar 4.12 *Frame* simulasi CFD untuk kontur temperatur statik variasi *Square* 80 Hz – sinus 160 Hz selama 3/40 s

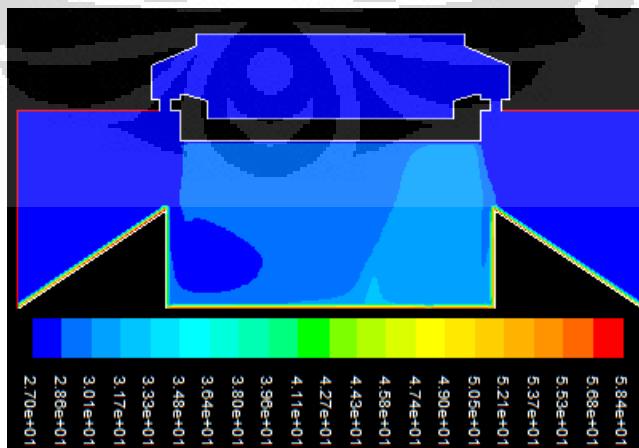
Pada tabel 4.2 diperlihatkan hasil simulasi CFD untuk *turbulent intensity contours* pada variasi membran atas 120 Hz selama periode (T) 3/40 s atau 0.075 s dengan interval pengambilan *frame* 1/6 T.

Untuk Variasi *Square* 120 Hz – sinus 80 Hz, dalam satu interval simulasi, membran atas telah mencapai 1 1/2 gelombang *square* penuh saat membran bawah sudah mencapai 1 gelombang sinusoidal. Selama satu periode simulasi (T= 3/40 s), membran atas menempuh 9 gelombang *square* penuh sedangkan membran bawah telah menempuh 6 gelombang sinusoidal penuh. Pada satu interval pertama, nilai intensitas turbulensi dari variasi ini maksimal pada daerah bagian kanan bawah pada *heated wall* dengan nilai sebesar 1.71E+5. Pada satu periode simulasi, intensitas turbulensi tertinggi ditemukan pada daerah sekitar *heated wall* dengan nilai sebesar 5.93E+4. Pola penyebaran suhu akibat jet sintetik dalam satu periode simulasi terlihat paling rata diantara variasi lain membran atas 120 Hz seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.13.

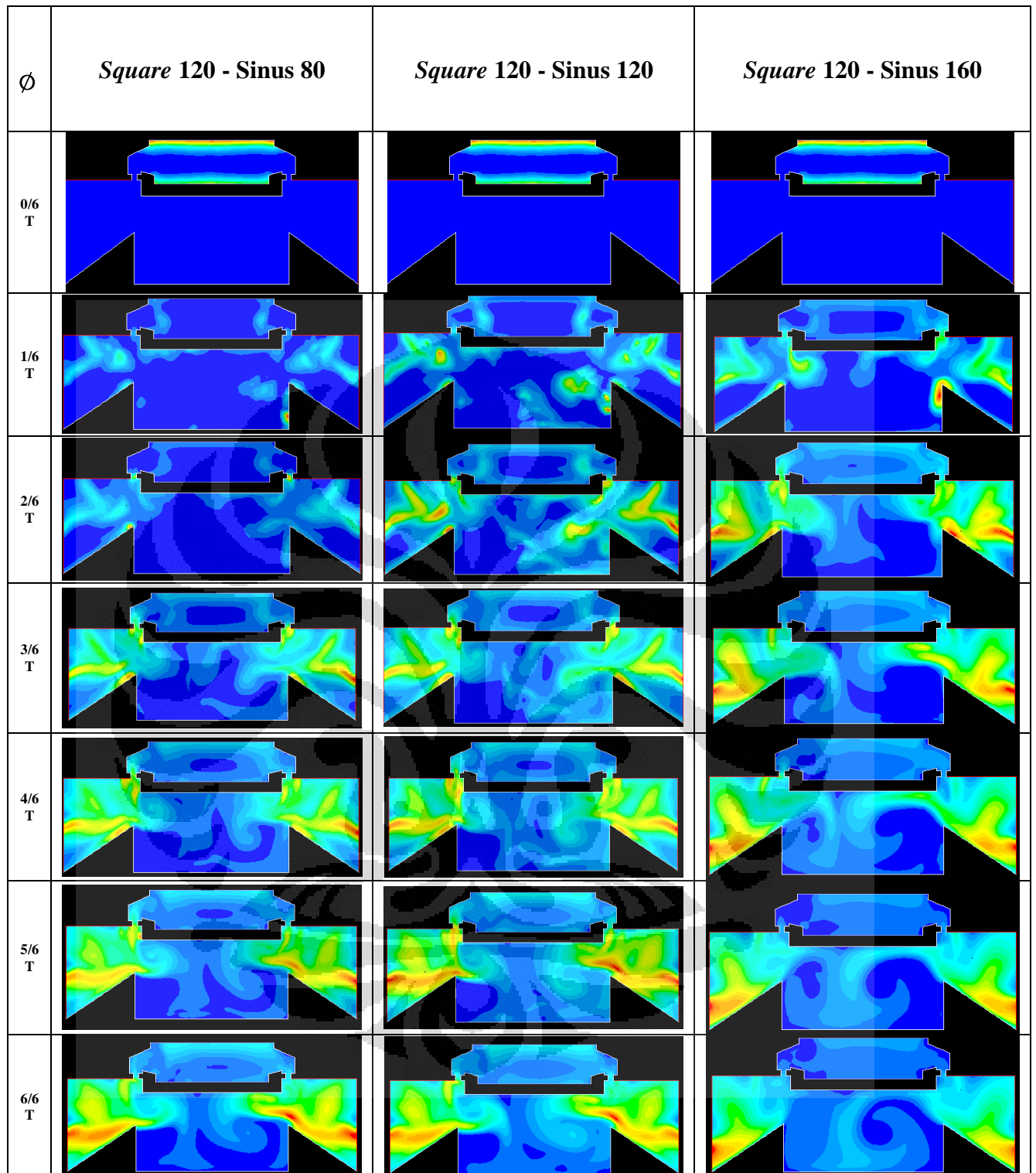


Gambar 4.13 *Frame* simulasi CFD untuk kontur temperatur statik variasi *Square* 120 Hz – sinus 80 Hz selama 3/40 s

Untuk Variasi *Square* 120 Hz – sinus 120 Hz, dalam satu interval *frame* membran atas dan membran bawah sama-sama telah menempuh $1 \frac{1}{2}$ gelombang penuh. Sehingga dalam satu periode simulasi ($T = 3/40$ s), membran atas dan bawah telah menempuh 9 gelombang penuh. Intensitas turbulensi saat satu interval pertama mencapai maksimum pada daerah sekitar *heated wall* yaitu sebesar $8.76E+4$. Sedangkan intensitas turbulensi maksimum pada satu periode simulasi berada di sekitar orifis dengan nilai sebesar $5.97E+4$ tetapi dengan penyebaran turbulensi yang cukup merata di sekitar *heated wall* sekitar $4.22E+4$. Pola penyebaran suhu di sekitar *heated wall* dalam satu simulasi juga belum merata, hanya di sekitar bagian kanan *heated wall* seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.14.

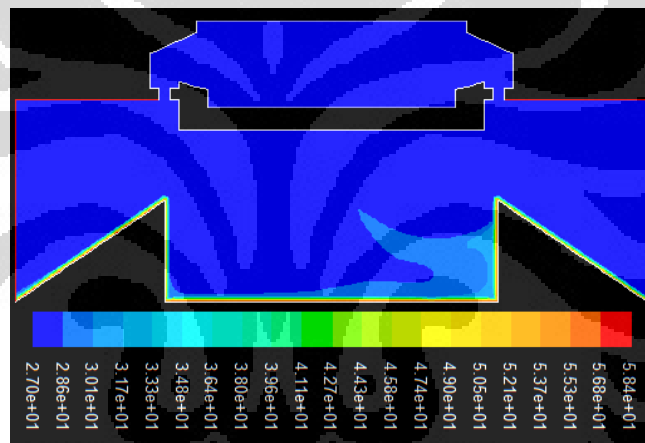


Gambar 4.14 *Frame* simulasi CFD untuk kontur temperatur statik variasi *Square* 120 Hz – sinus 120 Hz selama 3/40 s



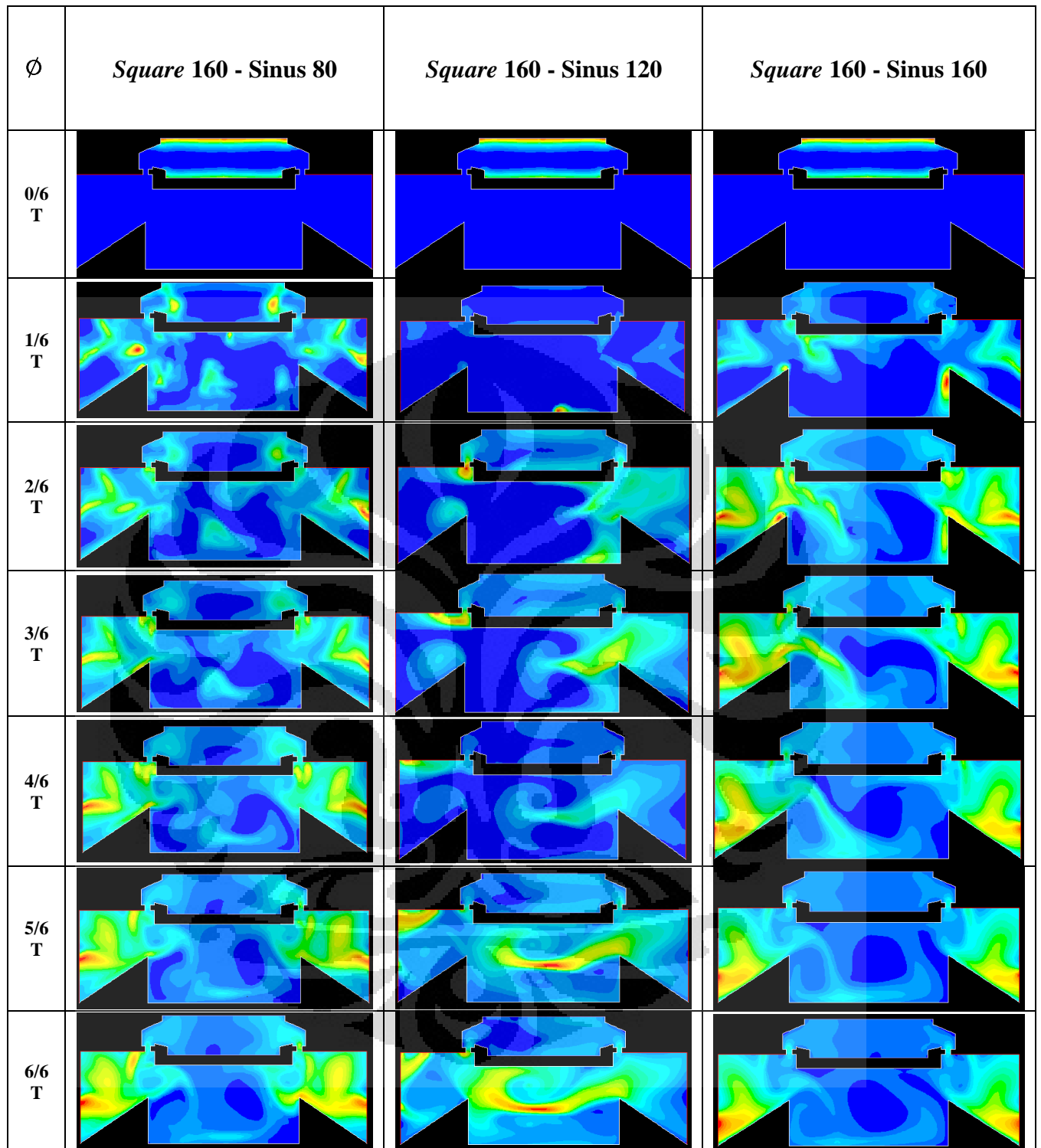
Tabel 4.2 *Turbulent Intensity Contours* pada frekuensi membran atas 120 Hz

Untuk Variasi *Square* 120 Hz – sinus 160 Hz, dalam satu interval simulasi, membran atas telah mencapai 1 ½ gelombang *square* saat membran bawah sudah mencapai 2 gelombang sinusoidal. Selama satu periode simulasi ($T=3/40$ s), membran atas menempuh 9 gelombang *square* penuh sedangkan membran bawah telah menempuh 12 gelombang sinusoidal penuh. Pada satu interval pertama, nilai intensitas turbulensi dari variasi ini maksimal pada daerah sebelah kanan *heated wall* dengan nilai sebesar $7.42E+4$. Pada satu periode simulasi, intensitas turbulensi tertinggi ditemukan pada daerah *heated wall* dengan nilai sebesar $9.15E+4$. Pola penyebaran suhu akibat jet sintetik dalam satu periode simulasi tidak merata, hanya ada pada bagian sebelah kanan *heated wall* saja seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.15.



Gambar 4.15 *Frame* simulasi CFD untuk kontur temperatur statik variasi *Square* 120 Hz – sinus 160 Hz selama $3/40$ s

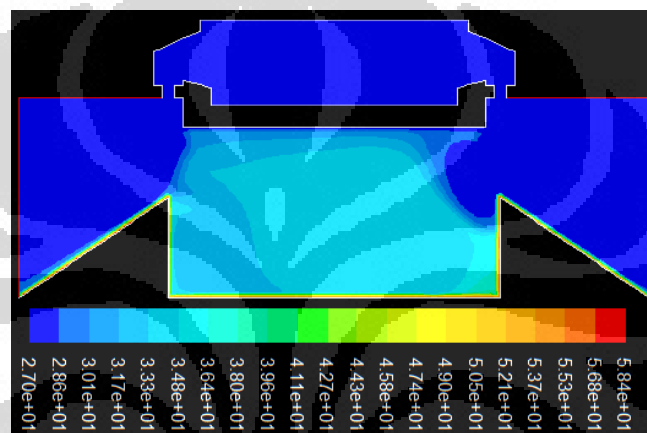
Pada tabel 4.3 diperlihatkan hasil simulasi CFD untuk *turbulent intensity contours* pada variasi membran atas 160 Hz selama periode (T) $3/40$ s atau 0.075 s dengan interval pengambilan *frame* $1/6$ T .



Tabel 4.3 *Turbulent Intensity Contours* pada frekuensi membran atas 160 Hz

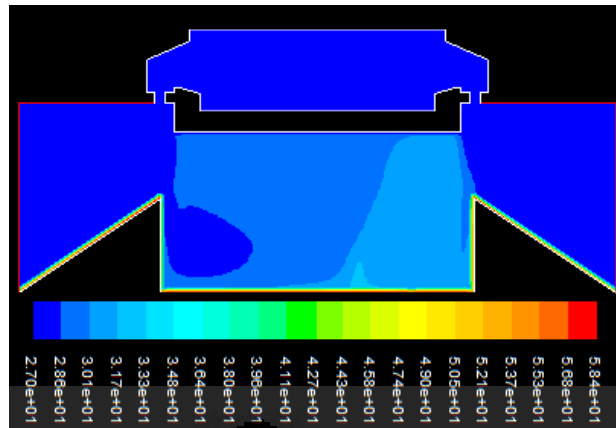
Untuk Variasi *Square 160 Hz* – sinus 80 Hz, dalam satu interval simulasi, membran atas telah mencapai 2 gelombang *square* penuh saat membran bawah baru mencapai 1 gelombang sinusoidal. Selama satu periode simulasi

($T = 3/40$ s), membran atas menempuh 12 gelombang *square* penuh sedangkan membran bawah telah menempuh 6 gelombang sinusoidal penuh. Pada satu interval pertama, nilai intensitas turbulensi dari variasi ini maksimal pada daerah sekitar kaviti dan sekitar *heated wall* dengan nilai sebesar $4.58E+4$. Pada satu periode simulasi, intensitas turbulensi tertinggi ditemukan pada daerah sekitar *heated wall* dengan nilai sebesar $3.76E+5$. Pola penyebaran suhu akibat jet sintetik dalam satu periode simulasi terlihat yang peling rata bila dibandingkan dengan variasi membran atas 160 Hz seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.16.



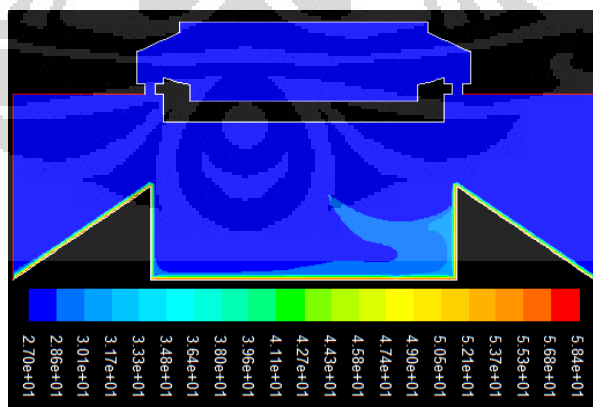
Gambar 4.16 *Frame* simulasi CFD untuk kontur temperatur statik variasi *Square* 160 Hz – sinus 80 Hz selama $3/40$ s

Untuk Variasi *Square* 160 Hz – sinus 120 Hz, dalam satu interval simulasi, membran atas telah mencapai 2 gelombang *square* saat membran bawah sudah mencapai $1 \frac{1}{2}$ gelombang sinusoidal. Selama satu periode simulasi ($T = 3/40$ s), membran atas menempuh 12 gelombang *square* penuh sedangkan membran bawah telah menempuh 9 gelombang sinusoidal penuh. Pada satu interval pertama, nilai intensitas turbulensi dari variasi ini maksimal pada daerah dekat *heated wall* dengan nilai sebesar $4.18E+5$. Pada satu periode simulasi, intensitas turbulensi tertinggi ditemukan pada daerah sekitar *heated wall* bagian tengah dengan nilai sebesar $1.88E+5$. Pola penyebaran suhu akibat jet sintetik dalam satu periode simulasi cukup merata tetapi tidak lebih merata bila dibandingkan variasi *square* 160Hz-sinus 80Hz seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.17.



Gambar 4.17 *Frame* simulasi CFD untuk kontur temperatur statik variasi *Square* 160 Hz – sinus 20 Hz selama 3/40 s

Untuk Variasi *Square* 160 Hz – sinus 160 Hz, dalam satu interval *frame* membran atas dan membran bawah sama-sama telah menempuh 2 gelombang penuh. Sehingga dalam satu periode simulasi ($T = 3/40$ s), membran atas dan bawah telah menempuh 12 gelombang penuh. Intensitas turbulensi saat satu interval pertama mencapai maksimum pada daerah sekitar *heated wall* sebelah kanan yaitu sebesar $6.09E+4$. Sedangkan intensitas turbulensi maksimum pada satu periode simulasi berada di *heated wall* dengan nilai sebesar $6.35E+4$. Pola penyebaran suhu di sekitar *heated wall* dalam satu simulasi juga belum merata, hanya di sekitar bagian kanan *heated wall* seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.18.



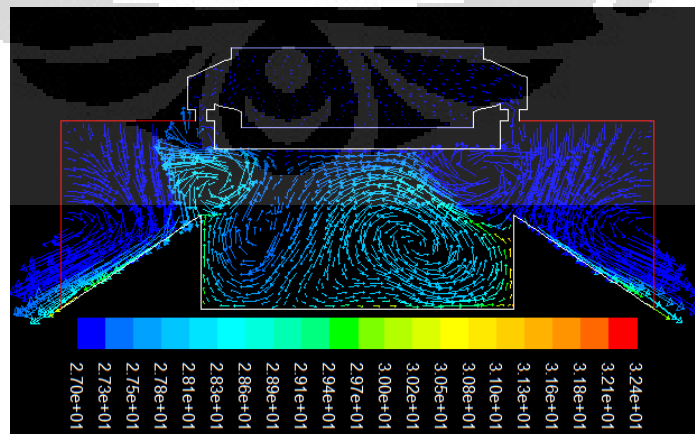
Gambar 4.18 *Frame* simulasi CFD untuk kontur temperatur statik variasi *Square* 160 Hz – sinus 160 Hz selama 3/40 s

4.1.2 Vorticity contours

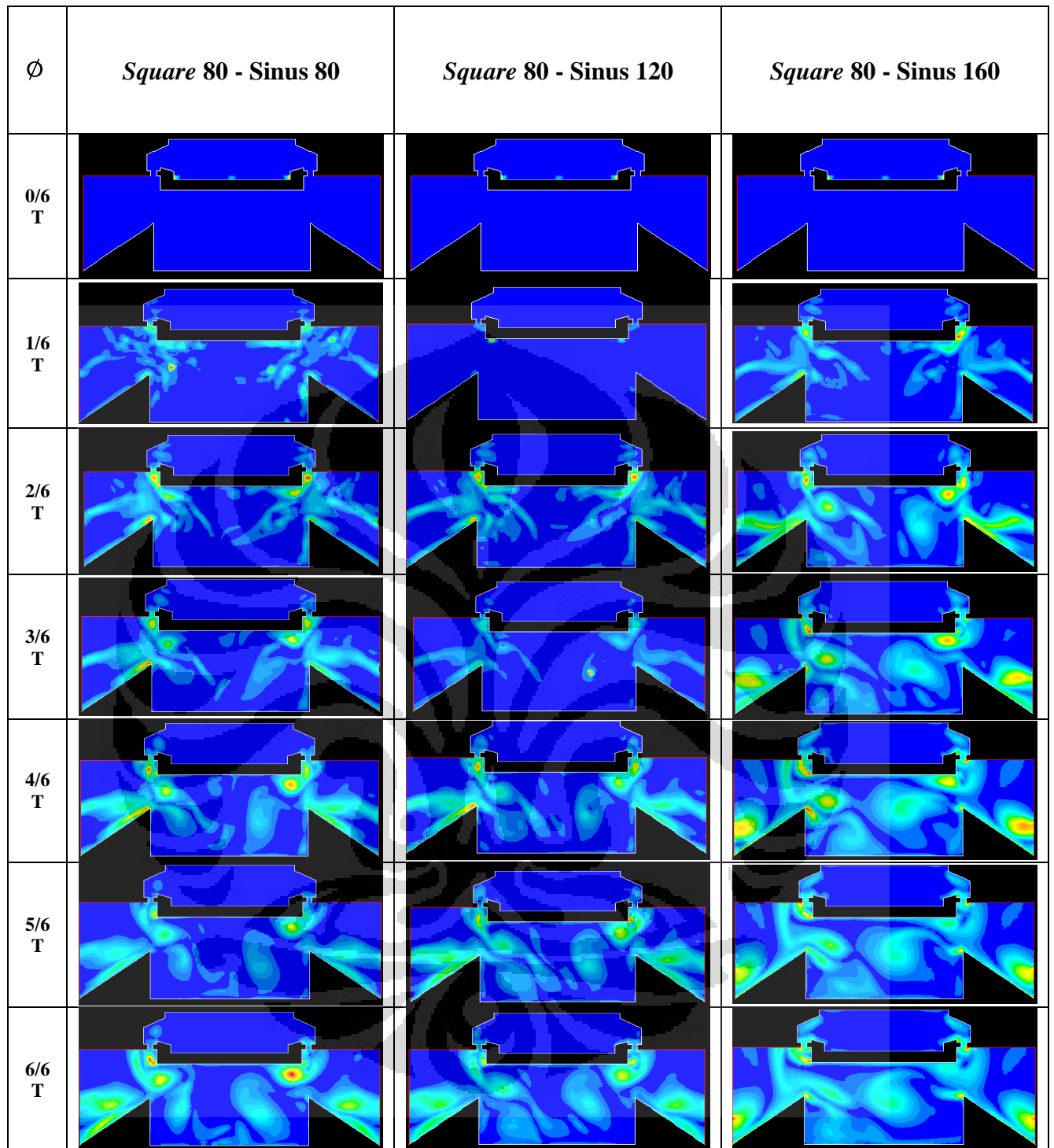
Pada simulasi ini, hal yang dilihat adalah profil vortisitas yang terbentuk akibat membran jet sintetik yang berosilasi. Setelah dilakukan simulasi aliran dengan menggunakan *software fluent*, maka dapat dilihat *vorticity contours* yang dihasilkan selama satu periode kelipatan persekutuan terkecil (T) yaitu $3/40$ s atau 0.075 s. Hasil simulasi menggunakan software CFD *Fluent* untuk *turbulent intensity contours* diperlihatkan pada tabel 4.4, tabel 4.5, dan tabel 4.6.

Pada tabel 4.4 diperlihatkan hasil simulasi CFD untuk *vorticity contours* pada variasi membran atas 80 Hz selama periode (T) $3/40$ s atau 0.075 s dengan interval pengambilan *frame* $1/6$ T.

Untuk Variasi *Square* 80 Hz – sinus 80 Hz, vortisitas saat satu interval pertama mencapai maksimum pada daerah sekitar orifis yaitu sebesar $9.36E+6$ dengan beberapa vortisitas yang cukup besar di bagian *heated wall* kira-kira sebesar $5.15E+6$. Vortisitas maksimum pada satu periode simulasi berada di sekitar orifis dengan nilai sebesar $1.05E+6$ dengan penyebaran vortisitas yang cukup merata di sekitar *heated wall* sekitar $5.27E+5$. Suhu udara bergerak di sekitar *heater* mengalami kenaikan dibandingkan suhu ruang dengan pola turbulensi seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.19, suhu udara bergerak tersebut memiliki nilai maksimum 32.4°C dengan suhu daerah *heated wall* dominan sekitar 28.9°C .

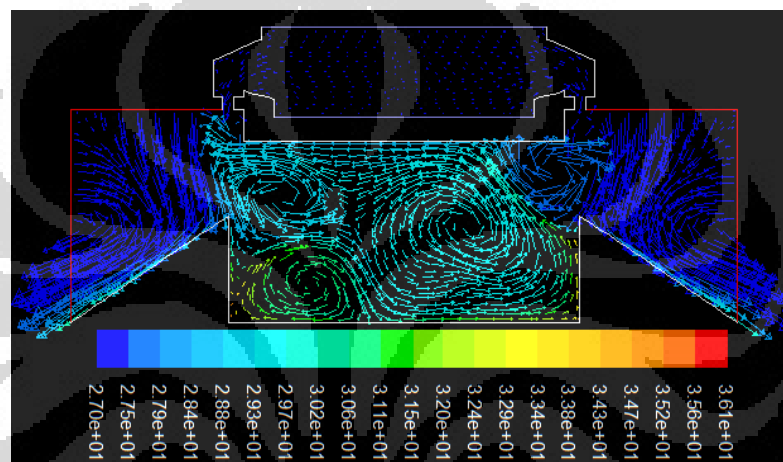


Gambar 4.19 *Frame* simulasi CFD untuk vektor kecepatan dengan kontur temperatur variasi *Square* 80 Hz – sinus 80 Hz selama $3/40$ s



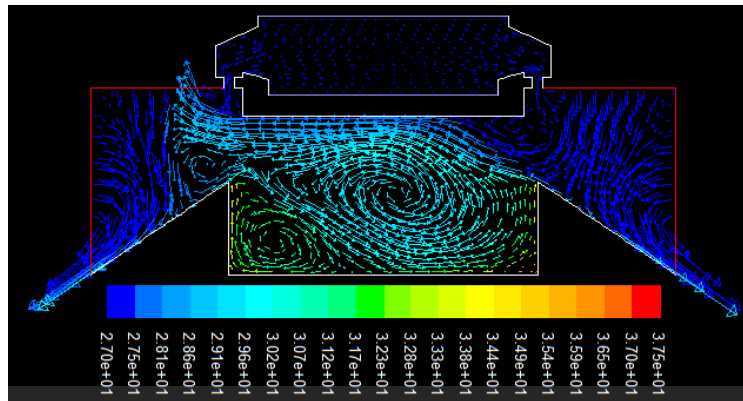
Tabel 4.4 *Vorticity Contours* pada frekuensi membran atas 80 Hz

Untuk Variasi *Square* 80 Hz – sinus 120 Hz, vortisitas saat satu interval pertama mencapai maksimum pada daerah sebelah kiri atas *heated wall* yaitu sebesar $4.68E+7$. Vortisitas maksimum pada satu periode simulasi berada di sekitar orifis dengan nilai sebesar $1.02E+6$ dengan penyebaran vortisitas yang cukup merata di sekitar *heated wall* sekitar $5.1E+5$. Suhu udara bergerak di sekitar *heater* mengalami kenaikan dibandingkan suhu ruang dengan pola turbulensi seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.20, suhu udara bergerak tersebut memiliki nilai maksimum 36.1°C dengan suhu daerah *heated wall* dominan sekitar 28.4°C .



Gambar 4.20 *Frame* simulasi CFD untuk vektor kecepatan dengan kontur temperatur variasi *Square* 80 Hz – sinus 120 Hz selama $3/40$ s

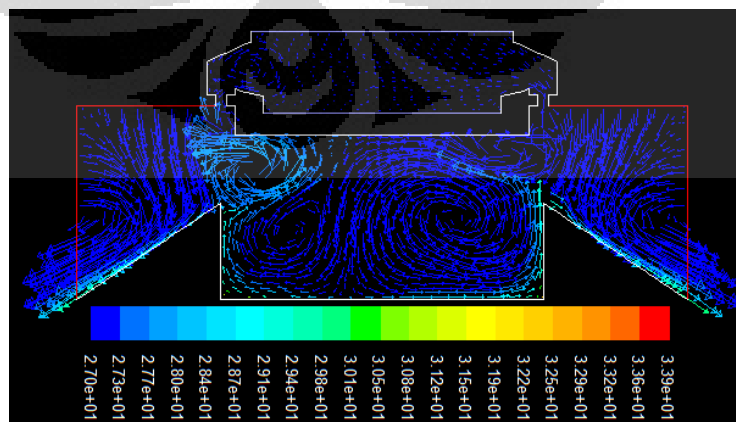
Untuk Variasi *Square* 80 Hz – sinus 160 Hz, vortisitas saat satu interval pertama mencapai maksimum pada daerah sebelah kiri bawah *heated wall* yaitu sebesar $3.47E+6$. Vortisitas maksimum pada satu periode simulasi berada di sekitar orifis dengan nilai sebesar $5.03E+5$ dengan penyebaran vortisitas yang di sekitar *heated wall* sekitar $3.52E+5$. Suhu udara bergerak di sekitar *heater* mengalami kenaikan dibandingkan suhu ruang dengan pola turbulensi seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.21, suhu udara bergerak tersebut memiliki nilai maksimum 37.5°C dengan suhu daerah *heated wall* dominan sekitar 30.7°C .



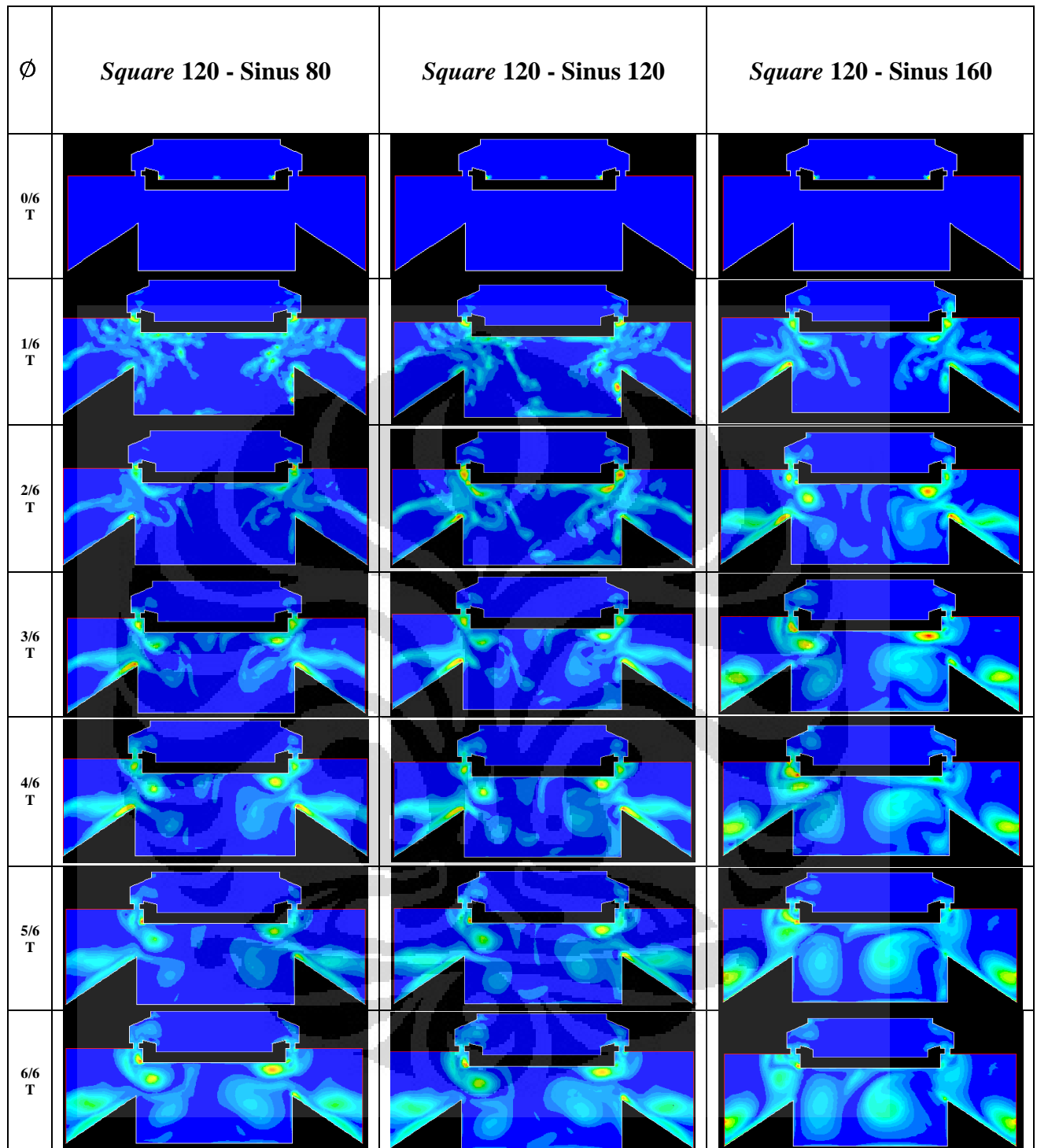
Gambar 4.21 *Frame* simulasi CFD untuk vektor kecepatan dengan kontur temperatur variasi *Square* 80 Hz – sinus 160 Hz selama 3/40 s

Pada tabel 4.5 diperlihatkan hasil simulasi CFD untuk *vorticity contours* pada variasi membran atas 120 Hz selama periode (T) 3/40 s atau 0.075 s dengan interval pengambilan *frame* 1/6 T.

Untuk Variasi *Square* 120 Hz – sinus 80 Hz, vortisitas saat satu interval pertama mencapai maksimum pada daerah sekitar orifis yaitu sebesar 9.3E+6. Vortisitas maksimum pada satu periode simulasi berada di sekitar orifis dengan nilai sebesar 1.67E+6 dengan penyebaran vortisitas yang cukup merata di sekitar *heated wall* sekitar 5.84E+5. Suhu udara bergerak di sekitar *heater* mengalami kenaikan dibandingkan suhu ruang dengan pola turbulensi seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.22, suhu udara bergerak tersebut memiliki nilai maksimum 33.9°C dengan suhu daerah *heated wall* dominan sekitar 27.7°C.

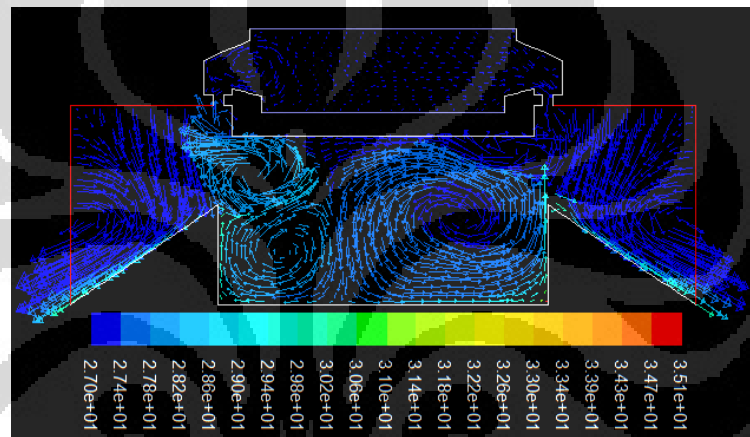


Gambar 4.22 *Frame* simulasi CFD untuk vektor kecepatan dengan kontur temperatur variasi *Square* 120 Hz – sinus 80 Hz selama 3/40 s



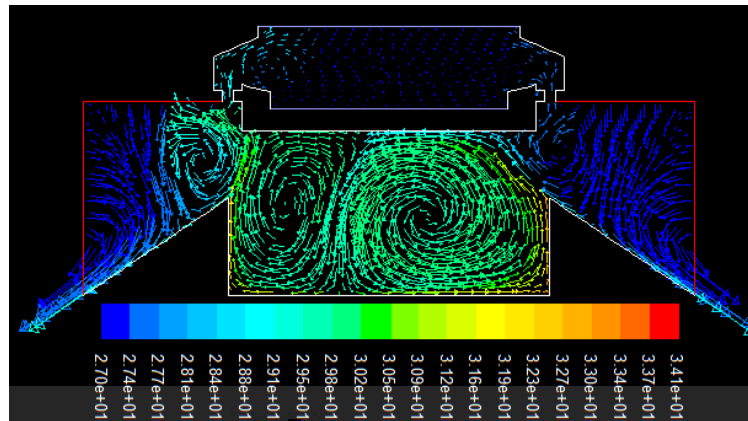
Tabel 4.5 *Vorticity Contours* pada frekuensi membran atas 120 Hz

Untuk Variasi *Square* 120 Hz – sinus 120 Hz, vortisitas saat satu interval pertama mencapai maksimum pada daerah sekitar *heated wall* yaitu sebesar $9.14\text{E}+6$ dengan beberapa vortisitas yang cukup besar di sekitar orifis kira-kira sebesar $6.85\text{E}+6$. Vortisitas maksimum pada satu periode simulasi berada di sekitar orifis dengan nilai sebesar $1.77\text{E}+6$ dengan penyebaran vortisitas yang cukup merata di sekitar *heated wall* sekitar $1.15\text{E}+6$. Suhu udara bergerak di sekitar *heater* mengalami kenaikan dibandingkan suhu ruang dengan pola turbulensi seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.23, suhu udara bergerak tersebut memiliki nilai maksimum 35.1°C dengan suhu daerah *heated wall* dominan sekitar 29.8°C .



Gambar 4.23 *Frame* simulasi CFD untuk vektor kecepatan dengan kontur temperatur variasi *Square* 120 Hz – sinus 120 Hz selama 3/40 s

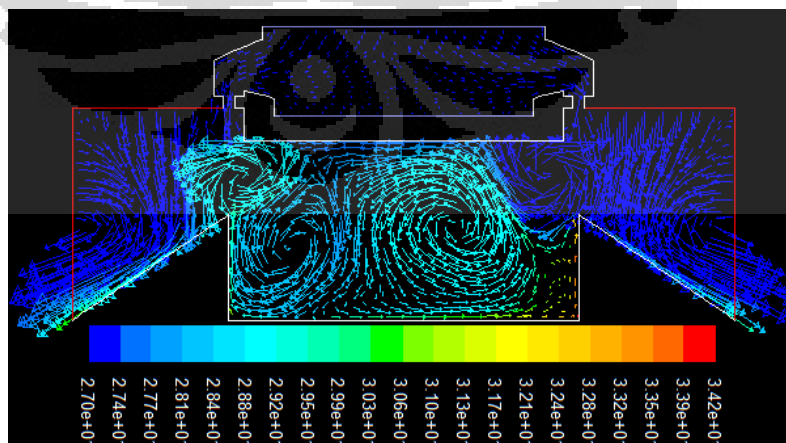
Untuk Variasi *Square* 120 Hz – sinus 160 Hz, vortisitas saat satu interval pertama mencapai maksimum pada atas *heated wall* yaitu sebesar $5.02\text{E}+6$ dengan beberapa vortisitas yang cukup besar di sekitar orifis kira-kira sebesar $2.76\text{E}+6$. Vortisitas maksimum pada satu periode simulasi berada di sekitar orifis dengan nilai sebesar $8.74\text{E}+5$. Suhu udara bergerak di sekitar *heater* mengalami kenaikan dibandingkan suhu ruang dengan pola turbulensi seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.24, suhu udara bergerak tersebut memiliki nilai maksimum 34.1°C dengan suhu daerah *heated wall* dominan sekitar 30.5°C .



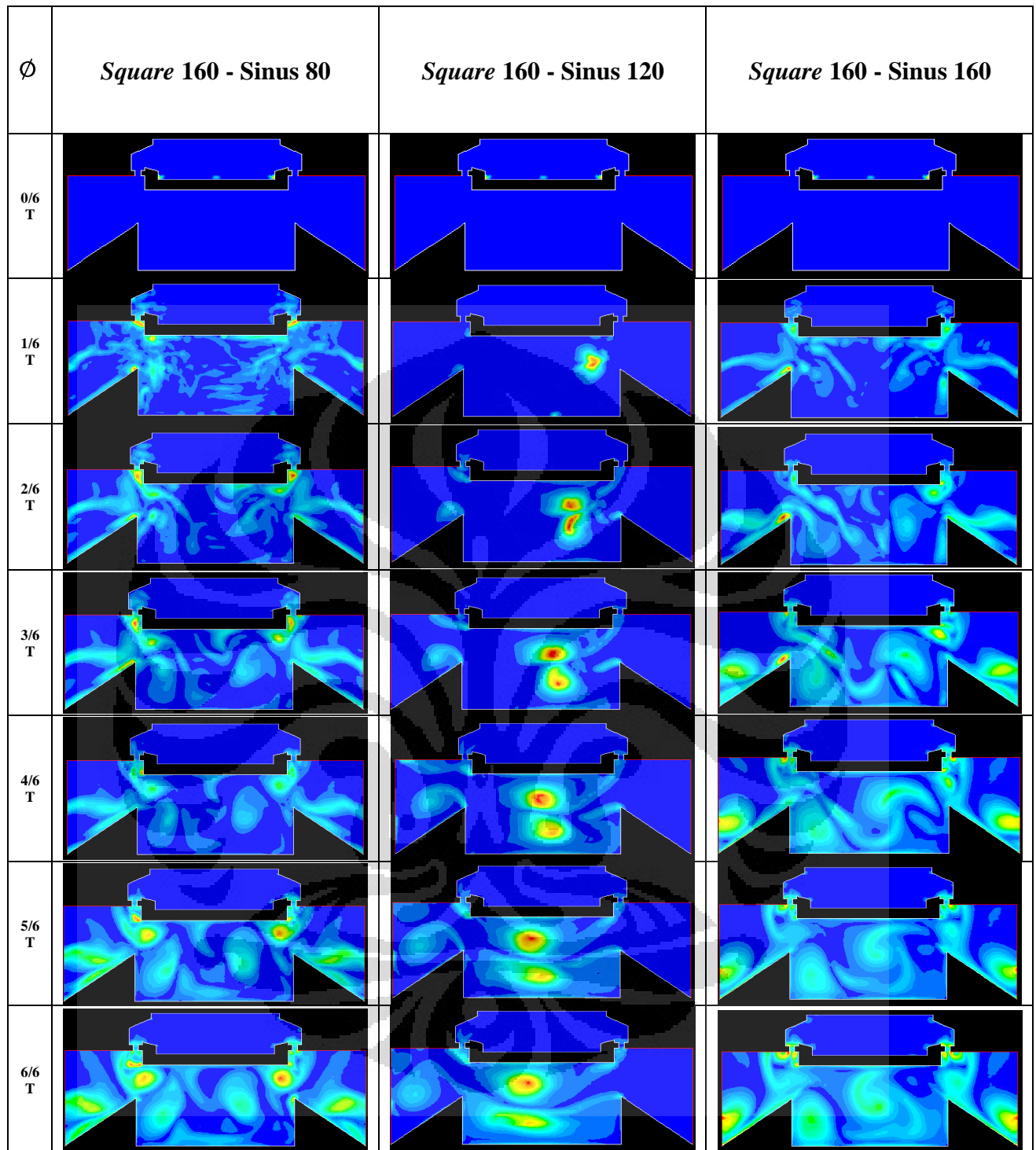
Gambar 4.24 *Frame* simulasi CFD untuk vektor kecepatan dengan kontur temperatur variasi *Square* 120 Hz – sinus 160 Hz selama 3/40 s

Pada tabel 4.6 diperlihatkan hasil simulasi CFD untuk *vorticity contours* pada variasi membran atas 160 Hz selama periode (T) 3/40 s atau 0.075 s dengan interval pengambilan *frame* 1/6 T.

Untuk Variasi *Square* 160 Hz – sinus 80 Hz, vortisitas saat satu interval pertama mencapai maksimum pada daerah sekitar orifis yaitu sebesar 4.5E+6. Vortisitas maksimum pada satu periode simulasi berada di sekitar *heated wall* dengan nilai sebesar 7.22E+5. Suhu udara bergerak di sekitar *heater* mengalami kenaikan dibandingkan suhu ruang dengan pola turbulensi seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.25, suhu udara bergerak tersebut memiliki nilai maksimum 34.2°C dengan suhu daerah *heated wall* dominan sekitar 29.9°C.

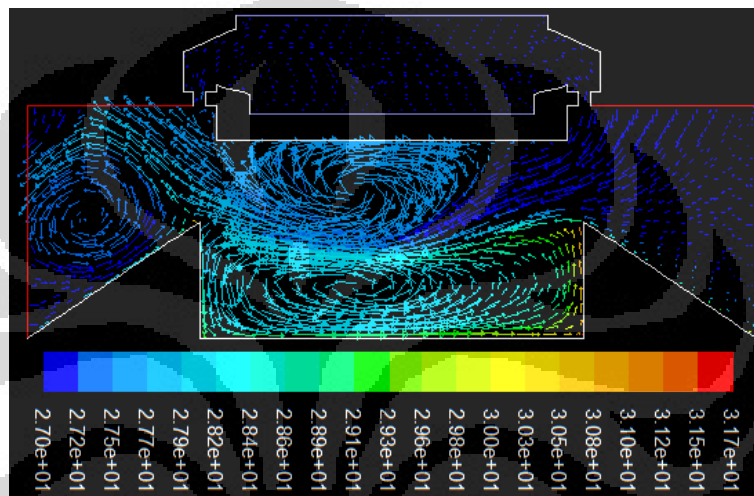


Gambar 4.25 *Frame* simulasi CFD untuk vektor kecepatan dengan kontur temperatur variasi *Square* 160 Hz – sinus 80 Hz selama 3/40 s



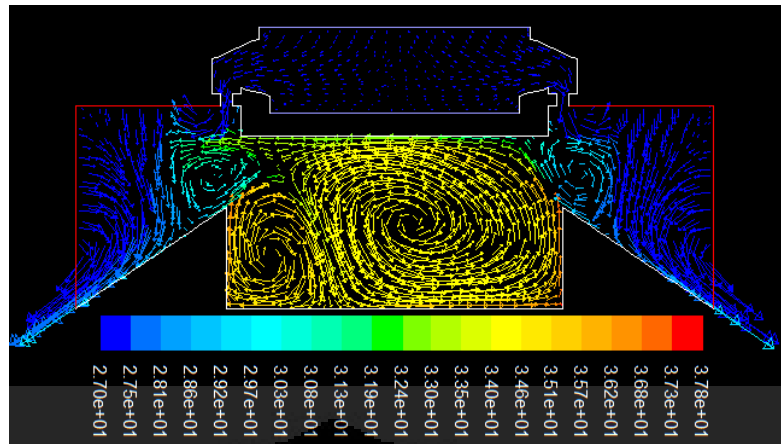
Tabel 4.6 *Vorticity Contours* pada frekuensi membran atas 160 Hz

Untuk Variasi *Square* 160 Hz – sinus 120 Hz, vortisitas saat satu interval pertama mencapai maksimum pada daerah bagian bawah *heated wall* yaitu sebesar $6.39E+7$. Vortisitas maksimum pada satu periode simulasi berada di sekitar *heated wall* bagian tengah dengan nilai sebesar $9.15E+6$. Suhu udara bergerak di sekitar *heater* mengalami kenaikan dibandingkan suhu ruang dengan pola turbulensi seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.26, suhu udara bergerak tersebut memiliki nilai maksimum 31.7°C dengan suhu daerah *heated wall* dominan sekitar 28.9°C .



Gambar 4.26 *Frame* simulasi CFD untuk vektor kecepatan dengan kontur temperatur variasi *Square* 160 Hz – sinus 120 Hz selama $3/40$ s

Untuk Variasi *Square* 160 Hz – sinus 160 Hz, vortisitas saat satu interval pertama mencapai maksimum pada daerah sekitar *heated wall* yaitu sebesar $4.04E+6$ dengan beberapa vortisitas yang cukup besar di sekitar orifis kira-kira sebesar $1.82E+6$. Vortisitas maksimum pada satu periode simulasi berada di sekitar orifis dan *heated wall* bagian samping dengan nilai sebesar $4.86E+5$. Suhu udara bergerak di sekitar *heater* mengalami kenaikan dibandingkan suhu ruang dengan pola turbulensi seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.24, suhu udara bergerak tersebut memiliki nilai maksimum 37.8°C dengan suhu daerah *heated wall* dominan sekitar 34°C .



Gambar 4.27 *Frame* simulasi CFD untuk vektor kecepatan dengan kontur temperatur variasi *Square* 160 Hz – sinus 160 Hz selama 3/40 s



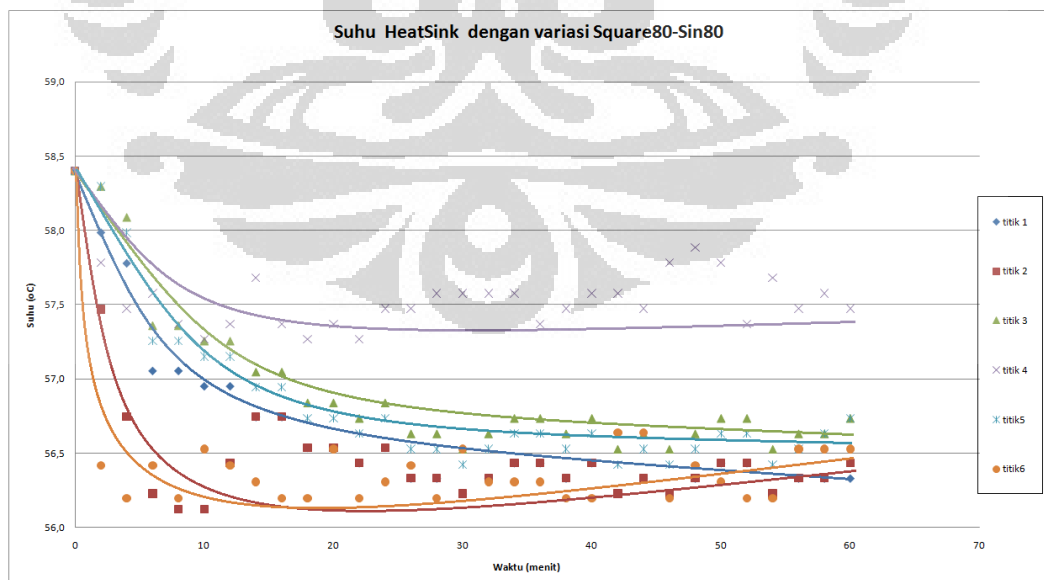
4.2 Analisa Data Eksperimental

Tahap eksperimental dilakukan untuk menganalisa efek pendinginan pada *heat sink* menggunakan jet sintetis dengan gelombang sinusoidal pada variasi frekuensi *square* pada membran atas-bawah *square* 80 Hz-Sinus 80 Hz, *square* 80 Hz-Sinus 120 Hz, *square* 80 Hz-Sinus 160 Hz, *square* 120 Hz-Sinus 80 Hz, *square* 120 Hz-Sinus 120 Hz, *square* 120 Hz-Sinus 160 Hz, *square* 160 Hz-Sinus 80 Hz, *square* 160 Hz-Sinus 120 Hz, *square* 160 Hz-Sinus 160 Hz dengan menggunakan *function generator* pada 6 (enam) titik termokopel. Analisa efek pendinginan pada *heat sink* ini direpresentasikan pada sebuah grafik perubahan *temperature* terhadap waktu dan juga grafik koefisien perpindahan kalor konveksi terhadap waktu. Pada tahap ini, dilakukan percobaan selama 60 menit dengan selang waktu akuisisi data 1 detik pada Digital multimeter dan 2 menit pada termometer 'Lutron' dan 'Victor'.

4.2.1 Analisa Perubahan Temperatur terhadap Waktu

4.2.1.1 Variasi *square* 80Hz – sinus 80Hz

Penurunan suhu *heat sink* selama satu jam pemanasan *heater* dengan fluks kalor tetap pada variasi *square* 80Hz – sinus 80Hz diperlihatkan pada grafik 4.1.

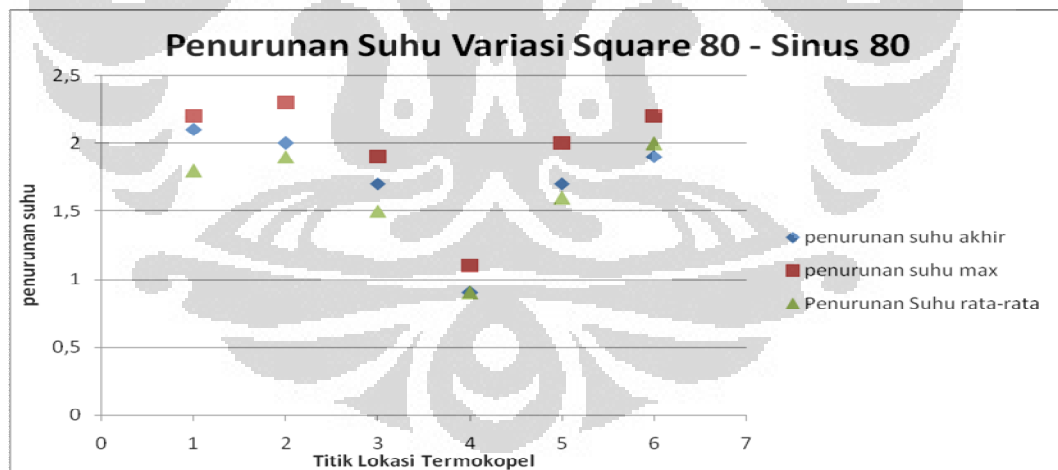


Grafik 4.1 Grafik hubungan suhu pada *heat sink* pada variasi frekuensi *Square* 80Hz-Sinus 80Hz

Penurunan suhu yang cukup tinggi terjadi kurang dari 10 menit pertama. Setelah itu penurunan suhu tidak signifikan bahkan cenderung sudah *steady*. Hal ini disebabkan oleh kaviti dari membran jet sintetik sudah mengalami peningkatan suhu, sehingga udara yang dikonveksikan dari orifis ke *heater* sudah mengalami kenaikan udara bila dibandingkan keadaan kaviti di 10 menit pertama. Penurunan suhu juga terlihat cukup tinggi, padahal bila dilihat dari bilangan *Reynolds*-nya, variasi ini memiliki bilangan *Reynolds* yang paling kecil di antara variasi lainnya.

Grafik penurunan suhu pada tiap titik termokopel dengan variasi *square* 80 Hz – Sinus 80 Hz ditunjukkan pada grafik 4.2.

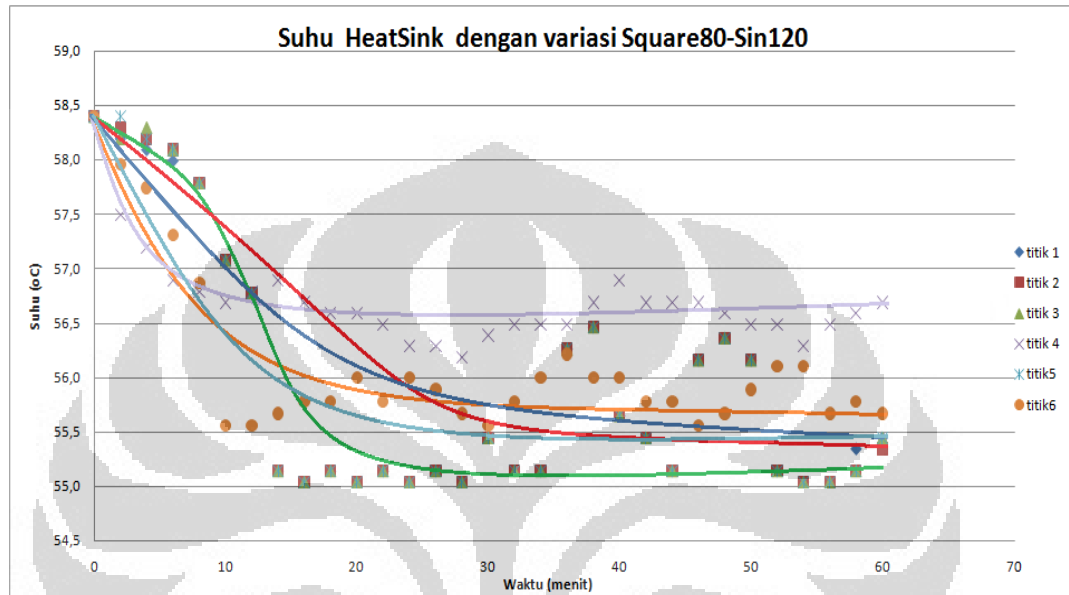
Melalui grafik ini, pola pendinginan dengan jet sintetik pada *heat sink* berbentuk tabung cenderung merata ke arah radial. Selain dikarenakan bentuk prototipe jet sintetik yang simetris, hal ini juga didukung oleh jarak antara orifis yang seragam sehingga cenderung membentuk wall jet yang teratur pada permukaan *heat sink* yang kemudian membuat pendinginan cenderung merata ke arah radial dengan jangkauan penurunan suhu akhir antar titik sebesar 1.2°C.



Grafik 4.2 Grafik hubungan penurunan suhu *heat sink* dari pembacaan 6(enam) titik termokopel pada variasi frekuensi *Square* 80Hz-Sinus 80Hz

4.2.1.2 Variasi *square* 80Hz – sinus 120Hz

Penurunan suhu *heat sink* selama satu jam pemanasan *heater* dengan fluks kalor tetap pada variasi *square* 80Hz – sinus 120Hz diperlihatkan pada grafik 4.3.



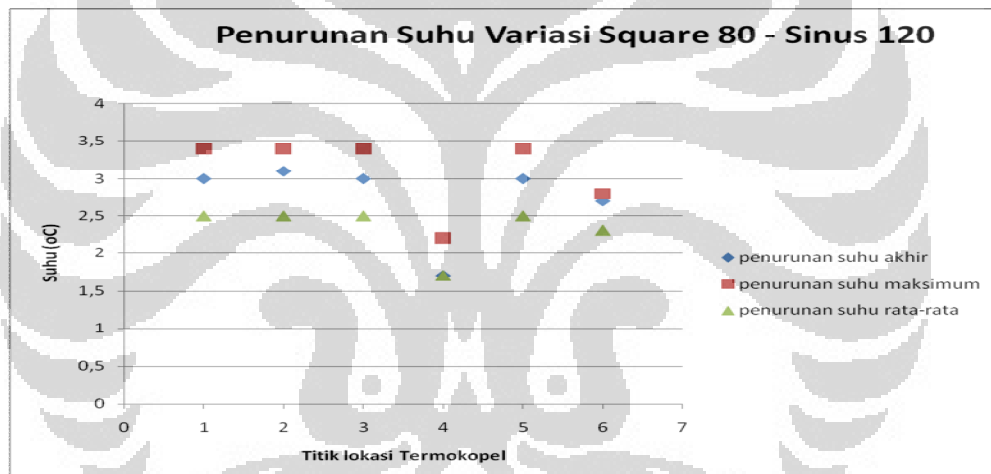
Grafik 4.3 Grafik hubungan suhu pada *heat sink* pada variasi frekuensi *Square* 120Hz-Sinus 80Hz

Penurunan suhu yang cukup tinggi terjadi saat 15 menit pertama. Setelah itu penurunan suhu tidak signifikan, dan cenderung naik-turun di titik 2, 3, dan 5. Hal ini disebabkan oleh kaviti dari membran jet sintetik sudah mengalami peningkatan suhu, sehingga udara yang dikonveksikan dari orifis ke *heater* sudah mengalami kenaikan udara bila dibandingkan keadaan kaviti di 15 menit pertama. Adapun pola naik turun dari beberapa titik setelah menit ke 30 dugaan awal disebabkan ada efek signifikan dari pola interferensi akibar perbedaan frekuensi osilasi membran. Menurut Gillespie, 2006, hal tersebut juga dimungkinkan karena adanya resirkulasi pada fluida pada jarak aksial rendah (dekat *heat sink*) yang cenderung menaikkan udara sekitar kaviti sehingga menurunkan nilai penurunan suhu. Penurunan suhu tertinggi terdapat pada variasi ini, walaupun

bilangan *Reynolds* dari variasi ini bukan merupakan bilangan *Reynolds* paling tinggi di antara variasi lain.

Grafik penurunan suhu pada tiap titik termokopel dengan variasi *square* 80 Hz – Sinus 120 Hz ditunjukkan pada grafik 4.4.

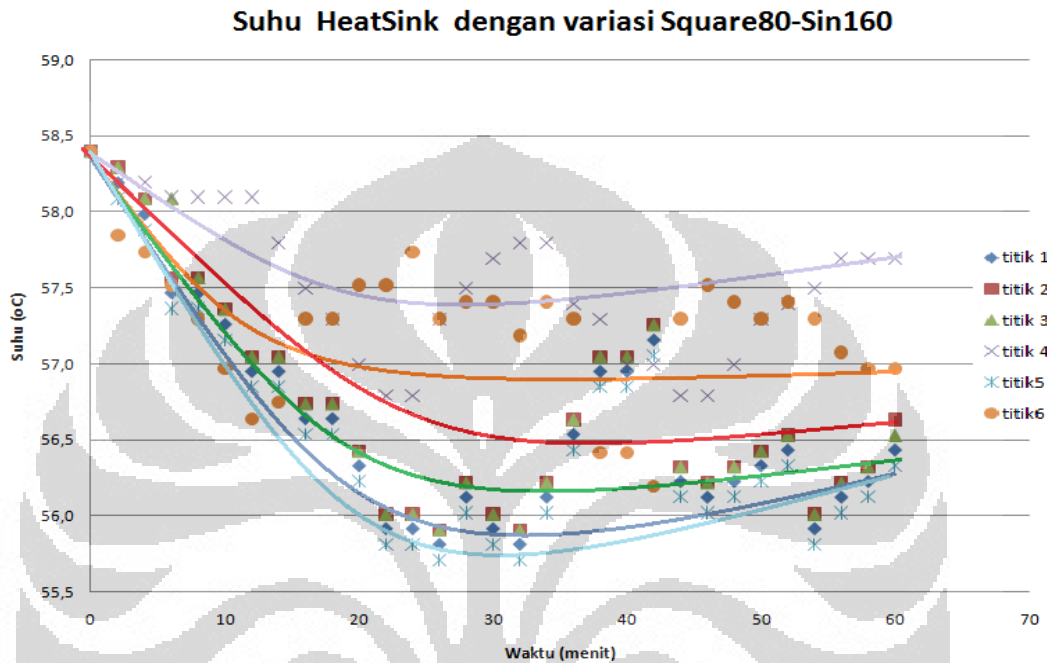
Melalui grafik ini, pola pendinginan dengan jet sintetik pada *heat sink* berbentuk tabung cenderung merata ke arah radial. Selain dikarenakan bentuk prototipe jet sintetik yang simetris, hal ini juga didukung oleh jarak antara orifis yang seragam sehingga cenderung membentuk wall jet yang teratur pada permukaan *heat sink* yang kemudian membuat pendinginan cenderung merata ke arah radial dengan jangkauan penurunan suhu akhir antar titik sebesar 1.3°C.



Grafik 4.4 Grafik hubungan penurunan suhu *heat sink* dari pembacaan 6(enam) titik termokopel pada variasi frekuensi *Square* 120Hz-Sinus 80Hz

4.2.1.3 Variasi *square* 80Hz – sinus 160Hz

Penurunan suhu *heat sink* selama satu jam pemanasan *heater* dengan fluks kalor tetap pada variasi *square* 80Hz – sinus 160Hz diperlihatkan pada grafik 4.5.



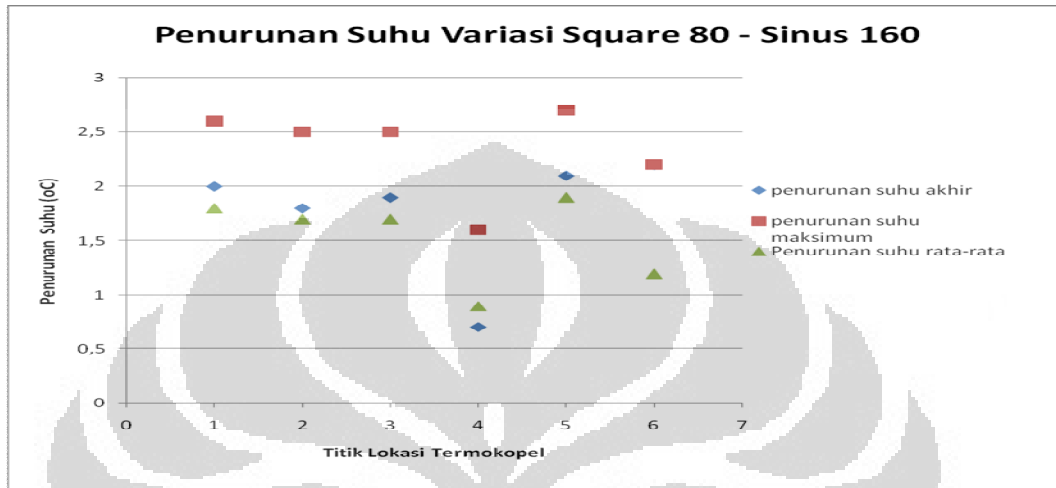
Grafik 4.5 Grafik hubungan suhu pada *heat sink* pada variasi frekuensi *Square* 80Hz-Sinus 160Hz

Penurunan suhu yang cukup tinggi terjadi saat 20 menit pertama di titik 1, 2, 3, 4, dan 5. Sedangkan di titik 6 perubahan suhu yang cukup tinggi terjadi di 10 menit pertama. Setelah itu penurunan suhu tidak signifikan, dan cenderung naik-turun di setiap titik. Hal ini disebabkan oleh kaviti dari membran jet sintetik sudah mengalami peningkatan suhu karena adanya resirkulasi pada fluida pada jarak aksial rendah (dekat *heat sink*) yang cenderung menaikkan udara sekitar kaviti sehingga menurunkan nilai penurunan suhu.

Grafik penurunan suhu pada tiap titik termokopel dengan variasi *square* 80 Hz – Sinus 160 Hz ditunjukkan pada grafik 4.6.

Melalui grafik ini, pola pendinginan dengan jet sintetik pada *heat sink* berbentuk tabung cenderung merata ke arah radial. Selain dikarenakan

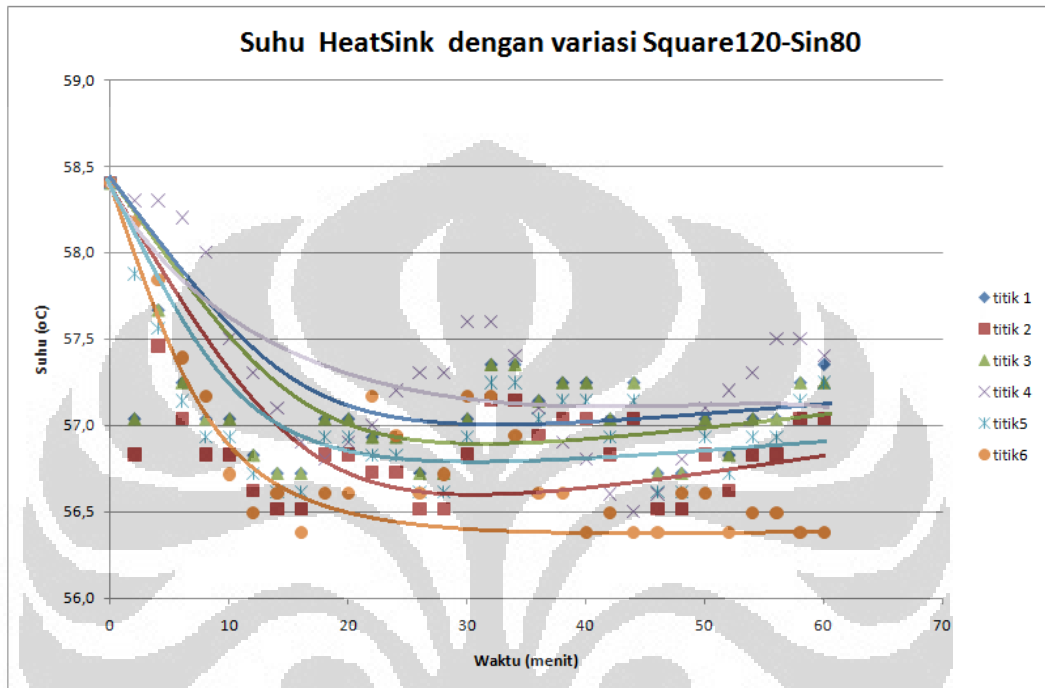
bentuk prototipe jet sintetik yang simetris, hal ini juga didukung oleh jarak antara orifis yang seragam sehingga cenderung membentuk wall jet yang teratur pada permukaan *heat sink* yang kemudian membuat pendinginan cenderung merata ke arah radial dengan jangkauan penurunan suhu akhir antar titik sebesar 1.3°C.



Grafik 4.6 Grafik hubungan penurunan suhu *heat sink* dari pembacaan 6(enam) titik termokopel pada variasi frekuensi *Square* 80Hz-Sinus 160Hz

4.2.1.4 Variasi *square* 120Hz – sinus 80Hz

Penurunan suhu *heat sink* selama satu jam pemanasan *heater* dengan fluks kalor tetap pada variasi *square* 120Hz – sinus 80Hz diperlihatkan pada grafik 4.7.

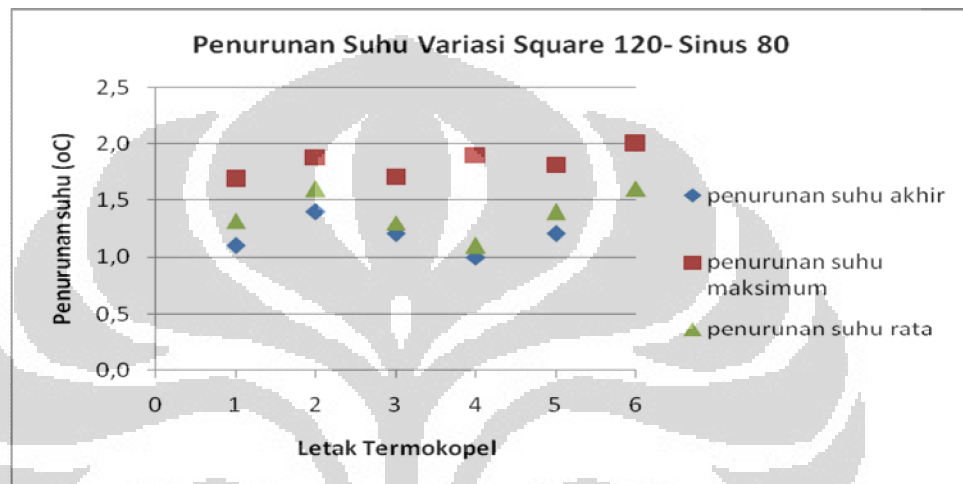


Grafik 4.7 Grafik hubungan suhu pada *heat sink* pada variasi frekuensi *Square* 120Hz-Sinus 80Hz

Penurunan suhu yang cukup tinggi terjadi saat 15 menit pertama. Setelah itu penurunan suhu tidak signifikan, dan cenderung naik-turun di setiap titik. Hal ini disebabkan oleh kaviti dari membran jet sintetik sudah mengalami peningkatan suhu karena adanya resirkulasi pada fluida pada jarak aksial rendah (dekat *heat sink*) yang cenderung menaikkan udara sekitar kaviti sehingga menurunkan nilai penurunan suhu. Variasi ini merupakan variasi dengan penurunan suhu akhir tertinggi kedua setelah variasi *Square* 80Hz – Sinus 20Hz

Grafik penurunan suhu pada tiap titik termokopel dengan variasi *square* 120 Hz – Sinus 80 Hz ditunjukkan pada grafik 4.8.

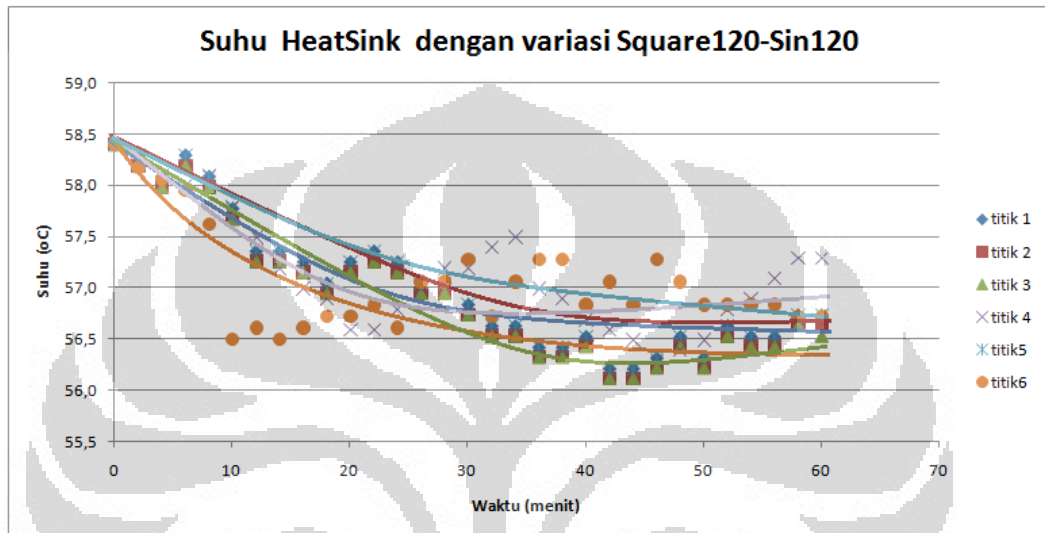
Melalui grafik ini, pola pendinginan dengan jet sintetis pada *heat sink* berbentuk tabung cenderung merata ke arah radial. Selain dikarenakan bentuk prototipe jet sintetis yang simetris, hal ini juga didukung oleh jarak antara orifis yang seragam sehingga cenderung membentuk wall jet yang teratur pada permukaan *heat sink* yang kemudian membuat pendinginan cenderung merata ke arah radial dengan jangkauan penurunan suhu akhir antar titik sebesar 0,9°C.



Grafik 4.8 Grafik hubungan penurunan suhu *heat sink* dari pembacaan 6(enam) titik termokopel pada variasi frekuensi *Square* 120Hz-Sinus 80Hz

4.2.1.5 Variasi *square* 120Hz – sinus 120Hz

Penurunan suhu *heat sink* selama satu jam pemanasan *heater* dengan fluks kalor tetap pada variasi *square* 120Hz – sinus 120Hz diperlihatkan pada grafik 4.9.



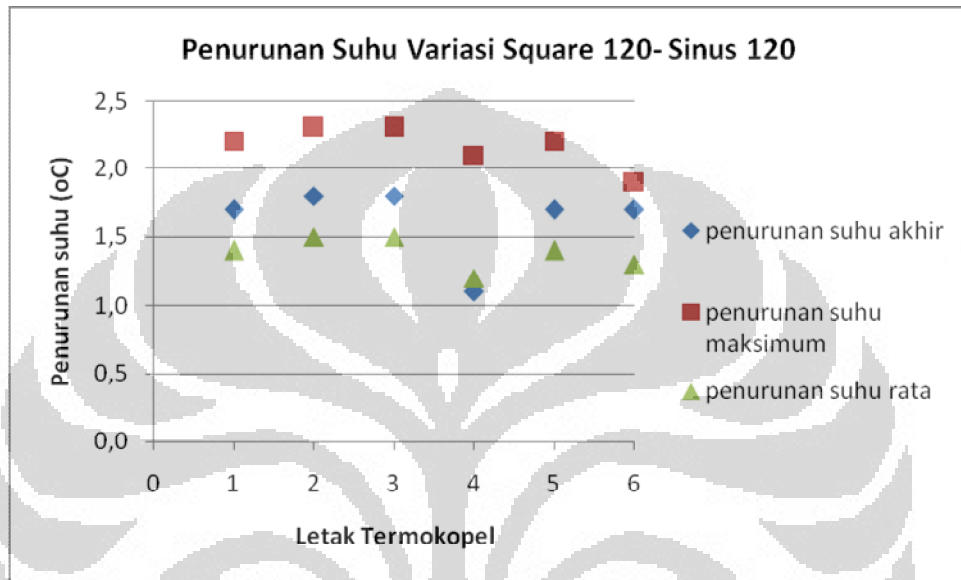
Grafik 4.9 Grafik hubungan suhu pada *heat sink* pada variasi frekuensi *Square* 120Hz-Sinus 120Hz

Penurunan suhu yang cukup tinggi terjadi saat 20 menit pertama meskipun di titik 6 penurunan suhu terbesar saat 10 menit pertama. Setelah itu perubahan suhu cenderung naik-turun di setiap titik. Hal ini disebabkan kaviti dari membran jet sintetik sudah mengalami peningkatan suhu karena adanya resirkulasi pada fluida pada jarak aksial rendah (dekat *heat sink*) yang cenderung menaikkan udara sekitar kaviti sehingga menurunkan nilai penurunan suhu. Penurunan suhu di variasi ini tidak lebih tinggi dari variasi gelombang sama lainnya, variasi *square* 80Hz- Sinus 80 Hz menghasilkan penurunan suhu yang lebih tinggi dari variasi ini.

Grafik penurunan suhu pada tiap titik termokopel dengan variasi *square* 120 Hz – Sinus 120 Hz ditunjukkan pada grafik 4.10.

Melalui grafik ini, pola pendinginan dengan jet sintetik pada *heat sink* berbentuk tabung cenderung merata ke arah radial. Selain dikarenakan

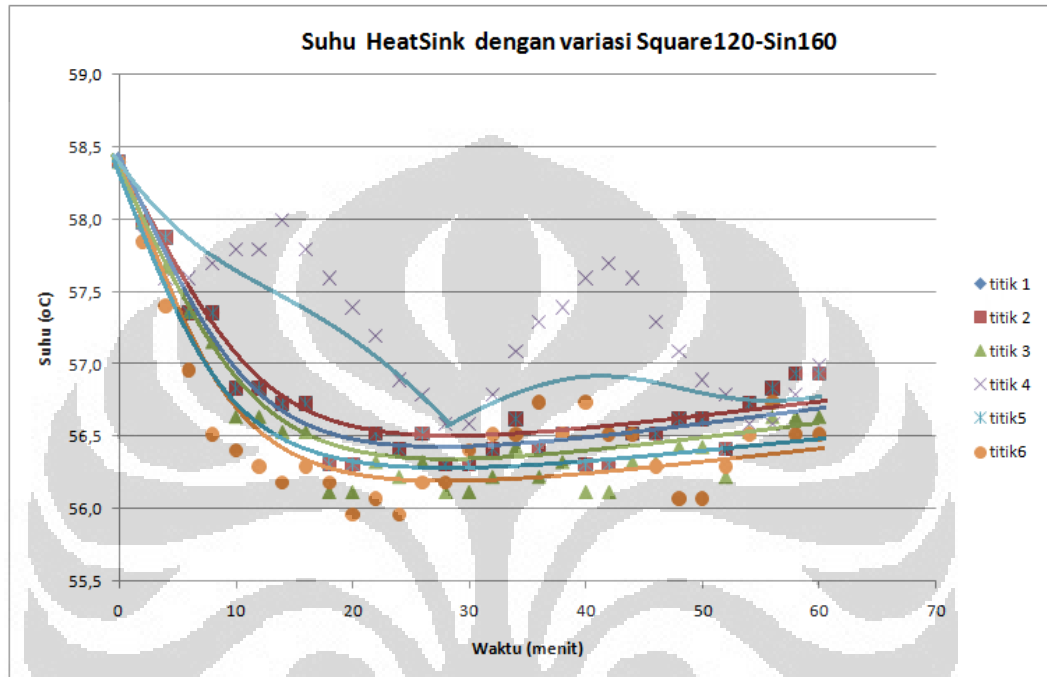
bentuk prototipe jet sintetik yang simetris, hal ini juga didukung oleh jarak antara orifis yang seragam sehingga cenderung membentuk wall jet yang teratur pada permukaan *heat sink* yang kemudian membuat pendinginan cenderung merata ke arah radial dengan jangkauan penurunan suhu akhir antar titik sebesar 0.6°C .



Grafik 4.10 Grafik hubungan penurunan suhu *heat sink* dari pembacaan 6(enam) titik termokopel pada variasi frekuensi *Square* 120Hz-Sinus 120Hz

4.2.1.6 Variasi *square* 120Hz – sinus 160Hz

Penurunan suhu *heat sink* selama satu jam pemanasan *heater* dengan fluks kalor tetap pada variasi *square* 120Hz – sinus 160Hz diperlihatkan pada grafik 4.11.

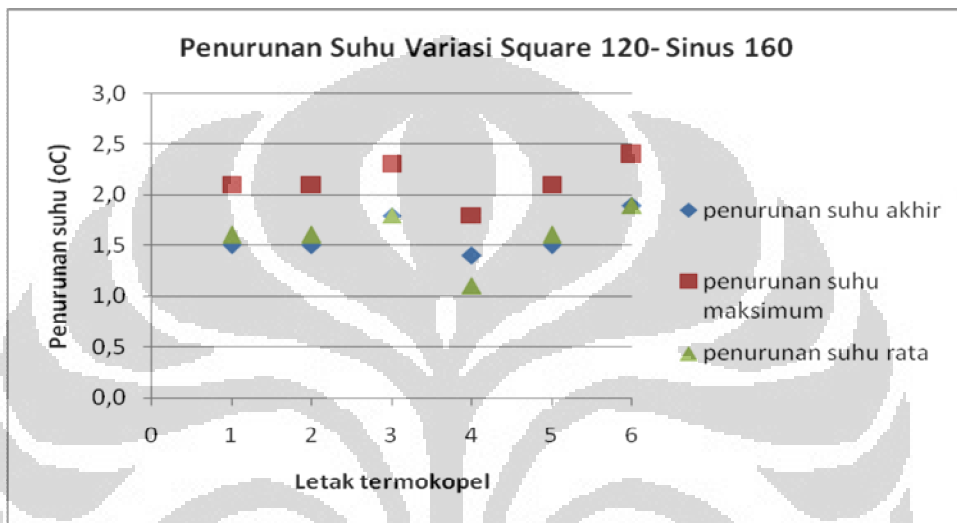


Grafik 4.11 Grafik hubungan suhu pada *heat sink* pada variasi frekuensi *Square* 120Hz-Sinus 160Hz

Penurunan suhu yang cukup tinggi terjadi saat 20 menit pertama meskipun di titik 4 penurunan suhu terbesar saat 5 menit pertama kemudian suhu naik di menit ke 15 lalu turun kembali dengan gradien penurunan yang lebih tinggi dibandingkan penurunan suhu awal. Setelah itu perubahan suhu cenderung naik-turun di setiap titik. Hal ini disebabkan kaviti dari membran jet sintetik sudah mengalami peningkatan suhu karena adanya resirkulasi pada fluida pada jarak aksial rendah (dekat *heat sink*) yang cenderung menaikkan udara sekitar kaviti sehingga menurunkan nilai perpindahan kalor.

Grafik penurunan suhu pada tiap titik termokopel dengan variasi *square* 120 Hz – Sinus 160 Hz ditunjukkan pada grafik 4.12.

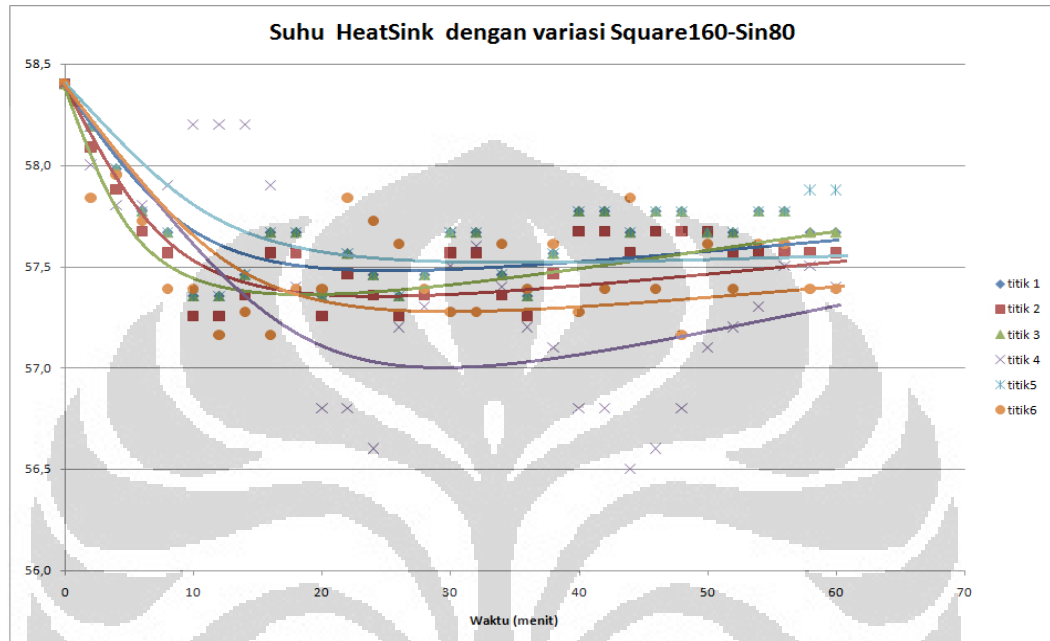
Melalui grafik ini, pola pendinginan dengan jet sintetik pada *heat sink* berbentuk tabung cenderung merata ke arah radial. Selain dikarenakan bentuk prototipe jet sintetik yang simetris, hal ini juga didukung oleh jarak antara orifis yang seragam sehingga cenderung membentuk wall jet yang teratur pada permukaan *heat sink* yang kemudian membuat pendinginan cenderung merata ke arah radial dengan jangkauan penurunan suhu akhir antar titik sebesar 0.5°C .



Grafik 4.12 Grafik hubungan penurunan suhu *heat sink* dari pembacaan 6(enam) titik termokopel pada variasi frekuensi *Square* 120Hz-Sinus 160Hz

4.2.1.7 Variasi *square* 160Hz – sinus 80Hz

Penurunan suhu *heat sink* selama satu jam pemanasan *heater* dengan fluks kalor tetap pada variasi *square* 160Hz – sinus 80Hz diperlihatkan pada grafik 4.13.

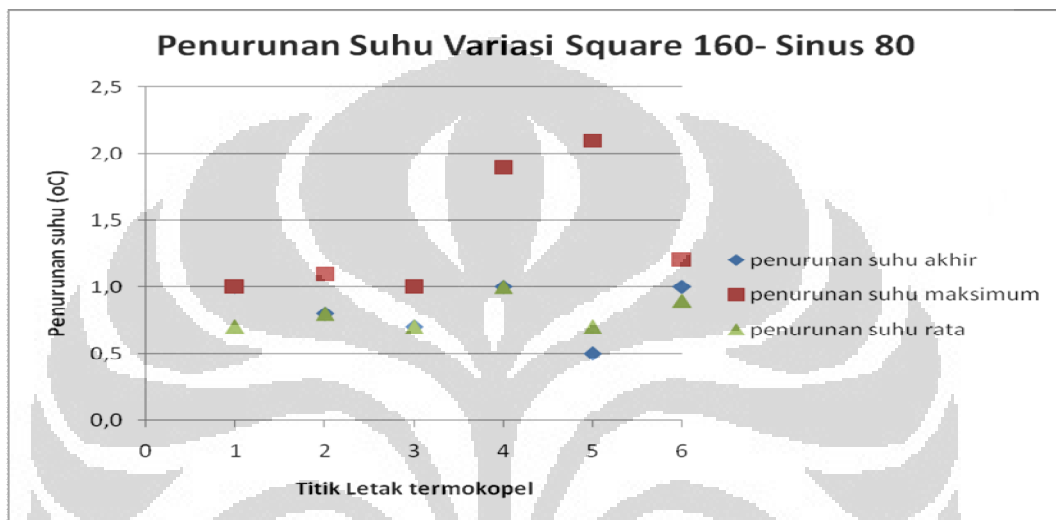


Grafik 4.13 Grafik hubungan suhu pada *heat sink* pada variasi frekuensi *Square* 160Hz-Sinus 80Hz

Penurunan suhu yang cukup tinggi terjadi saat 10 menit pertama meskipun di titik 4 penurunan suhu terbesar saat 5 menit pertama kemudian suhu naik di menit ke 10 lalu turun kembali hingga menit 22 dengan gradien penurunan yang lebih tinggi dibandingkan penurunan suhu awal. Setelah itu suhu naik-turun. Hal ini disebabkan kaviti dari membran jet sintetik sudah mengalami peningkatan suhu karena adanya resirkulasi pada fluida pada jarak aksial rendah (dekat *heat sink*) yang cenderung menaikkan udara sekitar kaviti sehingga menurunkan nilai perpindahan kalor. Variasi ini menggunakan frekuensi *square* tertinggi pada membran atas tetapi nilai penurunan suhu yang dihasilkan tidak lebih tinggi dari variasi gelombang *square* pada gelombang *square* membran atas lainnya,

Grafik penurunan suhu pada tiap titik termokopel dengan variasi *square* 160 Hz – Sinus 80 Hz ditunjukkan pada grafik 4.14.

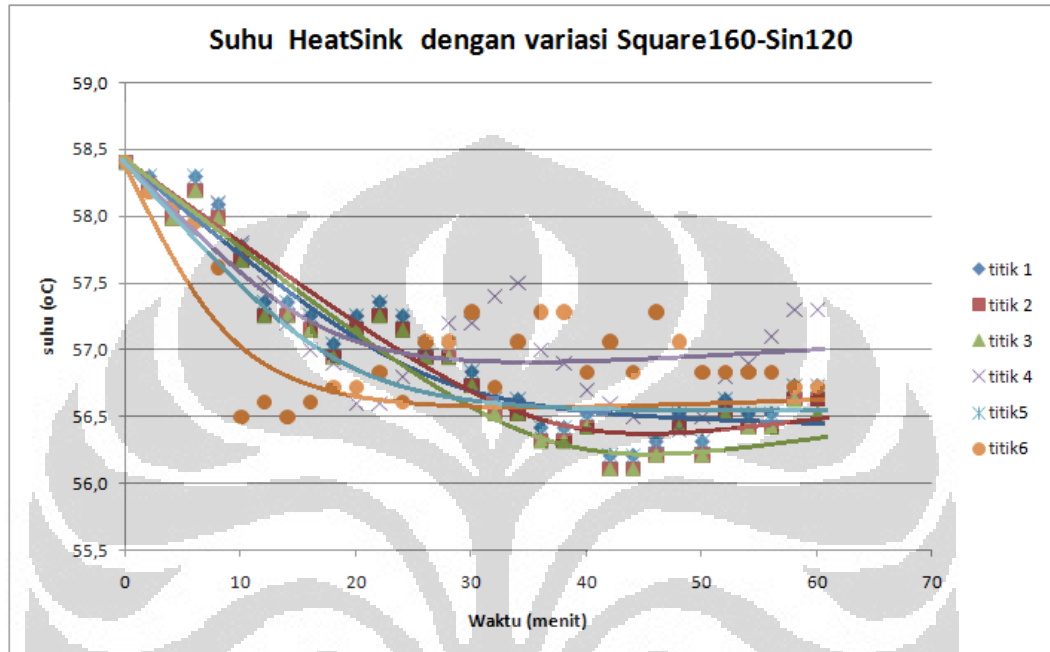
Melalui grafik ini, pola pendinginan dengan jet sintetik pada *heat sink* berbentuk tabung cenderung merata ke arah radial. Selain dikarenakan bentuk prototipe jet sintetik yang simetris, hal ini juga didukung oleh jarak antara orifis yang seragam sehingga cenderung membentuk wall jet yang teratur pada permukaan *heat sink* yang kemudian membuat pendinginan cenderung merata ke arah radial dengan jangkauan penurunan suhu akhir antar titik sebesar 0.5°C.



Grafik 4.14 Grafik hubungan penurunan suhu *heat sink* dari pembacaan 6(enam) titik termokopel pada variasi frekuensi *Square* 160Hz-Sinus 80Hz

4.2.1.8 Variasi *square* 160Hz – sinus 120Hz

Penurunan suhu *heat sink* selama satu jam pemanasan *heater* dengan fluks kalor tetap pada variasi *square* 160Hz – sinus 120Hz diperlihatkan pada grafik 4.15



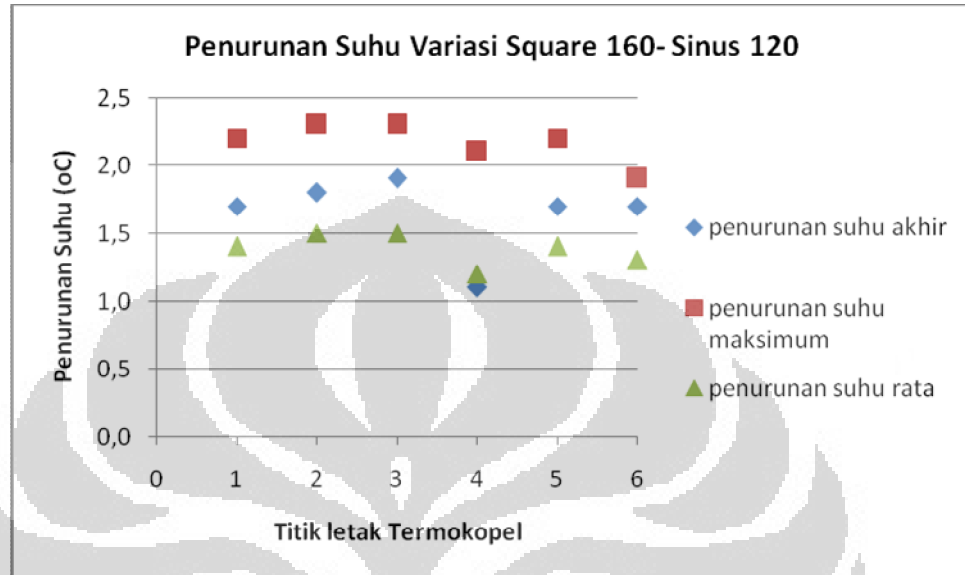
Grafik 4.15 Grafik hubungan suhu pada *heat sink* pada variasi frekuensi *Square* 160Hz-Sinus 120Hz

Penurunan suhu yang cukup tinggi terjadi saat 18-20 menit pertama meskipun di titik 6 penurunan suhu terbesar sebelum 10 menit pertama. Setelah itu suhu naik-turun. Hal ini disebabkan kaviti dari membran jet sintetik sudah mengalami peningkatan suhu karena adanya resirkulasi pada fluida pada jarak aksial rendah (dekat *heat sink*) yang cenderung menaikkan udara sekitar kaviti sehingga menurunkan nilai perpindahan kalor.

Grafik penurunan suhu pada tiap titik termokopel dengan variasi *square* 160 Hz – Sinus 120 Hz ditunjukkan pada grafik 4.16.

Melalui grafik ini, pola pendinginan dengan jet sintetik pada *heat sink* berbentuk tabung cenderung merata ke arah radial. Selain dikarenakan bentuk prototipe jet sintetik yang simetris, hal ini juga didukung oleh jarak

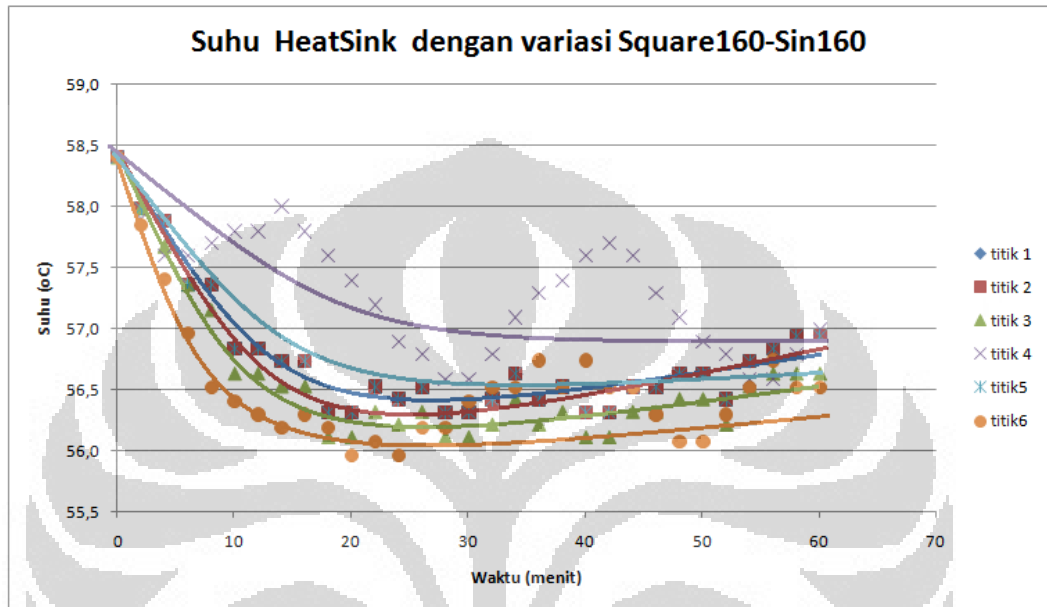
antara orifis yang seragam sehingga cenderung membentuk wall jet yang teratur pada permukaan *heat sink* yang kemudian membuat pendinginan cenderung merata ke arah radial dengan jangkauan penurunan suhu akhir antar titik sebesar 0.8°C .



Grafik 4.16 Grafik hubungan penurunan suhu *heat sink* dari pembacaan 6(enam) titik termokopel pada variasi frekuensi *Square* 160Hz-Sinus 120Hz

4.2.1.9 Variasi *square* 160Hz – sinus 160Hz

Penurunan suhu *heat sink* selama satu jam pemanasan *heater* dengan fluks kalor tetap pada variasi *square* 160Hz – sinus 120Hz diperlihatkan pada grafik 4.17

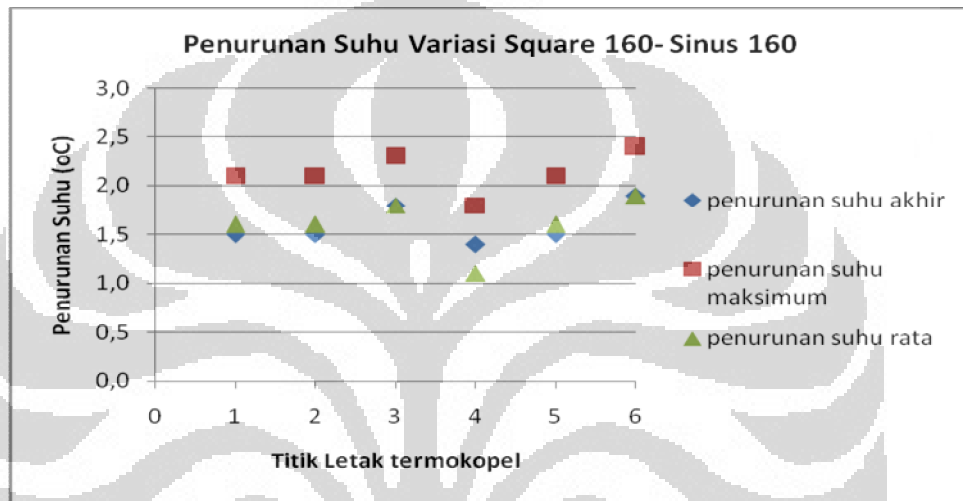


Grafik 4.17 Grafik hubungan suhu pada *heat sink* pada variasi frekuensi *Square* 160Hz-Sinus 160Hz

Penurunan suhu yang cukup tinggi terjadi saat 20 menit pertama meskipun di titik 4 penurunan suhu terbesar sebelum 4 menit pertama kemudian suhu naik hingga menit ke 14 lalu turun dengan gradien penurunan suhu yang lebih tinggi hingga sebelum menit ke 30. Setelah itu suhu naik-turun. Hal ini disebabkan kaviti dari membran jet sintetik sudah mengalami peningkatan suhu karena adanya resirkulasi pada fluida pada jarak aksial rendah (dekat *heat sink*) yang cenderung menaikkan udara sekitar kaviti sehingga menurunkan nilai perpindahan kalor. Variasi ini merupakan variasi dengan kombinasi frekuensi tertinggi dibandingkan yang lain, tetapi penurunannya adalah salah satu yang paling rendah dibandingkan variasi lainnya.

Grafik penurunan suhu pada tiap titik termokopel dengan variasi *square* 160 Hz – Sinus 160 Hz ditunjukkan pada grafik 4.18.

Melalui grafik ini, pola pendinginan dengan jet sintetik pada *heat sink* berbentuk tabung cenderung merata ke arah radial. Selain dikarenakan bentuk prototipe jet sintetik yang simetris, hal ini juga didukung oleh jarak antara orifis yang seragam sehingga cenderung membentuk wall jet yang teratur pada permukaan *heat sink* yang kemudian membuat pendinginan cenderung merata ke arah radial dengan jangkauan penurunan suhu akhir antar titik sebesar 0.5°C .



Grafik 4.18 Grafik hubungan penurunan suhu *heat sink* dari pembacaan 6(enam) titik termokopel pada variasi frekuensi *Square* 160Hz-Sinus 160Hz

4.2.2 Analisa Koefisien Perpindahan Panas Konveksi terhadap Waktu

1. Menganalisa Titik yang digunakan sebagai sampel perhitungan dengan menggunakan ANOVA faktor tunggal.

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>		
titik 1 Lutron	31	1755,728	56,636	0,287		
titik 2 Lutron	31	1751,172	56,489	0,189		
titik 3 Lutron	31	1764,908	56,933	0,255		
titik 4 DMM	31	1783,976	57,548	0,050		
titik5 Lutron	31	1762,184	56,845	0,271		
titik6 Viktor	31	1748,915	56,417	0,157		
<i>Sumber Variasi</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Antar kelompok	26,287	5	5,257	26,105	8,86402E-20	2,264
Dalam kelompok	36,251	180	0,201			
Total	62,537	185				

Tabel 4.7 tabel Varian Analisis (ANOVA) dari titik-titik termokopel pengukuran suhu.

Dalam pengambilan data, akuisisi data pada titik 1 dan titik 4 dilakukan dengan komputer sehingga yang terjadi hanyalah kesalahan atau ketidakpastian alat ukur, sedangkan akuisisi data pada titik 2, 3, 5, dan 6 dilakukan dengan manual sehingga disamping terjadi kesalahan alat ukur dapat juga terjadi kesalahan operator dan juga kesalahan lain yang berasal dari hal-hal yang tidak diteliti ataupun tidak diketahui oleh peneliti. Oleh karena itu penulis menggunakan Anova untuk menentukan titik mana yang akan lebih akurat untuk selanjutnya akan dianalisis secara mendalam. Tujuan Anova adalah untuk menguji secara statistik perbedaan antar berbagai rata-rata dari tiap titik untuk menentukan apakah mereka semua sama ataukah salah satunya berbeda. Untuk menentukan hal ini, Anova membagi total variabilitas data ke dalam dua bagian, variasi antar kelompok dan variasi dalam kelompok. Jika total variasi antar kelompok cukup kecil dibandingkan dengan variasi di dalam kelompok, hal ini menandakan bahwa semua populasi tersebut pada dasarnya sama. Tetapi variasi yang relatif besar antarkelompok menandakan bahwa

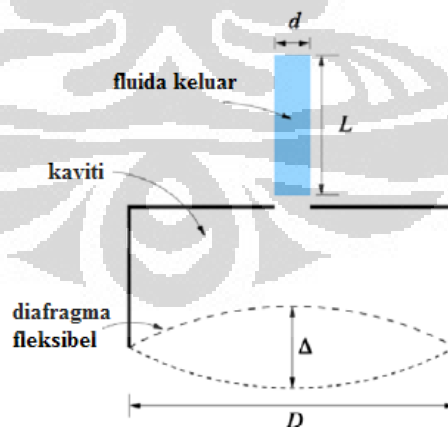
terdapat perbedaan dalam rata-rata populasi yang tidak diketahui. Untuk menghitung statistik F dilakukan dengan cara membagi kuadrat kelompok dengan kuadrat rata-rata dalam kelompok. Jika nilai F lebih besar dari F_{crit} , maka data tersebut terdapat perbedaan dalam rata-rata.

Dalam tabel 4.7 ditunjukkan bahwa variansi dari titik 4 adalah yang paling kecil dibandingkan titik yang lain sehingga keadaan pada titik 4 yang akan dibahas lebih dalam dikarenakan pada titik ini akuisisi lebih stabil. Kuadrat rata-rata antara kelompok secara signifikan lebih besar dibandingkan kuadrat rata-rata dalam kelompok, sehingga menghasilkan nilai statistik F 26,105 yang jauh lebih besar dari F_{crit} 2,264 hal ini menandakan bahwa rata-rata untuk setiap titik tidaklah sama dan memiliki kemungkinan sebesar $8,864 \times 10^{-20}$ untuk mendapatkan nilai yang sama pada tiap titik (dengan frekuensi yang sama).

Oleh sebab itu, dalam perhitungan dengan mempertimbangkan faktor variasi data pada titik termokopel maka peneliti menggunakan data pada termokopel di titik 4 untuk tahap analisa lebih lanjut.

2. Mencari hubungan bilangan *Reynolds* terhadap bilangan *Nusselts*.

Reynolds number dicari dengan persamaan model aktuator [Gopi Krishnan dan Kamran Mohseni, 2010]



Gambar 4.10 skema membran jet sintetik (Kamran Mohseni & Gopi Khrisnan, 2010)

Reynolds merupakan parameter penting pada kinerja aktuator yang mempengaruhi jet sintetik [Ari Glezer & Smith, 1998]. Untuk kaviti-

diafragma yang didapat dari model aliran tidak mampu mampat, diasumsikan bahwa volume fluida yang dipindahkan oleh membran sama dengan volume yang dikeluarkan dari orifis. Untuk mendapatkan volume yang dipindahkan akibat defleksi membran maka perlu diketahui bentuk membran dan nilai amplitudo membran. Bentuk didapat dari teori klasik tentang pelat dan cangkang [Timoshenko, 1999].

volume fluida yang dipindahkan oleh membran = volume yang dikeluarkan dari orifis

$$\frac{\alpha \pi D^2}{4} \Delta = \frac{\pi d^2}{4} L \quad (4.5)$$

α adalah fraksi volume yang dipindahkan oleh gerak puncak ke puncak dari piston imajiner dengan defleksi Δ .

$$\alpha = \frac{2\pi \int_0^{D/2} y(r) r dr}{\frac{\pi D^2}{4}} \quad (4.6)$$

Dimana $y(r)$ merupakan profil defleksi dari diafragma. Dengan asumsi bahwa bentuk dari embrane adalah embrane sirkular dengan dikelem pada ujung dengan beban seragam [Timoshenko, 1999], maka profil defleksi dapat ditulis dengan

$$Y(r) = \frac{\Delta}{2} \left[1 - \frac{r^2}{R^2} + \frac{2r^2}{R^2} \ln\left(\frac{r}{R}\right) \right] \quad (4.7)$$

dengan r merupakan kordinat radial dan R adalah jari-jari membran. Dengan $\alpha = 0,25$. Maka rasio non-dimensional pada stroke menjadi

$$\frac{L}{d} = \alpha \Delta \frac{D^2}{d^3} \quad (4.8)$$

Periodic nature dari jet sintetik mengizinkan untuk dilakukan penskalaan kecepatan yang berdasarkan baik pada volume atau momentum flux [Smith & Swift, 2001]. Jika menurut volume fluks *velocity scale* $U_0 = \frac{L}{T} = fL$, sedangkan jika menurut momentum fluks menjadi $U_0 = \sqrt{2} \frac{L}{T} = \sqrt{2} fL$. Sehingga Bilangan *Reynolds* didefinisikan sebagai

$$Re = \frac{U_0 d}{\nu} = \frac{\sqrt{2} f L d}{\nu} = \frac{\sqrt{2} f \Delta \alpha D^2}{\nu d} \quad (4.9)$$

Dikarenakan prototipe jet sintetik memiliki lubang orifis berjumlah 20 buah dengan diameter masing-masing adalah $2\text{mm} = 0,002\text{m}$. Maka nilai α untuk satu lubang $= \frac{1}{4}$ dibagi 20 lubang menjadi $0,0125$. Dengan L panjang stroke $= 5\text{ mm} = 0,005\text{m}$; d (diameter orifis) $= 2\text{mm} = 0,002\text{m}$; D (diameter membran piezoelektrik) $= 6\text{cm} = 0,06\text{m}$. Maka didapatkan nilai $\Delta = 2,22 \cdot 10^{-3}\text{ m} = 2,22\text{ mm}$ dengan pendekatan demikian diasumsikan bahwa amplitudo membran adalah setengah defleksi Δ yaitu 1.1 mm .

3. Mencari koefisien konveksi pada Jet Sintetik.

Prosedur untuk menghitung Nu_F dianggap sebagai nilai nusselt rata-rata (Nu_{avg}) adalah sebagai berikut:

$$Nu_F = Nu_{avg} = \frac{h_{avg} d}{k} \quad (4.10)$$

Dimana h_{avg} koefisien konveksi rata-rata dihitung dengan

$$h_{avg} = \frac{q_{conv}}{(T_s - T_{inf})} \quad (4.11)$$

Menurut Gilliespie et al, 2006, ada suatu resirkulasi pada fluida kerja di jarak aksial bawah yang menaikkan temperatur dari udara di dalam membran sehingga menuruunkan nilai perbedaan temperatur, hal tersebut juga disetujui Mangesh Chaudari et al. Sehingga dalam mendefinisikan perbedaan temperatur dari *heat sink* yang dipanaskan, peneliti menggunakan formula Mangesh Chaudari et al, 2010.

$$q_{conv} = q_{joule} - q_{loss} \quad (4.12)$$

$$q_{joule} = \frac{VI}{A} \quad (4.13)$$

Dimana disipasi panas yang dilakukan oleh konveksi alamiah (*Free Convection*) dinyatakan dengan q_{loss} . Fluks panas pada heater dinyatakan dengan q_{joule} , dengan A luas penampang *heater*, V adalah beda potensial *heater*, dan I adalah arus listrik *heater*.

Radiation losses akibat prototipe yang mengkilap juga sangat kecil sehingga pada perhitungan ini hal tersebut di abaikan. Dalam perhitungan *heat losses*, diasumsikan bahwa panas yang diturunkan oleh jet sintetik

dipengaruhi oleh konveksi natural dari udara sekitar *heater*. Metode perhitungannya merujuk pada Incropera, 1996

Untuk permukaan pelat yang dipanaskan terdapat di bagian bawah

$$Nu_L = 0,27 Ra^{1/4} \text{ untuk } 10^5 \leq Ra \leq 10^{10} \quad (4.14)$$

Untuk permukaan pelat yang dipanaskan terdapat di bagian atas

$$Nu_L = 0,15 Ra^{1/3} \text{ untuk } 10^5 \leq Ra \leq 10^{10} \quad (4.15)$$

$$Ra = Gr L Pr = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) L^3}{\nu \alpha} \quad (4.16)$$

Ra adalah bilangan Rayleigh, Gr adalah bilangan *Grashof*, Pr adalah bilangan *Prandtl*, dan L adalah tinggi pelat yang dipanaskan yaitu H=5cm=0,05m. L = luas lingkaran/keliling lingkaran.

Dari tabel di buku Incropera didapatkan $T_s = 27^\circ\text{C} = 300\text{K}$; $\nu = 15,89 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$; $\alpha = 22,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$; $k = 26,3 \times 10^{-3} \text{ W/m.K}$; $\beta = 0,0033\text{K}^{-1}$; $Pr = 0,707$.

Aliran konveksi bebas bersifat laminar, maka bilangan *Nusselt* dihitung dengan rumus:

$$\overline{Nu}_L = 0,68 + \frac{0,67 Ra_L^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr}\right)^{9/16}\right]^{4/9}} \quad (4.17)$$

Koefisien konveksi sisi samping dapat dihitung dengan rumus

$$\overline{h}_s = \frac{k}{H} \overline{Nu}_L \quad (4.18)$$

Koefisien konveksi atas dapat dihitung dengan rumus

$$\overline{h}_t = \frac{k}{L} 0,15 (Ra_L^{1/3}) \quad (4.19)$$

Koefisien konveksi bawah dapat dihitung dengan rumus

$$\overline{h}_b = \frac{k}{L} 0,27 (Ra_L^{1/4}) \quad (4.20)$$

Maka laju heat losses dapat dihitung dengan rumus

$$q_{loss} = q_s + q_t + q_b \quad (4.21)$$

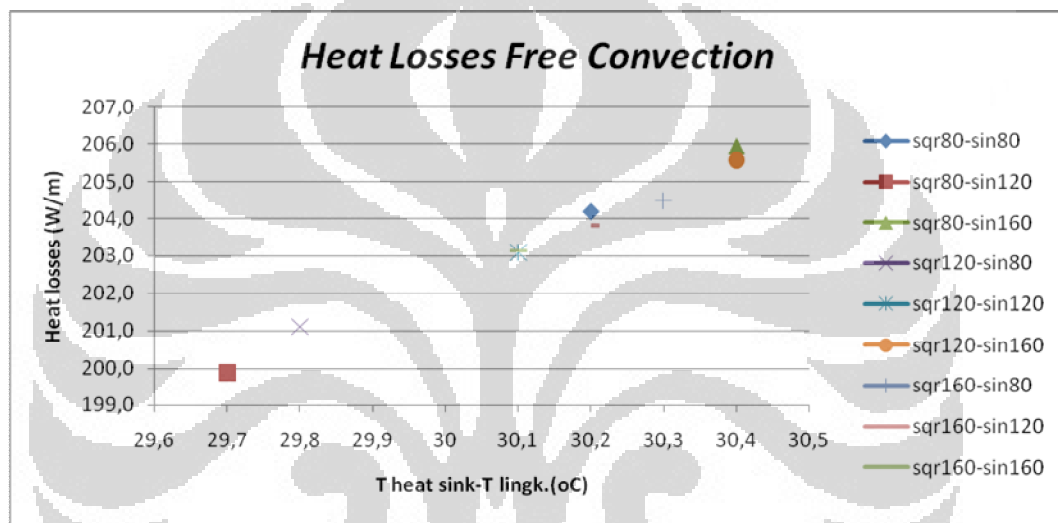
$$q_{loss} = (\overline{h}_s \cdot H + \overline{h}_t \cdot d + \overline{h}_b \cdot d)(T_s - T_\infty) \quad (4.22)$$

H = tinggi *heat sink* = 5 cm = 0,005 m

D = diameter *heat sink* = 11 cm = 0,11 m

Grafik hubungan perbedaan temperatur *heat sink* terhadap heat loss akibat konveksi natural udara sekita *heat sink* ditunjukkan pada grafik 4.19.

Pada konveksi natural, hal yang cukup berpengaruh adalah suhu udara sekitar, karena konveksi bebas adalah konveksi yang dilakukan secara natural/alami oleh udara sekitar. Perbedaan suhu lingkungan juga sedikit mempengaruhi properties dari udara seperti bilangan *prandtl*, viskositas kinematik, dan difusivitas termalnya yang secara otomatis mempengaruhi bilangan *Nusselts* konveksi alaminya.

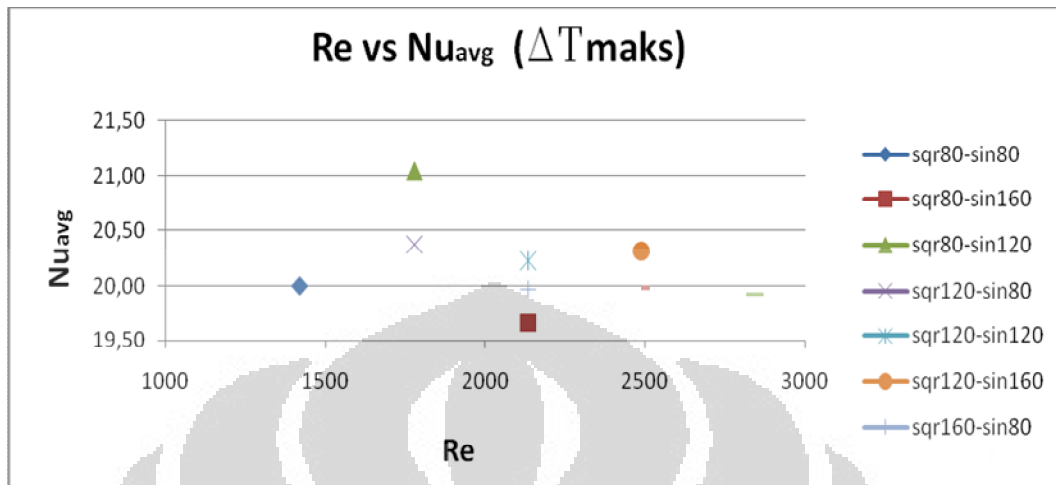


Grafik 4.19 Grafik hubungan perbedaan suhu lingkungan terhadap *heat losses* akibat konveksi natural

Bilangan tak berdimensi *Nusselts* merupakan parameter kecenderungan suatu benda untuk melakukan perpindahan panas secara konveksi. Dengan formula Chaudari et al, 2010 dan Incropera, 1996 didapatkan hubungan bilangan *Nusselts* dengan bilangan *Reynolds*. Formula bilangan *Reynolds* didapatkan dari Smith & Swift, 2001. Grafik hubungan bilangan *Reynolds* dengan bilangan *Nusselts* saat penurunan suhu maksimum pada tiap variasi ditunjukkan pada grafik 4.20. didapat bilangan *Nusselts* tertinggi pada variasi *square* 80Hz – Sinus 120 Hz yaitu sebesar 21.43.

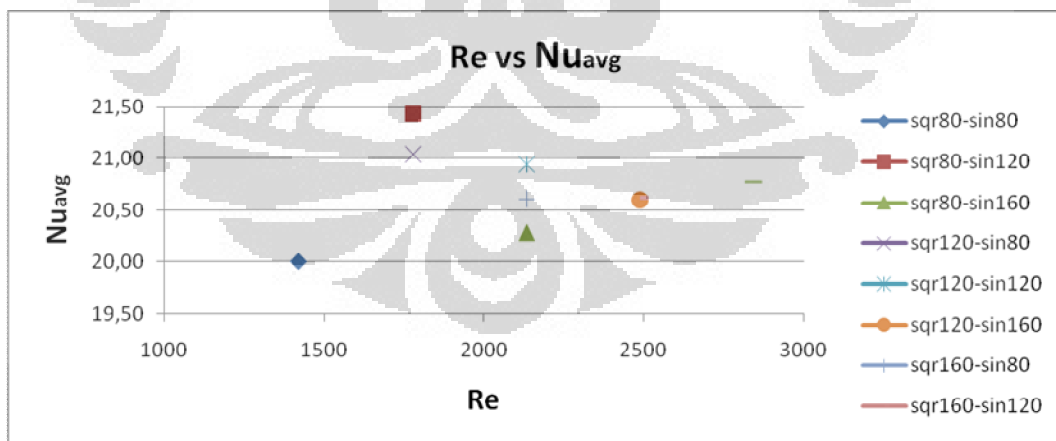
Hal yang dapat dijelaskan oleh grafik ini adalah kenaikan bilangan *Reynolds* tidak mempengaruhi kenaikan bilangan *Nusselts*

secara signifikan atau bahkan cenderung mengalami penurunan. Hal ini juga di dukung oleh grafik 4.21.



Grafik 4.20 Grafik hubungan bilangan *Reynolds* terhadap bilangan *Nusselts* pada penurunan temperatur maksimum

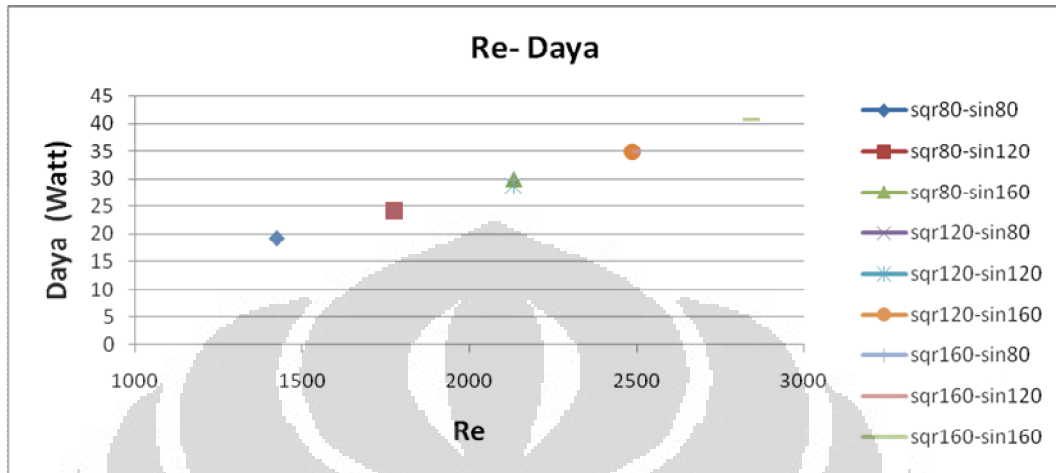
Hubungan antara bilangan *Reynolds* dengan bilangan *nusselt* setelah pendinginan satu jam oleh jet sintetik ditunjukkan pada grafik 4.21. dimana bilangan *Nusselts* tertinggi didapatkan pada variasi *square* 80 Hz – sinus 120 Hz yaitu sebesar 21.04.



Grafik 4.21 Grafik hubungan bilangan *Reynolds* terhadap bilangan *Nusselts* selama pemanasan satu jam oleh *heater*

Hasil penelitian Tim Persoon, 2011 pendinginan jet sintetik pada $500 < Re < 1500$ juga mendukung hasil penelitian dan analisis ini dimana pada

korelasi Tim Persoon didapatkan bilangan *Nusselts* sebesar 20.62. Dimana kenaikan bilangan *Reynolds* tidak mempengaruhi secara signifikan penurunan suhu pelat yang dipanaskan dengan jet sintetis dan bilangan *Nusselts*-nya.

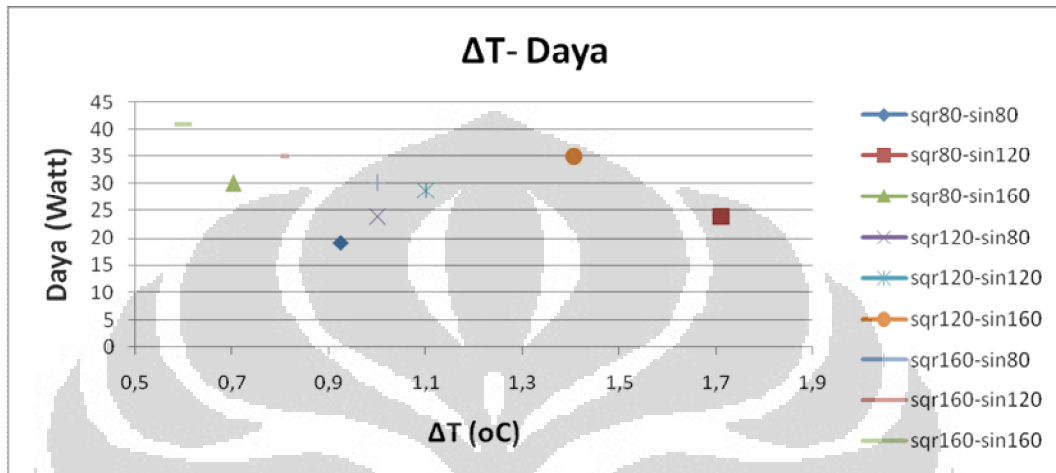


Grafik 4.22 Grafik hubungan bilangan *Reynolds* terhadap daya yang dibutuhkan membran penghasil jet sintetis

Sedangkan kenaikan bilangan *Reynolds* menyebabkan kenaikan daya listrik yang diperlukan oleh membran untuk menghasilkan jet sintetis. Grafik 4.22 menunjukkan bahwa untuk menghasilkan bilangan *Reynolds* yang tinggi diperlukan daya listrik yang semakin tinggi pula. Hal ini dikarenakan frekuensi yang berbanding lurus terhadap bilangan *Reynolds* sesuai dengan persamaan Smith & Swift. Sedangkan frekuensi membran berbanding lurus terhadap daya membran. Sehingga untuk menghasilkan bilangan *Reynolds* yang semakin tinggi diperlukan daya listrik yang semakin tinggi pula

Oleh karena itu, disinilah letak keunikan dari pendinginan dengan jet sintetis, untuk menghasilkan penurunan suhu yang lebih tinggi, dalam hal ini direpresentasikan oleh bilangan *Nusselts*, tidak memerlukan daya listrik yang tinggi pula, dalam hal ini direpresentasikan oleh bilangan *Reynolds*. Grafik 4.23 menunjukkan hubungan antara penurunan suhu dengan daya yang diperlukan oleh membran untuk menghasilkan jet sintetis dengan berbagai variasi frekuensi. Pada variasi *square* 160 Hz – sinus 160 Hz dengan daya membran sebesar 40.8W hanya dapat menurunkan suhu sebesar 0.6°C. Bila dibandingkan dengan daya

yang paling rendah yaitu variasi *square* 80 Hz- sinus 80Hz memerlukan daya 19.2 W dapat menurunkan suhu sebesar 0.93°C. Akan tetapi pendinginan optimum adalah saat penurunan suhu maksimum tetapi dengan daya yang rendah yaitu variasi *square* 80 Hz – Sinus 120 Hz yang memerlukan daya 24 W dapat menurunkan suhu 1.7°C.



Grafik 4.23 Grafik hubungan penurunan suhu oleh membran jet sintetis terhadap daya listrik yang dibutuhkan membran

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

Di dalam statistik ketika menduga sesuatu hal, maka akan dikenakan tingkat kepercayaan terhadap interval yang ada. Tingkat kepercayaan dapat dikatakan sebagai seberapa benar atau meyakinkan hasil pengukuran atau dugaan interval. Besarnya tingkat kepercayaan yang digunakan dalam penelitian ini adalah 95%.

Frek. <i>Square</i>	80Hz			120Hz			160Hz			level kepercayaan (95%) alat ukur
Frek. Sinus	80 Hz	120 Hz	160 Hz	80 Hz	120 Hz	160 Hz	80 Hz	120 Hz	160 Hz	
titik 1	0,196	0,409	0,260	0,124	0,119	0,094	0,086	0,243	0,192	0,192
titik 2	0,159	0,419	0,257	0,133	0,120	0,094	0,090	0,245	0,192	0,190
titik 3	0,185	0,418	0,267	0,123	0,120	0,102	0,086	0,246	0,208	0,195
titik 4	0,082	0,152	0,175	0,188	0,102	0,088	0,194	0,209	0,179	0,152
titik 5	0,191	0,421	0,263	0,141	0,119	0,094	0,089	0,243	0,192	0,195
titik 6	0,145	0,272	0,164	0,194	0,090	0,095	0,100	0,184	0,193	0,160
Level Kepercayaan (95%) variasi frekuensi	0,160	0,349	0,231	0,150	0,112	0,094	0,107	0,228	0,193	

Tabel 4.8 tabel tingkat kepercayaan pengukuran suhu ditinjau dari alat ukur dan variasi frekuensi.

rata-rata Level Kepercayaan (95%) variasi frekuensi = 0,1805

rata-rata Level Kepercayaan (95%) alat ukur = 0,180

level kepercayaan pengukuran suhu = 0,255

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

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

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

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

Frek Square	80Hz			120Hz			160Hz			standard deviasi alat ukur
Frek Sinus	80 Hz	120 Hz	160 Hz	80 Hz	120 Hz	160 Hz	80 Hz	120 Hz	160 Hz	
titik 1	0,536	1,116	0,709	0,061	0,662	0,524	0,235	0,662	0,524	0,559
titik 2	0,434	1,142	0,701	0,065	0,668	0,524	0,235	0,668	0,524	0,551
titik 3	0,505	1,140	0,728	0,060	0,670	0,568	0,235	0,670	0,568	0,572
titik 4	0,224	0,414	0,477	0,092	0,570	0,488	0,528	0,570	0,488	0,428
titik 5	0,521	1,148	0,717	0,069	0,662	0,524	0,242	0,662	0,524	0,563
titik 6	0,396	0,742	0,447	0,095	0,501	0,526	0,272	0,501	0,526	0,445
standard deviasi variasi frekuensi	0,436	0,950	0,630	0,074	0,622	0,525	0,291	0,622	0,525	

Tabel 4.9 tabel Standar Deviasi pengukuran suhu ditinjau dari alat ukur dan variasi frekuensi.

rata-rata Standar deviasi variasi frekuensi = 0,520

standar deviasi pengukuran suhu = 0,5195

rata-rata standar deviasi alat ukur = 0,7348

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

Frek. Square	80Hz			120Hz			160Hz			standard error alat ukur
Frek. Sinus	80 Hz	120Hz	160Hz	80Hz	120Hz	160Hz	80Hz	120Hz	160Hz	
titik 1	0,096	0,200	0,127	0,061	0,119	0,094	0,042	0,119	0,094	0,106
titik 2	0,078	0,205	0,126	0,065	0,120	0,094	0,044	0,120	0,094	0,105
titik 3	0,091	0,205	0,131	0,060	0,120	0,102	0,042	0,120	0,102	0,108
titik 4	0,040	0,074	0,086	0,092	0,102	0,088	0,095	0,102	0,088	0,085
titik 5	0,094	0,206	0,129	0,069	0,119	0,094	0,043	0,119	0,094	0,107
titik 6	0,071	0,133	0,080	0,095	0,090	0,095	0,049	0,090	0,095	0,089
standard error variasi frekuensi	0,078	0,171	0,113	0,074	0,112	0,094	0,053	0,112	0,094	

Tabel 4.10 tabel *error standard* pengukuran suhu ditinjau dari alat ukur dan variasi frekuensi.

Rata-rata standard error alat ukur = 0,100066703

Rata-rata standard error alat ukur = 0,100067

standar error pengukuran suhu = 0,141516

BAB 5

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Penelitian karakteristik aliran dan perpindahan panas dengan menggunakan jet sintetik telah dilakukan dan dianalisis dimana jet sintetik diosilasikan dengan menggunakan kombinasi gelombang persegi (*square*)-Sinusoidal pada membran atas-membran bawah pada berbagai variasi frekuensi.

Hasil komputasi menunjukkan bahwa gelombang kombinasi memiliki pengaruh terhadap intensitas turbulensi dan vortisiti. Fungsi membran atas *square* memiliki pengaruh yang dominan terhadap intensitas turbulensi dan vortisitas pada tiap variasi membran bawah sinusoidal. Sedangkan vortisitas menunjukkan bahwa setelah jet sintetik diaktifkan, medan aliran menjadi berotasi sehingga dapat terjadi vortek.

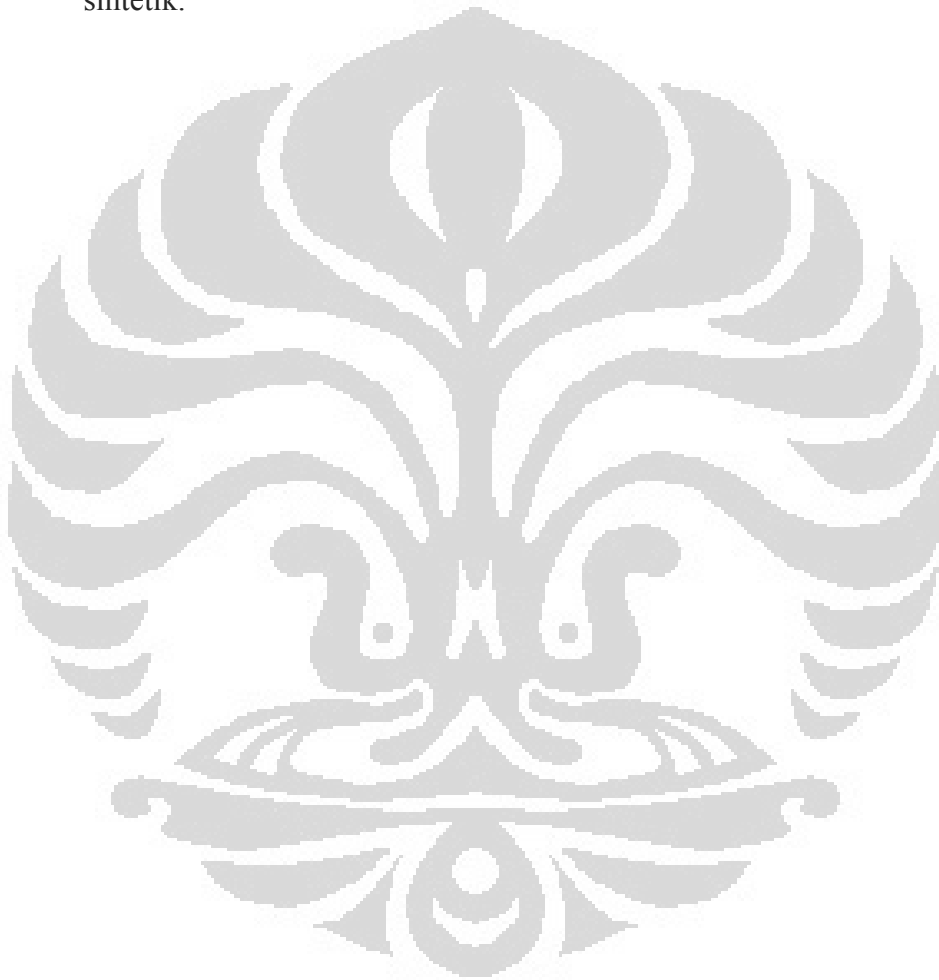
Hasil eksperimen menunjukkan bahwa penurunan suhu paling tinggi selama satu jam pendinginan jet sintetik pada suatu heat sink dengan fluks kalor tetap terjadi pada variasi *square* 80 Hz – Sinus 120 Hz dimana nilai penurunan suhu minimum didapatkan pada titik 4 yaitu sebesar 1.7°C sedangkan penurunan suhu maksimum terdapat pada titik 2 yaitu 3.1°C. Sistem pendinginan dengan jet sintetik juga menghasilkan pendinginan yang cenderung merata ke arah radial dengan jangkauan penurunan suhu antar titik termokopel sebesar 1,4°C. Pada variasi *square* 160 Hz – sinus 160 Hz dengan daya membran sebesar 40.8W hanya dapat menurunkan suhu sebesar 0.6°C. Bila dibandingkan dengan daya yang paling rendah yaitu variasi *square* 80 Hz- sinus 80Hz memerlukan daya 19.2 W dapat menurunkan suhu sebesar 0.93°C. Akan tetapi pendinginan optimum adalah saat penurunan suhu maksimum tetapi dengan daya yang rendah yaitu variasi *square* 80 Hz – Sinus 120 Hz yang memerlukan daya 24 W dapat menurunkan suhu 1.7°C. Oleh karena itu sistem pendinginan dengan jet sintetik *tidak memerlukan daya listrik yang tinggi untuk mendapatkan nilai penurunan suhu yang lebih tinggi.*

5.2 Saran

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

1. Pengkajian lebih lanjut mengenai hubungan bentuk orifis jet sintetik persegi, segitiga, lingkaran, maupun persegi panjang dengan berbagai aspek rasio.
2. Pengkajian lebih lanjut mengenai perbandingan jarak aksial jet sintetik(L)-Diameter orifis (d) untuk sistem pendinginan jet sintetik yang lebih optimum.
3. Menggunakan DAQ untuk meng-akuisisi data secara otomatis dengan komputer.
4. Menggunakan alat visualisasi aliran seperti PIV untuk penelitian lebih lanjut guna melihat pola aliran dan fase peralihan jet sintetik dari vortex menjadi *turbulent mixing* kemudian laminar dan membentuk *wall jet* pada *boundary layer* pada *heat sink*.
5. Pelat yang digunakan sebaiknya pelat datar untuk mempermudah penghitungan dan mengurangi asumsi-asumsi.
6. Penelitian mengenai efek resirkulasi pada jarak aksial rendah untuk mengetahui efek kenaikan suhu pada daerah sekitar kaviti membran penghasil jet sintetik.
7. Penggunaan *hot wire* yang lebih akurat lagi hingga dapat membuat suatu profil kecepatan jet pada jarak aksial tertentu.
8. Suhu lingkungan pengambilan data yang lebih seragam sehingga membuat perhitungan konveksi alami lebih akurat.
9. Daya listrik laboratorium yang dijaga dengan stabilizer sehingga membuat panas dari *heater* yang lebih konstan.
10. Perbandingan temperature eksperimen dengan estimasi CFD masih belum dapat dikaji, sehingga masih perlu dilakukan kajian lebih lanjut.
11. Pengkondisian model prototipe jet sintetik di simulasi CFD.

12. Penelitian lebih lanjut mengenai perpaduan gelombang konstruktif dan destruktif pada jet sintetik yang dihasilkan eksitasi gelombang kombinasi dimana jenis dan frekuensi membran atas dan membran bawah berbeda.
13. Pembuatan prototipe model aktuator jet sintetik dengan memanfaatkan getaran ganda dari membran.
14. Penggunaan *speaker* sebagai membran penghasil Jet sintetik.
15. Penelitian mengenai efek termoakustik pada membran penghasil jet sintetik.



DAFTAR REFERENSI

Pavlova, M. Amitay, "Electronic cooling with synthetic jet impingement." *Journal of Heat Transfer* 128 (2006) 897–907.

Agrawal, Amit., Puranik, Bhalchandra., Chaudari, Mangesh., "Effect of Orifice Shape in Synthetic Jet Based Impingement Cooling" *International Journal of Experimental Thermal and Fluid Science* 34, Elsevier Ltd, 2010, pp. 246-256

B.L Smith, A. Glezer, "The Formation and Evolution of Synthetic Jets." *Physics of Fluid* 10, 1998, pp. 2281-2297

Chaudari M, Puranik B, & Agrawal A, "Heat Transfer Analysis in A Rectangular Duct Without and With Cross flow and An Impinging Synthetic Jet." *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, Vol.33 No.2 June 2010.

Chaudari, M., Puranik, B., Agrawal, A., "Multiple orifice synthetic jet for improvement in impingement heat transfer." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 54, Elsevier Ltd, 2011, pp. 2056-2065

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

Krishnan, Gopi., Mohseni, Kamran. "An Experimental Study of A Radial Wall Jet Formed by the Normal Impingement of A Round Synthetic Jet." *European Journal of Mechanics B/Fluids* 29, Elsevier Ltd, 2010, pp. 269-277

Haliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2000). *Fundamental of Physics*(6th ed.). New York: John Willey & Sons, Inc

Harinaldi, Rhakasywi, D., & Defriadi, R. (2011). Flow and heat transefer characteristics of an impinging synthetic air jet under sinusoidal and triangular wave forcing. *IJET-IJENS: 2011*

Holman, J.P. (1986). *Heat Transfer*(6th ed.). New York: McGraw-Hill.

Incropera, Frank., DeWitt, David., “Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 4th edition”, John Wiley & Sons, 1996

J. Zhang, X. Tan, “Experimental study on flow and heat transfer characteristics of synthetic jet driven by piezoelectric actuator.“, *Journal of Science in China Series E: Technological Sciences* 50 (2007) 221–229.

Jagannatha, D., Narayanaswamy, R., & Chandratilleke, T.T. (2007). Performance characteristics of a synthetic jet module for electronic cooling. pp. 1-10.

Jain , Manu., Puranik, B., Agrawal, B., “A numerical investigation of effect of cavity and orifice parameters on the characteristic of a synthetic jet flow.” *International Journal of Sensors and Actuators A* 165, Elsevier Ltd, 2011, pp. 351-366

King, A.J.C., & Jagannatha, D. (2009, July). *Simulation of synthetic jets with non-sinusoidal forcing functions for heat transfer applications*. Paper presented at the 18th World IMACS / MODSIM Congress, Cairns, Australia.

Lasance, C.J.M., & Aarts, R.M. (2008). *Synthetic jet cooling partI: Overview of heat transfer and acoustics*. Paper presented at the 24th IEEE SEMI-THERM Symposium

M.B. Gillespie, W.Z. Black, C. Rinehart, A. Glezer, “Local convective heat transfer from a constant heat flux flat plate cooled by synthetic air jets. “, *Journal of Heat Transfer* 128 (2006) 990–1000.

Mahalingam R & Glezer A, "An Actively Cooled Heat Sink Integrated With Synthetic Jets." *Proc. 35th National Heat Transfer Conf.* Anaheim, CA (2001).

Mahalingam, R., Heffington, S., Lee, J., & Schwickert, M. (2006). Newisys server processor cooling augmentation using synthetic jet ejectors. *IEEE*, pp. 705-709.

Mahalingam, Raghav (2007). *Modeling of synthetic jet ejectors for electronics cooling*. Paper presented at the 23rd IEEE SEMI-THERM Symposium.

McGuinn, A., Persoons, T., Valiorgue, P., O'Donovan, T.S., & Murray, D.B. (2008). *Heat transfer measurements of an impinging synthetic air jet with constant stroke length*. Paper presented at the 5th European Thermal-Sciences Conference, Netherlands.

Munson, Bruce R., Young, Donald F., Okiishi, Theodore H. (2004). *Mekanika Fluida* (Harinaldi & Budiarmo, Penerjemah). Jakarta: Erlangga.

P. Gulati, V. Katti, S.V. Prabhu, "Influence of the shape of the nozzle on local heat transfer distribution between smooth flat surface and impinging air jet. ", *International Journal of Thermal Sciences* 48 (3) (2009) 602–617.

Persoons, T., O'Donovan, T.S., & Murray, D.B. (2008, July). *Improving the measurement accuracy of PIV in a synthetic jet flow*. Paper presented at the 14th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal.

Persoon, Tim., McGuinn, Alan., Murray, Darina., "A General Correlation for the Stagnation Point Nusselts Number of an Axisymmetric Impinging Synthetic Jet", *International Journal of Heat Transfer*, 54 (2011) pp 3900-3908.

Qayoum, Adnan., Gupta V., Panigrahi, P.K., Muralidhar, K., “Influence of Amplitude and Frekuensi Modulation on Flow Created by A Synthetic Jet Actuator.” *International Journal of Sensors and Actuators A162*, Elsevier Ltd, 2010, pp. 36-50.

Sharma, R.N. (2007, December). *Some insights into synthetic jet actuation from analytical modelling*. Paper presented at the 16th Australasian Fluid Mechanics Conference.

Smith, B L., G. Swift., Synthetic Jet at Larger Reynolds Number and Comparison to Continuous Jets, AIAA paper 2001-3030

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

Timoshenko, S., *Theory of Plate and Shells*, Mc-Graw-Hill, 1999

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

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



L1
Data Temperatur *Synthetic Jet*
pada termokopel di titik 1

temperatur Square-Sin									
Menit ke	sqr 80			sqr 120			sin160		
	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	58,4	58,4	58,4	58,4	58,4	58,4	58,4	58,4	58,4
2	58,0	58,2	58,2	57,0	58,3	58,0	58,2	58,2	58,2
4	57,8	58,1	58,0	57,7	58,1	57,9	58,0	58,1	58,0
6	57,1	58,0	57,5	57,2	58,3	57,4	57,8	57,7	57,8
8	57,1	57,8	57,5	57,0	58,1	57,4	57,7	57,7	57,6
10	57,0	57,1	57,3	57,0	57,8	56,8	57,4	57,5	57,6
12	57,0	56,8	57,0	56,8	57,4	56,8	57,4	57,5	57,6
14	56,7	55,1	57,0	56,7	57,4	56,7	57,5	57,3	57,5
16	56,7	55,0	56,6	56,7	57,3	56,7	57,7	57,4	57,5
18	56,5	55,1	56,6	57,0	57,0	56,3	57,7	57,4	57,5
20	56,5	55,0	56,3	57,0	57,3	56,3	57,4	57,6	57,7
22	56,4	55,1	55,9	56,9	57,4	56,5	57,6	57,7	57,8
24	56,5	55,0	55,9	56,9	57,3	56,4	57,5	57,6	57,7
26	56,3	55,1	55,8	56,7	57,0	56,5	57,4	57,7	57,8
28	56,3	55,0	56,1	56,7	57,0	56,3	57,5	57,5	57,6
30	56,2	55,4	55,9	57,0	56,8	56,3	57,7	57,5	57,7
32	56,3	55,1	55,8	57,3	56,6	56,4	57,7	57,6	57,7
34	56,4	55,1	56,1	57,3	56,6	56,6	57,5	57,5	57,6
36	56,4	56,3	56,5	57,1	56,4	56,4	57,4	57,5	57,6
38	56,3	56,5	57,0	57,2	56,4	56,5	57,6	57,6	57,7
40	56,4	55,6	57,0	57,2	56,5	56,3	57,8	57,6	57,7
42	56,2	55,4	57,2	57,0	56,2	56,3	57,8	57,7	57,8
44	56,3	55,1	56,2	57,2	56,2	56,5	57,7	57,7	57,8
46	56,2	56,2	56,1	56,7	56,3	56,5	57,8	57,8	57,9
48	56,3	56,4	56,2	56,7	56,5	56,6	57,8	57,8	57,8
50	56,4	56,2	56,3	57,0	56,3	56,6	57,7	57,8	57,8
52	56,4	55,1	56,4	56,8	56,6	56,4	57,7	57,7	57,8
54	56,2	55,0	55,9	57,0	56,5	56,7	57,8	57,7	57,9
56	56,3	55,0	56,1	57,0	56,5	56,8	57,8	57,7	57,9
58	56,3	55,3	56,2	57,2	56,7	56,9	57,7	57,7	57,9
60	56,3	55,4	56,4	57,3	56,7	56,9	57,7	57,7	57,9

*Catatan: Satuan temperatur dalam °C

L2
 Data Temperatur *Synthetic Jet*
 pada termokopel di titik 2

temperatur Square-Sin									
Menit ke	sqr 80			sqr 120			sin160		
	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	58,4	58,4	58,4	58,4	58,4	58,4	58,4	58,4	58,4
2	57,5	58,3	58,3	56,8	58,2	58,0	58,1	58,2	58,2
4	56,7	58,2	58,1	57,5	58,0	57,9	57,9	58,1	58,0
6	56,2	58,1	57,6	57,0	58,2	57,4	57,7	57,7	57,8
8	56,1	57,8	57,6	56,8	58,0	57,4	57,6	57,7	57,6
10	56,1	57,1	57,4	56,8	57,7	56,8	57,3	57,5	57,6
12	56,4	56,8	57,1	56,6	57,3	56,8	57,3	57,5	57,6
14	56,7	55,1	57,1	56,5	57,3	56,7	57,4	57,3	57,5
16	56,7	55,0	56,7	56,5	57,2	56,7	57,6	57,4	57,5
18	56,5	55,1	56,7	56,8	56,9	56,3	57,6	57,4	57,5
20	56,5	55,0	56,4	56,8	57,2	56,3	57,3	57,6	57,7
22	56,4	55,1	56,0	56,7	57,3	56,5	57,5	57,7	57,8
24	56,5	55,0	56,0	56,7	57,2	56,4	57,4	57,6	57,7
26	56,3	55,1	55,9	56,5	56,9	56,5	57,3	57,7	57,8
28	56,3	55,0	56,2	56,5	56,9	56,3	57,4	57,5	57,6
30	56,2	55,4	56,0	56,8	56,7	56,3	57,6	57,5	57,7
32	56,3	55,1	55,9	57,1	56,5	56,4	57,6	57,6	57,7
34	56,4	55,1	56,2	57,1	56,5	56,6	57,4	57,5	57,6
36	56,4	56,3	56,6	56,9	56,3	56,4	57,3	57,5	57,6
38	56,3	56,5	57,1	57,0	56,3	56,5	57,5	57,6	57,7
40	56,4	55,6	57,1	57,0	56,4	56,3	57,7	57,6	57,7
42	56,2	55,4	57,3	56,8	56,1	56,3	57,7	57,7	57,8
44	56,3	55,1	56,3	57,0	56,1	56,5	57,6	57,7	57,8
46	56,2	56,2	56,2	56,5	56,2	56,5	57,7	57,8	57,9
48	56,3	56,4	56,3	56,5	56,4	56,6	57,7	57,8	57,9
50	56,4	56,2	56,4	56,8	56,2	56,6	57,7	57,8	57,9
52	56,4	55,1	56,5	56,6	56,5	56,4	57,6	57,7	57,8
54	56,2	55,0	56,0	56,8	56,4	56,7	57,6	57,7	57,8
56	56,3	55,0	56,2	56,8	56,4	56,8	57,6	57,7	57,8
58	56,3	55,1	56,3	57,0	56,6	56,9	57,6	57,7	57,8
60	56,4	55,3	56,6	57,0	56,6	56,9	57,6	57,7	57,8

*Catatan: Satuan temperatur dalam °C

L3
Data Temperatur *Synthetic Jet*
pada termokopel di titik 3

temperatur Square-Sin									
Menit ke	sqr 80			sqr 120			sin160		
	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	58,4	58,4	58,4	58,4	58,4	58,4	58,4	58,4	58,4
2	58,3	58,2	58,3	57,0	58,2	58,0	58,2	58,2	58,2
4	58,1	58,3	58,1	57,7	58,0	57,7	58,0	58,1	58,0
6	57,4	58,1	58,1	57,2	58,2	57,4	57,8	57,7	57,8
8	57,4	57,8	57,6	57,0	58,0	57,2	57,7	57,7	57,6
10	57,3	57,1	57,4	57,0	57,7	56,6	57,4	57,5	57,6
12	57,3	56,8	57,1	56,8	57,3	56,6	57,4	57,5	57,6
14	57,0	55,1	57,1	56,7	57,3	56,5	57,5	57,3	57,5
16	57,0	55,0	56,7	56,7	57,2	56,5	57,7	57,4	57,5
18	56,8	55,1	56,7	57,0	56,9	56,1	57,7	57,4	57,5
20	56,8	55,0	56,4	57,0	57,2	56,1	57,4	57,6	57,7
22	56,7	55,1	56,0	56,9	57,3	56,3	57,6	57,7	57,8
24	56,8	55,0	56,0	56,9	57,2	56,2	57,5	57,6	57,7
26	56,6	55,1	55,9	56,7	56,9	56,3	57,4	57,7	57,8
28	56,6	55,0	56,2	56,7	56,9	56,1	57,5	57,5	57,6
30	56,5	55,4	56,0	57,0	56,7	56,1	57,7	57,5	57,7
32	56,6	55,1	55,9	57,3	56,5	56,2	57,7	57,6	57,7
34	56,7	55,1	56,2	57,3	56,5	56,4	57,5	57,5	57,6
36	56,7	56,3	56,6	57,1	56,3	56,2	57,4	57,5	57,6
38	56,6	56,5	57,1	57,2	56,3	56,3	57,6	57,6	57,7
40	56,7	55,6	57,1	57,2	56,4	56,1	57,8	57,6	57,7
42	56,5	55,4	57,3	57,0	56,1	56,1	57,8	57,7	57,8
44	56,6	55,1	56,3	57,2	56,1	56,3	57,7	57,7	57,8
46	56,5	56,2	56,2	56,7	56,2	56,3	57,8	57,8	57,9
48	56,6	56,4	56,3	56,7	56,4	56,4	57,8	57,8	57,8
50	56,7	56,2	56,4	57,0	56,2	56,4	57,7	57,8	57,8
52	56,7	55,1	56,5	56,8	56,5	56,2	57,7	57,7	57,8
54	56,5	55,0	56,0	57,0	56,4	56,5	57,8	57,7	57,8
56	56,6	55,0	56,2	57,0	56,4	56,6	57,8	57,7	57,7
58	56,6	55,1	56,3	57,2	56,6	56,6	57,7	57,9	57,9
60	56,7	55,4	56,5	57,2	56,5	56,6	57,7	57,9	57,9

*Catatan: Satuan temperatur dalam °C

L4

Data Temperatur *Synthetic Jet*
pada termokopel di titik 4

temperatur Square-Sin									
Menit ke	sqr 80			sqr 120			sin160		
	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	58,4	58,4	58,4	58,4	58,4	58,4	58,4	58,4	58,4
2	57,8	57,5	58,2	58,3	58,2	57,9	58,0	58,2	58,3
4	57,5	57,2	58,2	58,3	58,1	57,6	57,8	57,9	57,9
6	57,6	56,9	58,1	58,2	58,0	57,6	57,8	57,9	57,8
8	57,4	56,8	58,1	58,0	58,1	57,7	57,9	58,1	58,1
10	57,3	56,7	58,1	57,5	57,8	57,8	58,2	58,1	58
12	57,4	56,8	58,1	57,3	57,5	57,8	58,2	58,4	58,2
14	57,7	56,9	57,8	57,1	57,2	58,0	58,2	58,3	58,1
16	57,4	56,7	57,5	56,9	57,0	57,8	57,9	58,2	58
18	57,3	56,6	57,3	56,8	56,9	57,6	57,4	57,2	57,4
20	57,4	56,6	57,0	56,9	56,6	57,4	56,8	56,9	57,1
22	57,3	56,5	56,8	57,0	56,6	57,2	56,8	56,9	56,9
24	57,5	56,3	56,8	57,2	56,8	56,9	56,6	56,9	56,9
26	57,5	56,3	57,3	57,3	57,0	56,8	57,2	57,4	56,7
28	57,6	56,2	57,5	57,3	57,2	56,6	57,3	57,6	57,5
30	57,6	56,4	57,7	57,6	57,2	56,6	57,5	57,7	57
32	57,6	56,5	57,8	57,6	57,4	56,8	57,6	57,7	56,8
34	57,6	56,5	57,8	57,4	57,5	57,1	57,4	57,5	56,7
36	57,4	56,5	57,4	57,1	57,0	57,3	57,2	57,3	57
38	57,5	56,7	57,3	56,9	56,9	57,4	57,1	57,2	57
40	57,6	56,9	57,0	56,8	56,7	57,6	56,8	56,9	57,1
42	57,6	56,7	57,0	56,6	56,6	57,7	56,8	56,7	57,3
44	57,5	56,7	56,8	56,5	56,5	57,6	56,5	57,6	57,1
46	57,8	56,7	56,8	56,6	56,3	57,3	56,6	56,7	57,1
48	57,9	56,6	57,0	56,8	56,4	57,1	56,8	56,9	56,8
50	57,8	56,5	57,3	57,1	56,5	56,9	57,1	57,2	56,8
52	57,4	56,5	57,4	57,2	56,8	56,8	57,2	57,3	56,7
54	57,7	56,3	57,5	57,3	56,9	56,6	57,3	57,4	56,6
56	57,5	56,5	57,7	57,5	57,1	56,6	57,5	57,6	57
58	57,6	56,6	57,7	57,5	57,3	56,8	57,5	57,6	57,1
60	57,5	56,7	57,7	57,4	57,3	57,0	57,4	57,6	57,8

*Catatan: Satuan temperatur dalam °C

L5
Data Temperatur *Synthetic Jet*
pada termokopel di titik 5

temperatur Square-Sin									
	sqr 80			sqr 120			sin160		
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	58,4	58,4	58,4	58,4	58,4	58,4	58,4	58,4	58,4
2	58,3	58,4	58,1	57,9	58,3	58,0	58,2	58,2	58,2
4	58,0	58,2	57,9	57,6	58,1	57,9	58,0	58,1	58,0
6	57,3	58,1	57,4	57,1	58,3	57,4	57,8	57,7	57,8
8	57,3	57,8	57,4	56,9	58,1	57,4	57,7	57,7	57,6
10	57,2	57,1	57,2	56,9	57,8	56,8	57,4	57,5	57,6
12	57,2	56,8	56,8	56,7	57,4	56,8	57,4	57,5	57,6
14	56,9	55,1	56,8	56,6	57,4	56,7	57,5	57,3	57,5
16	56,9	55,0	56,5	56,6	57,3	56,7	57,7	57,4	57,5
18	56,7	55,1	56,5	56,9	57,0	56,3	57,7	57,4	57,5
20	56,7	55,0	56,2	56,9	57,3	56,3	57,4	57,6	57,7
22	56,6	55,1	55,8	56,8	57,4	56,5	57,6	57,7	57,8
24	56,7	55,0	55,8	56,8	57,3	56,4	57,5	57,6	57,7
26	56,5	55,1	55,7	56,6	57,0	56,5	57,4	57,7	57,8
28	56,5	55,0	56,0	56,6	57,0	56,3	57,5	57,5	57,6
30	56,4	55,4	55,8	56,9	56,8	56,3	57,7	57,5	57,7
32	56,5	55,1	55,7	57,2	56,6	56,4	57,7	57,6	57,7
34	56,6	55,1	56,0	57,2	56,6	56,6	57,5	57,5	57,6
36	56,6	56,3	56,4	57,0	56,4	56,4	57,4	57,5	57,6
38	56,5	56,5	56,8	57,1	56,4	56,5	57,6	57,6	57,7
40	56,6	55,6	56,8	57,1	56,5	56,3	57,8	57,6	57,7
42	56,4	55,4	57,1	56,9	56,2	56,3	57,8	57,7	57,8
44	56,5	55,1	56,1	57,1	56,2	56,5	57,7	57,7	57,8
46	56,4	56,2	56,0	56,6	56,3	56,5	57,8	57,8	57,9
48	56,5	56,4	56,1	56,6	56,5	56,6	57,8	57,8	57,9
50	56,6	56,2	56,2	56,9	56,3	56,6	57,7	57,8	57,8
52	56,6	55,1	56,3	56,7	56,6	56,4	57,7	57,7	57,8
54	56,4	55,0	55,8	56,9	56,5	56,7	57,8	57,7	57,9
56	56,5	55,0	56,0	56,9	56,5	56,8	57,8	57,9	58,0
58	56,6	55,1	56,1	57,1	56,7	56,9	57,9	57,9	58,0
60	56,7	55,4	56,3	57,2	56,7	56,9	57,9	57,9	58,0

*Catatan: Satuan temperatur dalam °C

L6
Data Temperatur *Synthetic Jet*
pada termokopel di titik 6

temperatur Square-Sin									
Menit ke	sqr 80			sqr 120			sin160		
	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	58,4	58,4	58,4	58,4	58,4	58,4	58,4	58,4	58,4
2	56,4	58,0	57,8	58,2	58,2	57,8	57,8	58,3	58,4
4	56,2	57,7	57,7	57,8	58,1	57,4	57,9	58,3	58,3
6	56,4	57,3	57,5	57,4	58,0	57,0	57,7	58,1	58,2
8	56,2	56,9	57,3	57,2	57,6	56,5	57,4	57,7	57,8
10	56,5	55,6	57,0	56,7	56,5	56,4	57,4	57,7	57,8
12	56,4	55,6	56,6	56,5	56,6	56,3	57,2	57,5	57,6
14	56,3	55,7	56,7	56,6	56,5	56,2	57,3	57,3	57,6
16	56,2	55,8	57,3	56,4	56,6	56,3	57,2	57,3	57,3
18	56,2	55,8	57,3	56,6	56,7	56,2	57,4	57,4	57,3
20	56,5	56,0	57,5	56,6	56,7	56,0	57,4	57,5	57,6
22	56,2	55,8	57,5	57,2	56,8	56,1	57,8	57,4	57,5
24	56,3	56,0	57,7	56,9	56,6	56,0	57,7	57,3	57,5
26	56,4	55,9	57,3	56,6	57,1	56,2	57,6	57,3	57,5
28	56,2	55,7	57,4	56,7	57,1	56,2	57,4	57,5	57,6
30	56,5	55,6	57,4	57,2	57,3	56,4	57,3	57,2	57,6
32	56,3	55,8	57,2	57,2	56,7	56,5	57,3	57,2	57,3
34	56,3	56,0	57,4	56,9	57,1	56,5	57,6	57,5	57,3
36	56,3	56,2	57,3	56,6	57,3	56,7	57,4	57,7	57,6
38	56,2	56,0	56,4	56,6	57,3	56,5	57,6	57,7	57,5
40	56,2	56,0	56,4	56,4	56,8	56,7	57,3	57,4	57,3
42	56,6	55,8	56,2	56,5	57,1	56,5	57,4	57,3	57,5
44	56,6	55,8	57,3	56,4	56,8	56,5	57,8	57,3	57,5
46	56,2	55,6	57,5	56,4	57,3	56,3	57,4	57,2	57,5
48	56,4	55,7	57,4	56,6	57,1	56,1	57,2	57,6	57,6
50	56,3	55,9	57,3	56,6	56,8	56,1	57,6	57,2	57,3
52	56,2	56,1	57,4	56,4	56,8	56,3	57,4	57,4	57,3
54	56,2	56,1	57,3	56,5	56,8	56,5	57,6	57,5	57,5
56	56,5	55,7	57,1	56,5	56,8	56,7	57,6	57,3	57,5
58	56,5	55,8	57,0	56,4	56,7	56,5	57,4	57,3	57,6
60	56,5	55,7	57,0	56,4	56,7	56,5	57,4	57,3	57,6

*Catatan: Satuan temperatur dalam °C

L7

Data Perbedaan suhu selama 1 jam pemanasan dengan heater *Synthetic Jet* pada termokopel di titik 4

Penurunan Suhu setelah 1 jam	square - Sinus								
	Square 80 Hz			Square 120 Hz			square 160 Hz		
	sinus 80 Hz	sinus 120 Hz	sinus 160 Hz	sinus 80 Hz	sinus 120 Hz	sinus 160 Hz	sinus 80 Hz	sinus 120 Hz	sinus 160 Hz
titik 4	0,9	1,7	0,7	1	1,1	1,4	1	0,8	0,6
titik 1	2,1	3,0	2,0	1,1	1,7	1,5	0,7	0,7	0,5
titik 2	2,0	3,1	1,8	1,4	1,8	1,5	0,8	0,7	0,6
titik 3	1,7	3,0	1,9	1,2	1,9	1,8	0,7	0,5	0,5
titik 5	1,7	3,0	2,1	1,2	1,7	1,5	0,5	0,5	0,4
titik 6	1,9	2,7	1,4	2,0	1,7	1,9	1,0	1,1	0,8
temperatur rata-rata	1,7	2,7	1,6	1,3	1,6	1,6	0,8	0,7	0,6

*Catatan: Satuan temperatur dalam °C

L8

Data Koefisien Konveksi *Synthetic Jet*
pada termokopel di titik 4

Menit ke-	sqr 80			sqr 120			sin160		
	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	30,20	29,70	30,40	29,80	30,10	30,40	30,30	30,20	30,10
2	29,58	28,79	30,20	29,70	29,90	29,90	29,90	30,00	30,00
4	29,27	28,49	30,20	29,70	29,80	29,60	29,70	29,70	29,60
6	29,38	28,19	30,10	29,60	29,70	29,60	29,70	29,70	29,50
8	29,17	28,09	30,10	29,40	29,80	29,70	29,80	29,90	29,80
10	29,07	27,99	30,10	28,90	29,50	29,80	30,10	29,90	29,70
12	29,17	28,09	30,10	28,70	29,20	29,80	30,10	30,20	29,90
14	29,48	28,19	29,80	28,50	28,90	30,00	30,10	30,10	29,80
16	29,17	27,99	29,50	28,30	28,70	29,80	29,80	30,00	29,70
18	29,07	27,89	29,30	28,20	28,60	29,60	29,30	29,00	29,10
20	29,17	27,89	29,00	28,30	28,30	29,39	28,70	28,70	28,80
22	29,07	27,79	28,79	28,40	28,30	29,19	28,70	28,70	28,60
24	29,27	27,59	28,79	28,60	28,50	28,89	28,50	28,70	28,60
26	29,27	27,59	29,30	28,70	28,70	28,79	29,10	29,20	28,40
28	29,38	27,48	29,50	28,70	28,90	28,59	29,20	29,40	29,20
30	29,38	27,69	29,70	29,00	28,90	28,59	29,40	29,50	28,70
32	29,38	27,79	29,80	29,00	29,10	28,79	29,50	29,50	28,50
34	29,38	27,79	29,80	28,80	29,20	29,09	29,30	29,30	28,40
36	29,17	27,79	29,40	28,50	28,70	29,29	29,10	29,10	28,70
38	29,27	27,99	29,30	28,30	28,60	29,39	29,00	29,00	28,70
40	29,38	28,19	29,00	28,20	28,40	29,60	28,70	28,70	28,80
42	29,38	27,99	29,00	28,00	28,30	29,70	28,70	28,50	29,00
44	29,27	27,99	28,79	27,90	28,20	29,60	28,40	29,40	28,80
46	29,58	27,99	28,79	28,00	28,00	29,29	28,50	28,50	28,80
48	29,69	27,89	29,00	28,20	28,10	29,09	28,70	28,70	28,50
50	29,58	27,79	29,30	28,50	28,20	28,89	29,00	29,00	28,50
52	29,17	27,79	29,40	28,60	28,50	28,79	29,10	29,10	28,40
54	29,48	27,59	29,50	28,70	28,60	28,59	29,20	29,20	28,30
56	29,27	27,79	29,70	28,90	28,80	28,59	29,40	29,40	28,70
58	29,38	27,89	29,70	28,90	29,00	28,79	29,40	29,40	28,80
60	29,27	27,99	29,70	28,80	29,00	28,99	29,30	29,40	29,50

*Catatan: Satuan koefisien konveksi dalam $W/m^2.K$

L9

Data perubahan Temperatur *Synthetic Jet* pada termokopel di titik 4

Menit ke-	sqr 80			sqr 120			sin160		
	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	30,20	29,70	30,40	29,80	30,10	30,40	30,30	30,20	30,10
2	29,58	28,79	30,20	29,70	29,90	29,90	29,90	30,00	30,00
4	29,27	28,49	30,20	29,70	29,80	29,60	29,70	29,70	29,60
6	29,38	28,19	30,10	29,60	29,70	29,60	29,70	29,70	29,50
8	29,17	28,09	30,10	29,40	29,80	29,70	29,80	29,90	29,80
10	29,07	27,99	30,10	28,90	29,50	29,80	30,10	29,90	29,70
12	29,17	28,09	30,10	28,70	29,20	29,80	30,10	30,20	29,90
14	29,48	28,19	29,80	28,50	28,90	30,00	30,10	30,10	29,80
16	29,17	27,99	29,50	28,30	28,70	29,80	29,80	30,00	29,70
18	29,07	27,89	29,30	28,20	28,60	29,60	29,30	29,00	29,10
20	29,17	27,89	29,00	28,30	28,30	29,39	28,70	28,70	28,80
22	29,07	27,79	28,79	28,40	28,30	29,19	28,70	28,70	28,60
24	29,27	27,59	28,79	28,60	28,50	28,89	28,50	28,70	28,60
26	29,27	27,59	29,30	28,70	28,70	28,79	29,10	29,20	28,40
28	29,38	27,48	29,50	28,70	28,90	28,59	29,20	29,40	29,20
30	29,38	27,69	29,70	29,00	28,90	28,59	29,40	29,50	28,70
32	29,38	27,79	29,80	29,00	29,10	28,79	29,50	29,50	28,50
34	29,38	27,79	29,80	28,80	29,20	29,09	29,30	29,30	28,40
36	29,17	27,79	29,40	28,50	28,70	29,29	29,10	29,10	28,70
38	29,27	27,99	29,30	28,30	28,60	29,39	29,00	29,00	28,70
40	29,38	28,19	29,00	28,20	28,40	29,60	28,70	28,70	28,80
42	29,38	27,99	29,00	28,00	28,30	29,70	28,70	28,50	29,00
44	29,27	27,99	28,79	27,90	28,20	29,60	28,40	29,40	28,80
46	29,58	27,99	28,79	28,00	28,00	29,29	28,50	28,50	28,80
48	29,69	27,89	29,00	28,20	28,10	29,09	28,70	28,70	28,50
50	29,58	27,79	29,30	28,50	28,20	28,89	29,00	29,00	28,50
52	29,17	27,79	29,40	28,60	28,50	28,79	29,10	29,10	28,40
54	29,48	27,59	29,50	28,70	28,60	28,59	29,20	29,20	28,30
56	29,27	27,79	29,70	28,90	28,80	28,59	29,40	29,40	28,70
58	29,38	27,89	29,70	28,90	29,00	28,79	29,40	29,40	28,80
60	29,27	27,99	29,70	28,80	29,00	28,99	29,30	29,40	29,50

*Catatan: Satuan temperatur dalam °C

L10

Data Tegangan Listrik, Arus Listrik, dan Daya Listrik pada membran *Synthetic Jet* pada termokopel di titik 4

	sqr 80			sqr 120			sin160		
	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
Tegangan Listrik (V)	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Arus Listrik (Ampere)	1,6	2	2,5	2	2,4	2,9	2,5	2,9	3,4
daya listrik (Watt)	19,2	24	30	24	28,8	34,8	30	34,8	40,8



L11

Data kalor heater, kalor konveksi bebas, dan kalor net *Synthetic Jet* pada termokopel di titik 4

	sqr 80			sqr 120			sin160		
	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
q joule	936,01	936,01	936,01	936,01	936,01	936,01	936,01	936,01	936,01
qloss	204,21	199,86	205,95	202,47	203,10	200,10	204,50	201,79	201,12
qnet	731,81	736,15	730,06	733,55	732,91	735,91	731,51	734,22	734,89

*Catatan: Satuan panas dalam W/m^2



L12
Data bilangan Nusselts
pada termokopel di titik 4

Menit ke-	sqr 80			sqr 120			sqr 160		
	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	19,39	19,83	19,21	19,69	19,48	19,37	19,31	19,45	19,53
2	19,79	20,45	19,34	19,76	19,61	19,69	19,57	19,58	19,60
4	20,00	20,67	19,34	19,76	19,68	19,89	19,70	19,78	19,86
6	19,93	20,89	19,40	19,83	19,74	19,89	19,70	19,78	19,93
8	20,07	20,97	19,40	19,96	19,68	19,83	19,64	19,65	19,73
10	20,14	21,04	19,40	20,31	19,88	19,76	19,44	19,65	19,80
12	20,07	20,97	19,40	20,45	20,08	19,76	19,44	19,45	19,66
14	19,86	20,89	19,60	20,59	20,29	19,63	19,44	19,51	19,73
16	20,07	21,04	19,80	20,74	20,43	19,76	19,64	19,58	19,80
18	20,14	21,12	19,94	20,81	20,50	19,89	19,97	20,26	20,20
20	20,07	21,12	20,14	20,74	20,72	20,03	20,39	20,47	20,41
22	20,14	21,19	20,28	20,66	20,72	20,17	20,39	20,47	20,56
24	20,00	21,35	20,28	20,52	20,58	20,38	20,53	20,47	20,56
26	20,00	21,35	19,94	20,45	20,43	20,45	20,11	20,12	20,70
28	19,93	21,43	19,80	20,45	20,29	20,59	20,04	19,98	20,13
30	19,93	21,27	19,67	20,24	20,29	20,59	19,91	19,91	20,48
32	19,93	21,19	19,60	20,24	20,15	20,45	19,84	19,91	20,63
34	19,93	21,19	19,60	20,38	20,08	20,24	19,97	20,05	20,70
36	20,07	21,19	19,87	20,59	20,43	20,10	20,11	20,19	20,48
38	20,00	21,04	19,94	20,74	20,50	20,03	20,18	20,26	20,48
40	19,93	20,89	20,14	20,81	20,65	19,89	20,39	20,47	20,41
42	19,93	21,04	20,14	20,96	20,72	19,83	20,39	20,61	20,27
44	20,00	21,04	20,28	21,03	20,79	19,89	20,61	19,98	20,41
46	19,79	21,04	20,28	20,96	20,94	20,10	20,53	20,61	20,41
48	19,72	21,12	20,14	20,81	20,87	20,24	20,39	20,47	20,63
50	19,79	21,19	19,94	20,59	20,79	20,38	20,18	20,26	20,63
52	20,07	21,19	19,87	20,52	20,58	20,45	20,11	20,19	20,70
54	19,86	21,35	19,80	20,45	20,50	20,59	20,04	20,12	20,77
56	20,00	21,19	19,67	20,31	20,36	20,59	19,91	19,98	20,48
58	19,93	21,12	19,67	20,31	20,22	20,45	19,91	19,98	20,41
60	20,00	21,04	19,67	20,38	20,22	20,31	19,97	19,98	19,93

*Catatan: bilangan Nusselts tidak berdimensi

L13
Data bilangan Reynolds
pada termokopel di titik 4

	square 80			Square 120			Square 160		
	sin 80	sin 120	sin160	sin 80	sin 120	sin160	sin 80	sin 120	sin160
Re atas	1421,7	1421,7	1421,7	2132,5	2132,5	2132,5	2843,4	2843,4	2843,4
Re bawah	1421,7	2132,5	2843,4	1421,7	2132,5	2843,4	1421,7	2132,5	2843,4
Re gabungan	1421,7	1777,1	2132,5	1777,1	2132,5	2487,9	2132,5	2487,9	2843,4

*Catatan: bilangan Reynolds tidak berdimensi

