



UNIVERSITAS INDONESIA

**KARAKTERISTIK TERMOAKUSTIK BERDASARKAN VARIASI
POSISI DAN PANJANG *STACK* SERTA VARIASI FREKUENSI**

SKRIPSI

Sabdo Waluyo

07 06 26 7332

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN

DEPOK

JUNI 2011



UNIVERSITAS INDONESIA

**KARAKTERISTIK TERMOAKUSTIK BERDASARKAN VARIASI
POSISI DAN PANJANG *STACK* SERTA VARIASI FREKUENSI**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

Sabdo Waluyo

07 06 26 7332

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN

DEPOK

JUNI 2011

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Sabdo Waluyo

NPM : 0706267332

Tanda Tangan :

Tanggal : 13 Juni 2011

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Sabdo Waluyo
NPM : 0706267332
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Skripsi : KARAKTERISTIK TERMOAKUSTIK
BERDASARKAN VARIASI POSISI DAN
PANJANG *STACK* SERTA VARIASI
FREKUENSI

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Dr.-Ing. Ir. Nandy Setiadi Djaya Putra ()
Penguji : Prof. Dr.-Ing Raldi A Koestoer. ()
Penguji : Dr. Agus S. Pamitran, ST, M.Eng. ()
Penguji : Dr. Ir Danardono AS DEA ()

Ditetapkan di : Depok
Tanggal : 13 Juni 2011

KATA PENGANTAR

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

1. ALLAH SWT Tuhan yang maha esa dan Nabi Muhammad SAW
2. Prof. Dr-Ing. Ir Nandy S. Putra selaku pembimbing penulisan skripsi. Tanpa saran bimbingan serta bantuan beliau tentunya Penulis tidak akan dapat menyelesaikan skripsi ini.
3. Dr.Ir. Warjito. M.Eng selaku pembimbing akademis penulis yang telah membantu penulis menyusun rencana study selama 4 tahun ini.
4. “Senior – Senior” Lab *Applied Heat Transfer*, Mas Wayan, Mas Haol, Mas fakhrudin, Pak teguh, Ridho, Hedri, dan yang lainnya yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu yang telah membantu, menemani dan mendukung penulis menyelesaikan Skripsi.
5. Dini Agustina S.T selaku pembimbing spiritual termoakustik, akhirnya tercapai juga bu karakteristik termoakustik.
6. Ikhsan Setiawan, S.Si., M.Si. dari Fisika UGM dan Dri-Ing. Cuk Imawan dari Fisika Universitas Indonesia dan Dr.-Ing. Ir. Nasruddin M.Eng dari DTM UI yang telah banyak membantu penulis dengan meluangkan waktu untuk memberikan pengetahuan, dukungan dan nasehatnya bagi penulis dan partner.
7. Orang tua Penulis, Markidin Karsomo dan Rachmi Zakiah, yang tiada letihnya memberikan dukungan moril dan materil dari penulis lahir ke dunia yang fana ini hingga penulis dapat menyelesaikan tulisan ini. Semoga penulis kelak dapat membalas jasa serta mebahagiakan mama dan papa.

8. Keluarga penulis, Mercy Rachmawati, M. Arifin Rachmanto, Mariyatul Qibtiyah, M.Nur Firmansyah sebagai kakak dan adik kandung dari penulis yang selalu mendukung penulis di saat susah dan senang serta memotivasi hingga penulis menyelesaikan tulisan ini.
9. Partner terbaik yang bisa penulis dapatkan, Gilang AIV. Yang selalu ada di sisi penulis hampir setahun ini. *Don't make this thesis is our end of partnership but make this for beginning and I just wanna say "thermoacoustic is ours!"*
10. Teman Seperjuangan di lab, dalah, cossa, bimo, kadal, Ardha, tasia. Sumber motivasi dan juga menghibur penulis dalam masa-masa di lab.
11. Sahabat terbaik Ruth Gloria dan iman rizky utama yang selalu bermain bersama, Tasia larosa sahabat yang selalu ada di saat susah maupun senang selama mengarungi masa 4 tahun ini.
12. Sahabat penulis Nindya Permata Sari yang sudah meluangkan waktunya untuk mendengar keluh kesah dan menghibur penulis selama ini.
13. "Saudara" Dite, Alwin, Latif, Dika, Fariz Sahabat spesial penulis di kampus yang 4 Tahun terakhir tidak terpisah dari penulis baik di dalam kampus maupun diluar.
14. Teman mesin 2007 yang penulis banggakan yang kehebatan dan potensinya tidak perlu diragukan lagi. Kita angkatan terbaik terlengkap terkonkret. *Mechanical engineering is our identity!*
15. Sahabat-sahabat SMA SMP dan SD yang tidak bias disebutkan satu persatu.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 13 Juni 2011

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS
AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

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

Nama : Sabdo Waluyo

NPM : 0706267332

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 TERMOAKUSTIK BERDASARKAN VARIASI
POSISI DAN PANJANG *STACK* SERTA VARIASI FREKUENSI**

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 13 Juni 2011

Yang menyatakan

(Sabdo Waluyo)

ABSTRAK

Nama : Sabdo Waluyo
Program Studi : Teknik Mesin
Judul : karakteristik Termoakustik berdasarkan Posisi, Panjang Dan Model Stack Serta Variasi Frekuensi Terhadap Kinerja Suatu Pendingin Termoakustik

Alat pendingin adalah salah satu peralatan rumah tangga yang sering kita gunakan, refrigerator sangat bermanfaat karena dapat membuat kondisi makanan yang kita simpan tetap bagus keadaannya, hal itu membuat alat pendingin sebagai salah satu peralatan rumah tangga yang sering kita jumpai. Termoakustik refrigerator adalah system pendinginan yang ramah lingkungan karena menggunakan media kerja udara atau gas mulia sebagai pengganti system Freon atau system pendinginan konvensional yang dapat membahayakan lingkungan. System ini berkerja dengan memanfaatkan gelombang suara yang dihasilkan oleh loudspeaker sebagai salah satu komponen system tersebut. Gelombang suara yang dihasilkan memberikan perpindahan panas dari tendon dingin menuju tendon panas melalui sebuah alat pemindahan panas yang disebut dengan stack dimana diletakan di dalam pipa resonator. Dalam pengujian, kami menguji sebuah alat termoakustik sederhana dengan pipa resonator dengan panjang 80cm terbuat dengan bahan PVC menggunakan pengaruh variasi posisi ,panjang dan model stack serta variasi frekuensi yang digunakan. Perpindahan panas dari tendon dingin ke tendon panas menghasilkan penurunan temperatur sebesar 6°C pada tendon dingin dan kenaikan temperatur pada tendon panas sebesar 3°C setelah dioperasikan selama 30 menit.

Keywords : *thermoakustik, resonator, stack, frekuensi*

ABSTRACT

Name : Sabdo Waluyo
Major : Mechanical Engineering
Title : The characterization of Thermoacoustic refrigerator Device Based on Position, length and model of *stack* with variation frequency influence to performance thermoacoustic.

Refrigerator is one of a household appliance that is commonly used. The needs of maintaining food at the good condition make refrigerator become “must have” equipment in every household. Thermoacoustic refrigerator is an environmentally friendly cooling system because it uses air or noble gas as a working medium rather than freon or other hazardous gas as in conventional cooling system. This system utilizes sound wave to provide work for transferring heat from the cold to the hot reservoirs through an heat exchanger element called as stack which is placed in a resonator tube. The sound source system consists of a loudspeaker, an audio amplifier, and a signal generator. In this experiment the main parts of the device consist of a cylindrical resonator made of PVC pipe has 80 cm length, a loudspeaker as a sound source, and a stack as a heat transfer element. The device was operated with variation position, length and shape of stack and also variation resonance frequency, using atmospheric air as a working medium. A heat transfer from cold reservoir to hot reservoir has been observed where the cold reservoir temperature decreased about 6°C and the hot reservoir temperature increased about 3°C after 30 minutes of the device operation.

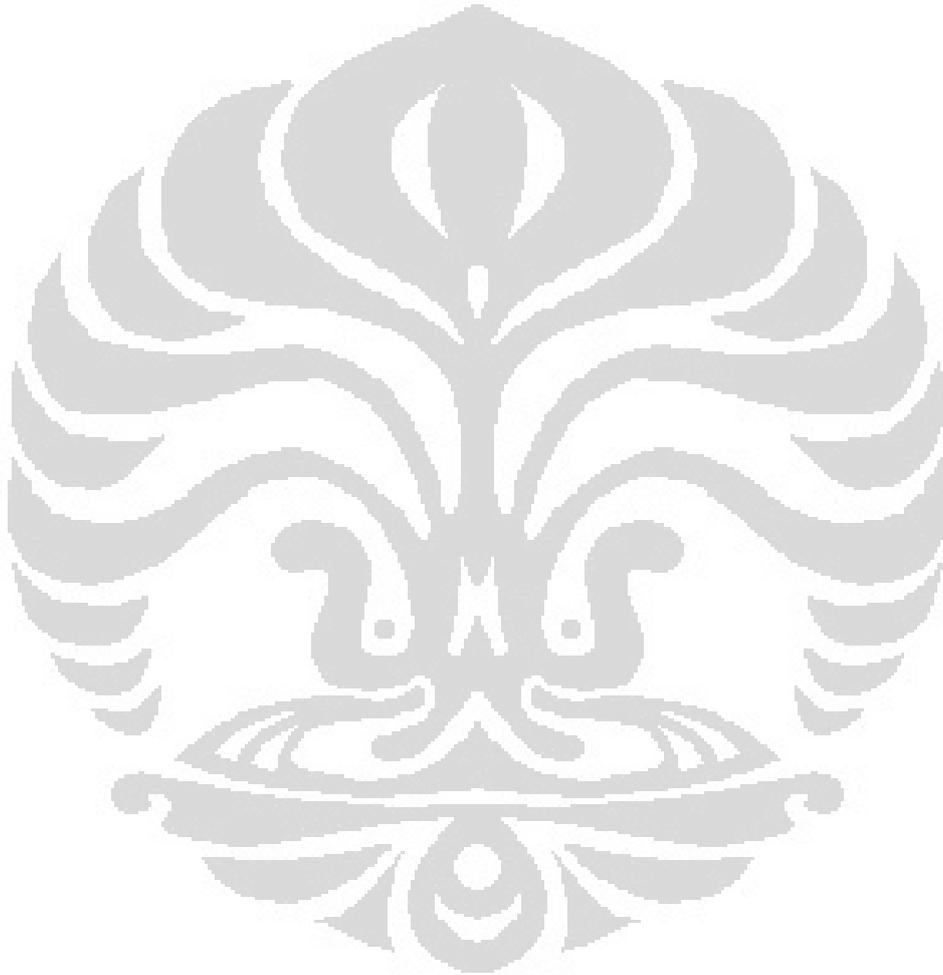
Keywords : *thermoacoustic, resonator, stack, frequency*

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
KATA PENGANTAR	Error! Bookmark not defined.
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	vii
ABSTRAK	viii
ABSTRACT	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan	3
1.3 Manfaat	4
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Metodologi	4
1.6 Sistematika Penulisan	5
BAB 2 DASAR TEORI	7
2.1 Definisi Termoakustik	7
2.2 Jenis – Jenis Termoakustik	8
2.3 Komponen pada termoakustik	8
2.4 Teori Termoakustik	10
2.5 Desain Perangkat Termoakustik	12
2.6 Keuntungan dan Aplikasi	14
BAB 3 PERANCANGAN DAN PERAKITAN	16
3.1 Parameter design termoakoustik	16
3.2 Desain	17
3.3 Parameter	20
3.3.1 Parameter proses	20
3.3.2 Parameter gas kerja = udara	21
3.3.3 Parameter design <i>stack</i>	21
3.4 Konstruksi dan skema pengujian	23
3.4.1 Skema Pengujian	23

3.4.2	Konstruksi	24
BAB 4	PENGUJIAN	27
4.1	Cara kerja termoakustik	27
4.2	Set-up pengujian	29
4.3	Langkah-langkah pengaturan	33
4.4	Pengujian.....	34
BAB 5	HASIL DAN ANALISA	36
5.1	Grafik dan analisa termoakustik pada panjang <i>stack</i> 11 cm dengan frekuensi 275 serta $\delta K = 0,5$ mm	36
5.1.1	Posisi <i>stack</i> pada x_s 5,5 cm	36
5.1.2	Posisi <i>stack</i> pada x_s 6,5 cm	37
5.1.3	Posisi <i>stack</i> pada x_s 7,5 cm	39
5.1.4	Posisi <i>stack</i> pada x_s 8,5 cm	40
5.1.5	Posisi <i>stack</i> pada x_s 9,5 cm	42
5.1.6	Posisi <i>stack</i> pada x_s 10,5 cm.....	43
5.1.1	Posisi <i>stack</i> pada x_s 11,5 cm.....	44
5.2	Grafik dan analisa termoakustik pada panjang <i>stack</i> 11 cm dengan frekuensi 106 serta $\delta K = 1$ mm	45
5.2.1	Posisi <i>stack</i> pada x_s 5,5 cm	46
5.2.2	Posisi <i>stack</i> pada x_s 6,5 cm	47
5.2.3	Posisi <i>stack</i> pada x_s 7,5 cm	48
5.2.4	Posisi <i>stack</i> pada x_s 8,5 cm	50
5.2.5	Posisi <i>stack</i> pada x_s 9,5 cm	51
5.2.6	Posisi <i>stack</i> pada x_s 10,5 cm.....	53
5.2.1	Posisi <i>stack</i> pada x_s 11,5 cm.....	54
5.3	Grafik dan analisa termoakustik pada panjang <i>stack</i> 10 cm dengan frekuensi 106 serta $\delta K = 1$ mm.....	55
5.3.1	Posisi <i>stack</i> pada x_s 10 cm	55
5.3.2	Posisi <i>stack</i> pada x_s 11 cm	57
5.3.3	Posisi <i>stack</i> pada x_s 12 cm	58
5.3.4	Posisi <i>stack</i> pada x_s 13 cm	60
5.3.5	Posisi <i>stack</i> pada x_s 14 cm	61
5.3.1	Posisi <i>stack</i> pada x_s 15 cm	62
5.4	Grafik dan table perbandingan posisi dan panjang <i>stack</i> serta variasi frekuensi	63
5.4.1	Perbandingan frekuensi $\delta_k=0.5$ mm pada 275 Hz dengan $\delta_k= 1$ mm 106 Hz	64

5.4.2	Perbandingan panjang <i>stack</i> 10cm dan 11 cm dengan $\delta_k = 1\text{mm}$	106
	Hz	67
5.4.3	Perbandingan posisi <i>Stack</i> dengan $\delta_k = 1\text{mm}$ pada 106 Hz dan $L_s = 10\text{cm}$	69
BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN		70
6.1	Kesimpulan	70
6.2	Saran	71
DAFTAR PUSTAKA		72
LAMPIRAN		74



DAFTAR GAMBAR

gamabr 2. 1 komponen termoakustik.....	9
gamabr 2. 2 siklus termoakustik [16].....	12
gambar 3. 1 skema pengambilan data frekuensi.....	18
gambar 3. 2 grafik Voltage Vs frekuensi	19
gambar 3. 3 skema panjang stack (L_s) dan posisi stack (X_s) [14]	22
gambar 3. 4 Rancangan tabung resonator beserta box speaker.....	23
gambar 3. 5(a) & (b) konstruksi dan skema pengujian alat.....	24
gambar 3. 6 Bagian-bagian tabung resonator dan tutup speaker.....	25
gambar 3. 7 Konstruksi <i>stack</i> pertama (Gulungan)	26
gambar 4. 1 Contoh Sederhana Sistem Termoakustik.....	28
gambar 4. 2 Proses Kerja sistem Termoakustik dalam Resonator [15].....	29
gambar 4. 3 <i>Amplifier</i>	30
gambar 4. 4 Skema <i>amplifier</i> rakit sederhana	31
gambar 4. 5 Termokopel	32
gambar 4. 6 Modul NI 9211	33
gambar 4. 7 chassis cDAQ-9174 NI.....	33
gambar 5. 1 <i>stack</i> dengan konfigurasi $L_s = 11\text{cm}$ $f=275\text{ hz}$ $\delta K = 0,5\text{ mm}$ $x_s 5,5\text{ cm}$	36
gambar 5. 2 <i>stack</i> dengan konfigurasi $L_s = 11\text{cm}$ $f=275\text{ hz}$ $\delta K = 0,5\text{ mm}$ $x_s 6,5\text{ cm}$	38
gambar 5. 3 <i>stack</i> dengan konfigurasi $L_s = 11\text{cm}$ $f=275\text{ hz}$ $\delta K = 0,5\text{ mm}$ $x_s 7,5\text{ cm}$	39
gambar 5. 4 <i>stack</i> dengan konfigurasi $L_s = 11\text{cm}$ $f=275\text{ hz}$ $\delta K = 0,5\text{ mm}$ $x_s 8,5\text{ cm}$	40
gambar 5. 5 <i>stack</i> dengan konfigurasi $L_s = 11\text{cm}$ $f=275\text{ hz}$ $\delta K = 0,5\text{ mm}$ $x_s 9,5\text{ cm}$	42
gambar 5. 6 <i>stack</i> dengan konfigurasi $L_s = 11\text{cm}$ $f=275\text{ hz}$ $\delta K = 0,5\text{ mm}$ $x_s 10,5\text{ cm}$	43
gambar 5. 7 dengan konfigurasi $L_s = 11\text{cm}$ $f=275\text{ hz}$ $\delta K = 0,5\text{ mm}$ $x_s 11,5\text{ cm}$..	44

gambar 5. 8 <i>stack</i> dengan konfigurasi $L_s = 11\text{cm}$ $f=106\text{ hz}$ $\delta K = 1\text{ mm}$ $x_s = 5,5\text{ cm}$	46
gambar 5. 9 <i>stack</i> dengan konfigurasi $L_s = 11\text{cm}$ $f=106\text{ hz}$ $\delta K = 1\text{ mm}$ $x_s = 6,5\text{ cm}$	47
gambar 5. 10 <i>stack</i> dengan konfigurasi $L_s = 11\text{cm}$ $f=106\text{ hz}$ $\delta K = 1\text{ mm}$ $x_s = 7,5\text{ cm}$	48
gambar 5. 11 <i>stack</i> dengan konfigurasi $L_s = 11\text{cm}$ $f=106\text{ hz}$ $\delta K = 1\text{ mm}$ $x_s = 8,5\text{ cm}$	50
gambar 5. 12 <i>stack</i> dengan konfigurasi $L_s = 11\text{cm}$ $f=106\text{ hz}$ $\delta K = 1\text{ mm}$ $x_s = 9,5\text{ cm}$	51
gambar 5. 13 <i>stack</i> dengan konfigurasi $L_s = 11\text{cm}$ $f=106\text{ hz}$ $\delta K = 1\text{ mm}$ $x_s = 10,5\text{ cm}$	53
gambar 5. 14 <i>stack</i> dengan konfigurasi $L_s = 11\text{cm}$ $f=106\text{ hz}$ $\delta K = 1\text{ mm}$ $x_s = 11,5\text{ cm}$	54
gambar 5. 15 <i>stack</i> dengan konfigurasi $L_s = 10\text{ cm}$ $f=106\text{ hz}$ $\delta K = 1\text{ mm}$ $x_s = 10\text{ cm}$	56
gambar 5. 16 <i>stack</i> dengan konfigurasi $L_s = 10\text{cm}$ $f=106\text{ hz}$ $\delta K = 1\text{ mm}$ $x_s = 11\text{ cm}$	57
gambar 5. 17 <i>stack</i> dengan konfigurasi $L_s = 10\text{cm}$ $f=106\text{ hz}$ $\delta K = 1\text{ mm}$ $x_s = 12\text{ cm}$	58
gambar 5. 18 <i>stack</i> dengan konfigurasi $L_s = 10\text{cm}$ $f=106\text{ hz}$ $\delta K = 1\text{ mm}$ $x_s = 13\text{ cm}$	60
gambar 5. 19 <i>stack</i> dengan konfigurasi $L_s = 10\text{cm}$ $f=106\text{ hz}$ $\delta K = 1\text{ mm}$ $x_s = 14\text{ cm}$	61
gambar 5. 20 <i>stack</i> dengan konfigurasi $L_s = 10\text{cm}$ $f=106\text{ hz}$ $\delta K = 1\text{ mm}$ $x_s = 15\text{ cm}$	62
gambar 5. 21 perbandingan ($T_{\text{panas}} - T_{\text{dingin}}$) maksimum	65
gambar 5. 22 perbandingan $T_{\text{ambient}} - T_{\text{dingin}}$ minimum	65
gambar 5. 23 perbandingan ($T_{\text{panas}} - T_{\text{dingin}}$) maksimum	67
gambar 5. 24 perbandingan $T_{\text{ambient}} - T_{\text{dingin}}$ minimum	68

DAFTAR TABEL

tabel 5. 1 tabel perbandingan frekuensi pada perbedaan temperatur	64
tabel 5. 2 Perbandingan panjang <i>stack</i> 10cm dan 11 cm dengan $\delta_k = 1\text{mm}$ 106 Hz pada posisi yang sama.....	67
tabel 5. 3 hasil <i>stack</i> dengan $\delta_k = 1\text{mm}$ pada 106 Hz dan $L_s = 10\text{cm}$	69



DAFTAR LAMPIRAN

- 1) Data Pengujian Modul Termoakustik pada model *stack* Gulungan dengan panjang stack 11 cm dengan frekuensi 275 Hz serta $\delta_K = 0.5$ mm dan posisi Stack Xs 5.5 cm.
- 2) Data Pengujian Modul Termoakustik pada model *stack* Gulungan dengan panjang stack 11 cm dengan frekuensi 275 Hz serta $\delta_K = 0.5$ mm dan posisi Stack Xs 6.5 cm
- 3) Data Pengujian Modul Termoakustik pada model *stack* Gulungan dengan panjang stack 11 cm dengan frekuensi 275 Hz serta $\delta_K = 0.5$ mm dan posisi Stack Xs 7.5 cm.
- 4) Data Pengujian Modul Termoakustik pada model *stack* Gulungan dengan panjang stack 11 cm dengan frekuensi 275 Hz serta $\delta_K = 0.5$ mm dan posisi Stack Xs 8.5 cm.
- 5) Data Pengujian Modul Termoakustik pada model *stack* Gulungan dengan panjang stack 11 cm dengan frekuensi 275 Hz serta $\delta_K = 0.5$ mm dan posisi Stack Xs 9.5 cm.
- 6) Data Pengujian Modul Termoakustik pada model *stack* Gulungan dengan panjang stack 11 cm dengan frekuensi 275 Hz serta $\delta_K = 0.5$ mm dan posisi Stack Xs 10.5 cm.
- 7) Data Pengujian Modul Termoakustik pada model *stack* Gulungan dengan panjang stack 11 cm dengan frekuensi 275 Hz serta $\delta_K = 0.5$ mm dan posisi Stack Xs 11.5 cm.
- 8) Data Pengujian Modul Termoakustik pada model *stack* Gulungan dengan panjang stack 11 cm dengan frekuensi 106 Hz serta $\delta_K = 1$ mm dan posisi Stack Xs 5.5 cm.
- 9) Data Pengujian Modul Termoakustik pada model *stack* Gulungan dengan panjang stack 11 cm dengan frekuensi 106 Hz serta $\delta_K = 1$ mm dan posisi Stack Xs 6.5 cm.
- 10) Data Pengujian Modul Termoakustik pada model *stack* Gulungan dengan panjang stack 11 cm dengan frekuensi 106 Hz serta $\delta_K = 1$ mm dan posisi Stack Xs 7.5 cm.
- 11) Data Pengujian Modul Termoakustik pada model *stack* Gulungan dengan panjang stack 11 cm dengan frekuensi 106 Hz serta $\delta_K = 1$ mm dan posisi Stack Xs 8.5 cm.
- 12) Data Pengujian Modul Termoakustik pada model *stack* Gulungan dengan panjang stack 11 cm dengan frekuensi 106 Hz serta $\delta_K = 1$ mm dan posisi Stack Xs 9.5 cm.

- 13) Data Pengujian Modul Termoakustik pada model *stack* Gulungan dengan panjang stack 11 cm dengan frekuensi 106 Hz serta $\delta_K = 1$ mm dan posisi Stack Xs 10.5 cm.
- 14) Data Pengujian Modul Termoakustik pada model *stack* Gulungan dengan panjang stack 11 cm dengan frekuensi 106 Hz serta $\delta_K = 1$ mm dan posisi Stack Xs 11.5 cm.
- 15) Data Pengujian Modul Termoakustik pada model *stack* Gulungan dengan panjang stack 10 cm dengan frekuensi 106 Hz serta $\delta_K = 1$ mm dan posisi Stack Xs 10 cm.
- 16) Data Pengujian Modul Termoakustik pada model *stack* Gulungan dengan panjang stack 10 cm dengan frekuensi 106 Hz serta $\delta_K = 1$ mm dan posisi Stack Xs 11 cm.
- 17) Data Pengujian Modul Termoakustik pada model *stack* Gulungan dengan panjang stack 10 cm dengan frekuensi 106 Hz serta $\delta_K = 1$ mm dan posisi Stack Xs 12 cm.
- 18) Data Pengujian Modul Termoakustik pada model *stack* Gulungan dengan panjang stack 10 cm dengan frekuensi 106 Hz serta $\delta_K = 1$ mm dan posisi Stack Xs 13 cm.
- 19) Data Pengujian Modul Termoakustik pada model *stack* Gulungan dengan panjang stack 10 cm dengan frekuensi 106 Hz serta $\delta_K = 1$ mm dan posisi Stack Xs 14 cm.
- 20) Data Pengujian Modul Termoakustik pada model *stack* Gulungan dengan panjang stack 10 cm dengan frekuensi 106 Hz serta $\delta_K = 1$ mm dan posisi Stack Xs 15 cm.
- 21) Data Pengujian Modul Termoakustik pada model *stack Plate* dengan panjang stack 10 cm dengan frekuensi 106 Hz serta $\delta_K = 1$ mm dan posisi Stack Xs 10 cm.
- 22) Data Pengujian Modul Termoakustik pada model *stack Plate* dengan panjang stack 10 cm dengan frekuensi 106 Hz serta $\delta_K = 1$ mm dan posisi Stack Xs 11 cm.
- 23) Data Pengujian Modul Termoakustik pada model *stack Plate* dengan panjang stack 10 cm dengan frekuensi 106 Hz serta $\delta_K = 1$ mm dan posisi Stack Xs 12 cm.
- 24) Data Pengujian Modul Termoakustik pada model *stack Plate* dengan panjang stack 10 cm dengan frekuensi 106 Hz serta $\delta_K = 1$ mm dan posisi Stack Xs 13 cm.
- 25) Data Pengujian Modul Termoakustik pada model *stack Plate* dengan panjang stack 10 cm dengan frekuensi 106 Hz serta $\delta_K = 1$ mm dan posisi Stack Xs 14 cm.
- 26) Gambar kerja

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Kondisi masyarakat global yang menerapkan teknologi maju seperti sekarang ini memudahkan seseorang untuk mendapatkan sesuatu dengan sangat cepat kapan pun dan dimanapun mereka berada. Dari hal tersebut banyak manfaat yang didapat, contohnya hal yang sulit pada masa dahulu, sekarang menjadi sangat praktis. Seperti halnya menjentikkan jari, maka semua akan didapat dengan mudah. Hal ini didukung oleh kemajuan teknologi yang sangat pesat sekali dan untuk mendukungnya, maka perusahaan –perusahaan yang berbasis teknologi berlomba menciptakan teknologi yang sangat canggih, yang pada akhirnya mendorong konsumen berlomba untuk mendapatkannya. Semakin berkembangnya teknologi yang ada pasti menimbulkan efek yang negatif seperti contoh kecilnya berupa dampak terhadap lingkungan.

Isu yang hangat diperbincangkan orang tentang dampak lingkungan yaitu *global warming*. *global warming* [1,2] adalah fenomena alam yang dimana terjadi fenomena efek rumah kaca. Kita sudah mengetahui bahwa Segala sumber energi yang terdapat di bumi berasal dari matahari. Sebagian besar energi tersebut berbentuk radiasi gelombang pendek, termasuk cahaya tampak. Ketika energi tiba permukaan bumi, ia berubah dari cahaya menjadi panas yang menghangatkan bumi. Permukaan Bumi, akan menyerap sebagian panas dan memantulkan kembali sisanya. Sebagian dari panas ini berwujud radiasi infra merah gelombang panjang ke angkasa luar. Namun sebagian panas tetap terperangkap di atmosfer bumi akibat menumpuknya jumlah gas rumah kaca[1] antara lain uap air, karbon dioksida, dan metana yang menjadi perangkap gelombang radiasi ini. Gas-gas ini menyerap dan memantulkan kembali radiasi gelombang yang dipancarkan bumi dan akibatnya panas tersebut akan tersimpan di permukaan bumi. Keadaan ini

terjadi terus menerus sehingga mengakibatkan suhu rata-rata tahunan bumi terus meningkat.

Dengan adanya masalah tentang perusakan lingkungan sehingga manusia dituntut untuk menemukan dan mengembangkan berbagai macam teknologi alternatif yang lebih efisien dan tidak berdampak terhadap lingkungan. Salah satu penemuan yang masih terdengar asing di telinga kita dan dapat berguna sebagai teknologi di masa yang akan datang adalah Termoakustik[3,4,6,7]. Termoakustik memiliki keunggulan, terutama karena piranti ini tidak menggunakan medium pendingin yang berbahaya bagi lingkungan, seperti CFC dan HFC[5,6], melainkan menggunakan medium pendingin yang ramah lingkungan, seperti udara dan gas-gas mulia. Keunggulan lainnya diantaranya adalah konstruksinya relatif lebih sederhana dan ketersediaan medium kerja yang melimpah sehingga pembuatannya memerlukan biaya yang relatif murah. Termoakustika(thermoacoustic) adalah suatu bidang yang berhubungan dengan fenomena fisis di mana perbedaan suhu dapat membangkitkan gelombang bunyi, dan sebaliknya gelombang bunyi dapat menghasilkan perbedaan suhu[3-8]. Suatu gelombang bunyi (akustik) di dalam gas biasanya hanya dipandang sebagai osilasi tekanan dan gerak, padahal osilasi suhu juga selalu terjadi. Bila bunyi merambat dalam kanal-kanal kecil, maka kalor yang berosilasi juga akan mengalir ke dan dari dinding dinding kanal. Gabungan semua osilasi ini akan menghasilkan fenomena atau efek termoakustik. Alat yang digunakan untuk menimbulkan efek termoakustik disebut piranti termoakustik. Piranti termoakustik dapat dibedakan menjadi dua, yaitu (a) mesin kalor termoakustik [4] yang dapat membangkitkan gelombang akustik dengan adanya perbedaan suhu, dan (b) pendingin termoakustik[3,5-8] atau pompa kalor termoakustik yang dapat menghasilkan perbedaan suhu dengan menggunakan gelombang akustik.

Tetapi sampai saat ini masih jarang buku – buku ataupun artikel – artikel yang membahas mengenai teknologi *Thermoacoustic* dan juga karena selama ini penerapannya pun masih dalam lingkup terbatas, sehingga sistem ini jarang dikenal. Maka pada tugas akhir ini, dengan berbekal teori – teori yang pernah penulis dapat semasa kuliah di teknik mesin, mendorong penulis untuk mempraktekkan teori – teori tersebut dengan membuat alat peraga mesin kalor

Thermoacoustic, dengan harapan kita dapat lebih mengenal cara kerja dari sistem ini sehingga mendorong kita teknik mesin Universitas Indonesia khususnya untuk dapat ikut mengembangkan teknologi *Thermoacoustic* ini di masa mendatang.

Artikel-artikel yang membahas mengenai pengembangan termoakustik yang dipublikasikan dalam jurnal-jurnal ilmiah populer seperti yang ditulis oleh Swift [9-12] dan oleh Garret dan Backhaus[10] telah menjadikan konsep-konsep yang mendasari fenomena termoakustik dapat dipahami oleh khalayak luas. Sebelumnya, Wheatley *et al*[11] telah menyajikan pemahaman beberapa fenomena dalam termoakustik dan aplikasinya pada mesin kalor akustik. Sebuah pustaka acuan yang banyak dirujuk berbagai artikel tentang termoakustik dan sangat berharga bagi pemahaman kita tentang konsep-konsep yang terlibat dalam termoakustik telah ditulis oleh Swift[9-11]. Beberapa piranti termoakustik yang bertujuan demonstrasi dan penelitian banyak dibuat. Sebuah pendingin termoakustik telah dibuat dan beroperasi dengan baik, Pada penelitian ini, penulis ingin menelaah lebih lanjut tentang konversi suara menjadi tenaga pendingin melalui tabung resonator. Beberapa penelitian telah dilakukan oleh para peneliti sebelumnya dan mendapatkan hasil yang cukup memuaskan seperti *research* yang dilakukan oleh M.E.H Tijani [13,14]dkk, telah mampu mencapai temperatur pada sisi dingin hingga -65°C . Hal ini mendorong kami sebagai mahasiswa ingin mengembangkan dan mencoba membuat demonstrasi alat peraga termoakustik dengan harapan dapat lebih mengetahui cara kerja sistem ini sehingga nantinya kami dapat mengembangkan teknologi termoakustik di masa yang akan datang.

1.2 Tujuan

1. Merancang dan membuat alat mesin *Thermoacoustic* sehingga dapat mengetahui prinsip kerjanya.
2. Membuktikan fenomena bahwa adanya suatu getaran yang merambat pada suatu medium berupa udara menyebabkan perbedaan tekanan udara sehingga menghasilkan perbedaan suhu.

1.3 Manfaat

Mengetahui fenomena yang terjadi pada *Thermoacoustic*, sehingga diperoleh informasi yang dapat digunakan untuk mengembangkan alat ini pada kehidupan sehari-hari. Selain itu, *Thermoacoustic* juga memanfaatkan udara sekitar dan gas-gas mulia sehingga tidak membahayakan lingkungan sekitar.

1.4 Batasan masalah

Pembatasan masalah pada penelitian ini meliputi :

- A. *Thermoacoustic* bekerja pada suhu ruangan
- B. Menggunakan media udara sebagai fluida kerja.
- C. Menggunakan penguat suara atau *loudspeaker* sebagai pembangkit gelombang suara (daya kerja).
- D. Merancang dan membangun alat *Thermoacoustic* sebagai pompa kalor agar tercapai suhu terendah di sisi dingin (*cold side*) sehingga dapat diaplikasikan sebagai pemompa kalor pada alat-alat sehari-hari
- E. Penggunaan *stack* yang terbuat dari plastik dengan memiliki ketebalan 0.5mm dengan panjang 10 cm dan 11 cm, pada *stack* dilekatkan benang pancing sepanjang *stack* dengan jarak antar pancing sekitar 1 cm kemudian *stack* tersebut digulung membentuk roll [14]. Begitu juga dengan *stack* yang lain direkatkan potongan-potongan *fiber glass* dengan tebal 5 mm lalu di gulung.
- F. Alat ini berkerja pada frekuensi 106 dan 275 Hz, pemilihan frekuensi di dapatkan dari hasil percobaan

1.5 Metodologi

Metodologi penelitian yang akan dilakukan adalah sebagai berikut :

- A. Studi literatur
Studi literatur merupakan tahapan pembelajaran referensi yang berkaitan dengan materi bahasan yang berasal dari buku, jurnal dan situs di internet.
- B. Pengujian Alat Peraga *Thermoacoustic* sebagai Pompa Kalor

Pengujian bertujuan untuk mengetahui karakteristik dan cara kerja dari termoakustik sebagai pompa kalor dengan menggunakan media udara bebas dan gas Helium sebagai fluida kerja agar dicapai suhu terendah pada sisi dingin alat *Thermoacoustic*

C. Perancangan Alat *Thermoacoustic*

Perancangan alat *Thermoacoustic* dilakukan dengan mempertimbangkan sifat material, pemilihan bahan *stack*, perancangan resonator, pemilihan komponen-komponen *speaker* yang sesuai dan memungkinkan alat mampu menghasilkan perbedaan tekanan dan temperatur yang dibutuhkan untuk diaplikasikan sebagai pemompa kalor pada *Vaccine Carrier*.

D. Pengujian Alat *Thermoacoustic*

Pengujian alat dilakukan melalui proses pemilihan jenis suara dan pembangkit gelombang suara (*speaker*) yang sesuai. Pengambilan data dilakukan dengan pemberian termokopel pada titik-titik tertentu pada alat *Thermoacoustic* untuk mengetahui besar perbedaan tekanan terhadap suhu di dua sisi berbeda dalam resonator.

E. Analisa dan Kesimpulan Hasil Pengujian

Setelah data diolah, maka dilakukan proses analisa terhadap grafik yang diperoleh. Dari analisa tersebut akan diperoleh kesimpulan terhadap proses pengujian, mengetahui performa kerja alat *Thermoacoustic* yang telah dibuat dan memberikan saran untuk pengembangan desain alat *Thermoacoustic* selanjutnya.

1.6 Sistematika penulisan

Sistematika penulisan skripsi ini dilakukan menurut urutan bab – bab sebagai berikut :

BAB 1 PENDAHULUAN

Bagian ini berisi latar belakang yang melandasai penulisan skripsi, perumusan masalah, tujuan penelitian, pembatasan masalah, metodologi penelitian dan sistematika penulisan.

BAB 2 TEORI DASAR

Bagian ini menjelaskan teori – teori yang mendukung penelitian ini dan perkembangan teknologi termoakustik. Tinjauan pustaka ini diambil dari beberapa buku, jurnal dan situs – situs internet

BAB 3 PERANCANGAN DAN PENGUJIAN *THERMOACOUSTIC*

Bagian ini berisi penjelasan secara lengkap tentang peralatan – peralatan, instalasi, langkah – langkah , serta jenis pengujian yang dilakukan.

BAB 4 HASIL DAN ANALISA PENGUJIAN *THERMOACOUSTIC*

Bagian ini berisi analisa data – data hasil pengujian alat *Thermoacoustic*

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

Bagian ini akan berisi kesimpulan dari seluruh analisa yang dilakukan dan dilengkapi saran terhadap pengembangan desain selanjutnya.

BAB 2

DASAR TEORI

2.1 Definisi termoakustik

Termoakustika (thermoacoustic) adalah suatu bidang yang berhubungan dengan fenomena fisis di mana perbedaan suhu dapat membangkitkan gelombang bunyi, dan sebaliknya gelombang bunyi dapat menghasilkan perbedaan suhu[3-8]. Suatu gelombang bunyi (akustik) di dalam gas biasanya hanya dipandang sebagai osilasi tekanan dan gerak, padahal osilasi suhu juga selalu terjadi. Bila bunyi merambat dalam kanal-kanal kecil, maka kalor yang beresilasi juga akan mengalir ke dan dari dinding dinding kanal. Gabungan semua osilasi ini akan menghasilkan fenomena atau efek termoakustik. Pada umumnya, hanyalah osilasi tekanan dan gerak yang diperhatikan pada rambatan gelombang bunyi pada gas, namun sebenarnya osilasi suhu juga terjadi pada saat yang bersamaan. Namun, gelombang suara konvensional seperti percakapan kita sehari-hari belumlah cukup untuk menghasilkan gradien temperatur yang diinginkan yaitu hanya menghasilkan perbedaan temperatur sebesar 10^{-4} °C. Oleh karena itu sistem termoakustik ini digunakan untuk menciptakan perbedaan temperatur yang lebih tinggi sehingga dapat dimanfaatkan dalam kehidupan sehari-hari.

Dalam sistem termoakustik refrigerator (pendingin), perbedaan temperatur didapatkan dari gelombang suara akustik. Gelombang suara dihasilkan oleh sumber bunyi berupa *loudspeaker* lalu dialirkan menuju tabung resonator dan *stack*. Lalu gelombang bunyi tersebut beresonansi pada tabung resonator dan memasuki kanal – kanal kecil yang berada pada *stack* sehingga terjadi perbedaan temperatur pada dua ujung *stack* yang dilalui oleh gelombang akustik tersebut. Pada termoakustik, kalor berpindah dari sisi dengan temperatur lebih tinggi (*hot side*) menuju sisi dengan temperatur lebih rendah (*cold side*) dengan gelombang akustik yang beresonansi dalam tabung bekerja sebagai kerja eksternal. Gelombang longitudinal dari gelombang akustik mengakibatkan partikel gas beresilasi maju dan mundur di dalam dinding – dinding *stack*. Kompresi pada gas mengakibatkan

temperatur normal gas beresilasi karena proses adiabatik alami dari gelombang akustik / suara. Apabila temperatur gas menjadi lebih tinggi daripada dinding *stack* terdekat, maka kalor berpindah dari gas menuju dinding *stack*, dan sebaliknya. Sehingga menciptakan perbedaan suhu antara gas yang keluar dari kedua ujung *stack*.

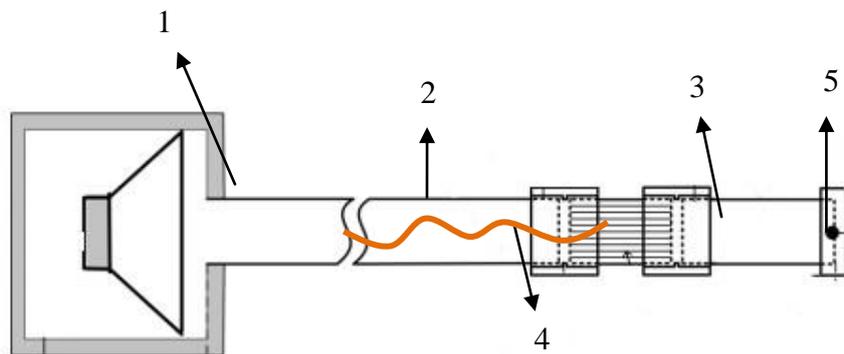
Karena banyak sekali pengembangan termoakustik dan pada dasarnya termoakustik mempunyai dua sisi, yaitu sisi dingin (*cold side*) dan sisi panas (*hot side*), untuk mencari hasil yang bagus di dalam percobaan ini, maka kita mencoba menggunakan heat pipe untuk menurunkan temperatur di sisi panas.

2.2 Jenis – jenis termoakustik

- Berdasarkan cara kerja terdapat dua jenis sistem termoakustik, yaitu :
 1. Heat Engine, perbedaan temperatur digunakan untuk menciptakan suatu osilasi sehingga tercipta gelombang akustik.[10]
 2. Heat Pump atau Refrigerator, gelombang akustik dimanfaatkan untuk menghasilkan perubahan temperatur yang diinginkan.[10]
- Berdasarkan gelombang yang digunakan, terdapat dua jenis sistem termoakustik, yaitu :
 1. *Standing Wave Engines*
 2. *Traveling Wave Engines*
- Berdasarkan jenis Tabung Resonator dua jenis sistem termoakustik, yaitu :
 1. *One Way Tube*
 2. *Loop Tube*
- Berdasarkan Posisi Tabung Resonator dua jenis sistem termoakustik, yaitu :
 1. *Linear*, tabung sejajar sumbu horizontal.
 2. *Table-Top*, tabung sejajar sumbu vertikal.[13]

2.3 Komponen pada termoakustik

Berikut beberapa Komponen Utama dari sistem termoakustik :



gamabr 2. 1 komponen termoakustik

1. *Loudspeaker*

Pembangkit gelombang akustik pada sistem. *Loudspeaker* mengalirkan gelombang akustik ke dalam tabung resonator. Pada *loudspeaker* dapat ditentukan seberapa besar frekuensi dan tipe gelombang akustik berbentuk suara dapat dikeluarkan. Pada eksperimen ini penulis menggunakan *speaker* aktif 6 inci dengan daya maksimum 80 Watt lengkap dengan *amplifier*. Dan pengaturan sumber gelombang akustik melakukan perangkat lunak (*software*) *Adobe Audition V3.0*.

2. Tabung Resonator

Tabung tempat mengalirnya gelombang akustik yang dikeluarkan oleh speaker. Tabung resonator[13,14] bekerja dengan sebagai pipa organa tertutup. Tabung ini merupakan tempat gelombang suara beresonansi dan menghasilkan perbedaan temperatur yang diinginkan. Tabung resonansi memiliki berbagai desain dan dimensi hingga gelombang hasil resonansi menjadi optimal. Hal ini dipengaruhi oleh besar dan jenis gelombang akustik yang digunakan, serta zat penghantar dalam tabung resonator tersebut.

3. *Stack*

Merupakan komponen inti pada sistem termoakustik. Berlaku sebagai pemindah kalor atau *heat exchanger*. *Stack* merupakan kumpulan dari kanal – kanal yang relatif kecil dan berjumlah banyak dengan posisi sejajar dengan sumbu tabung

resonator. Gelombang akustik yang dihasilkan *loudspeaker* dan dialirkan dan di resonansi oleh tabung resonator diteruskan kedalam kanal-kanal *stack* yang kecil dan berjumlah banyak hingga menghasilkan perbedaan temperatur antar ujung-ujungnya.

4. Partikel Udara

Media yang digunakan gelombang akustik dalam melakukan perjalanan dari *loudspeaker* hingga ujung *stack*. Partikel udara merupakan medium yang digunakan dalam perpindahan kalor. Untuk meningkatkan transfer panas biasanya digunakan partikel udara yang mendekati gas ideal dan memiliki konduktivitas termal yang tinggi (contohnya adalah helium). Transfer kalor tidak akan terjadi bila variasi suhu puncak ke puncak yang diakibatkan oleh kompresi adiabatik gas sama dengan variasi suhu dinding lokal antara simpangan – simpangan maksimum gerak partikel-partikel gas[11]. Transfer kalor dari dingin ke panas *stack* yang mengakibatkan pendinginan jika variasi temperatur dalam gas yang diinduksi gelombang bunyi lebih besar dari gradien temperatur antara panas dan bagian dingin *stack*. Sehingga diperlukan gelombang bunyi dengan intensitas tinggi dalam resonator.

5. *Microphone*

Terletak pada ujung berlawanan dengan *loudspeaker* pada sistem termoakustik. Berfungsi sebagai penerima sinyal gelombang akustik yang dikeluarkan oleh *loudspeaker* dan di-resonansi-kan oleh tabung resonator dan *stack*. Hal ini bertujuan untuk mengetahui pada frekuensi berapakah desain tabung bekerja maksimal.

2.4 TEORI TERMOAKUSTIK

Pada sistem konversi energi termoakustik, fluida yang beroperasi (gas) mengalami transformasi termodinamika. sebuah gas mengalami berbagai perubahan seperti tekanan, volume, temperatur, perpindahan kalor, dll hingga kembali ke kondisi awal dan kembali mengalami transformasi disebut mengalami siklus termodinamika. proses yang paling umum dapat kita ambil adalah pada

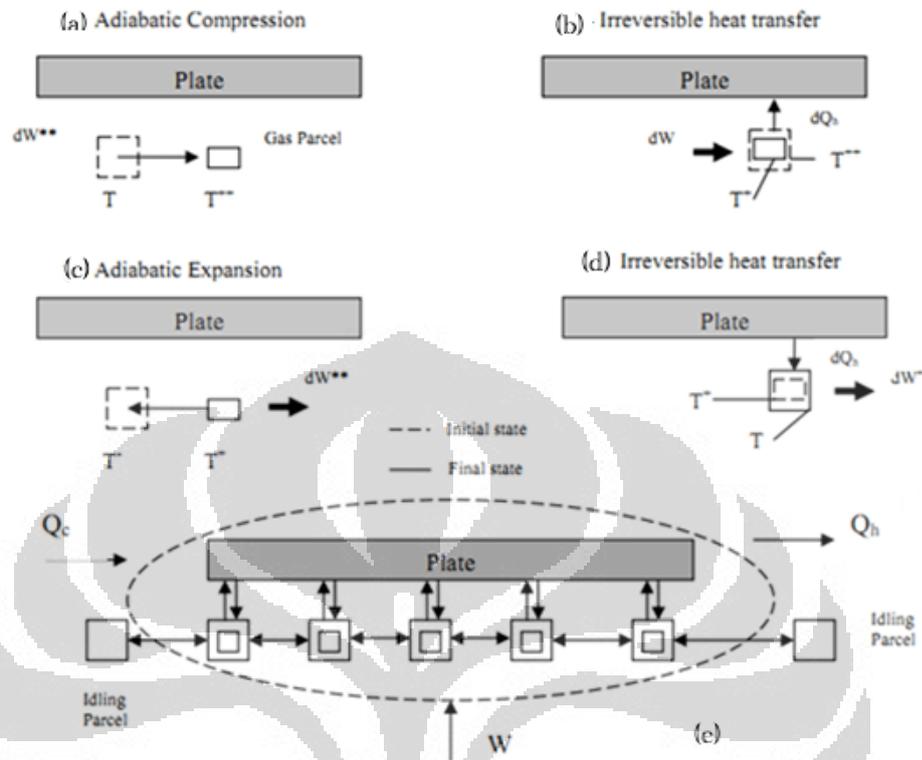
motor pembakaran dalam. Campuran bahan bakar dan udara dikompresi, dibakar, dan mengalami ekspansi sehingga piston dapat bekerja. Namun tidak seperti sistem konvensi energi konvensional yang berhubungan dengan energi mekanikal, baik dalam proses ataupun hasil proses, seperti pada mesin mobil, sistem termoakustik tidak membutuhkan suatu pergerakan *part* untuk menyelesaikan siklusnya. Gelombang suara menjadi bagian pengganti piston atau *camshaft*. Gelombang suara dapat menghasilkan proses kompresi atau ekspansi serta dapat mengakibatkan variasi temperatur, melakukan perpindahan kalor, dan memindahkan partikel – partikel pada gas.

Siklus termoakustik terdiri dari dua langkah adiabatik (1 & 3) dan dua langkah isobarik (2 & 4).

- Langkah (1)
Kumpulan gas Mengalami proses kompresi adiabatik sehingga memiliki temperatur yang lebih tinggi daripada *stack*. Gambar 2.2(a)
- Langkah (2)
Perpindahan kalor irreversible terjadi pada gas dan menuju *stack* sehingga Tempereatur turun pada gas. Volume kumpulan gas menyusut. Gambar 2.2(b)
- Langkah (3)
Kembali mengalami proses adibatik, namun ekspansi. Kumpulan gas kembali ke posisi semula dan mengalami penurunan suhu. Gambar 2.2(c)
- Langkah (4)

Perpindahan kalor irreversible kembali terjadi, namun kali ini dari *stack* menuju kumpulan gas. Volume kumpulan gas kembali membesar. Pada langkah ini kumpulan gas berada di tempat semula sehingga kembali ke langkah (1) sehingga siklus tersebut dapat berjalan hingga gas keluar dari kanal *stack*. Gambar 2.2(d)

Karena banyaknya kumpulan gas yang melalui sebuah *stack* dan kalor yang diberikan oleh satu kumpulan gas juga turut berpindah menuju partikel terdekat, maka perbedaan tempereatur terus terjadi selama gas berada di dalam *stack*. Gbr 2.2(e)



gambar 2. 2 siklus termoakustik [16]

2.5 Desain perangkat termoakustik

Dalam melakukan desain perangkat termoakustik, ada beberapa hal yang harus diperhatikan. Dimensi dari tabung resonator dan dimensi dari *stack*. Pada tabung resonator mempengaruhi besarnya frekuensi yang harus dikeluarkan *loudspeaker* agar dapat beresonansi secara maksimal. Dalam tabung resonator silindris dengan satu ujung terbuka dan satu ujung tertutup terdapat gelombang bunyi tegak dengan frekuensi resonansi

$$f_n = \frac{nv}{4L} \quad (2.1)$$

Dengan $n = 1, 3, 5$, yang berarti adalah orde harmonik, v adalah cepat rambat gelombang bunyi di udara, dan l adalah panjang tabung resonator. Selain panjang

tabung resonator, [17] mengungkapkan diameter tabung juga turut berpengaruh terhadap besarnya frekuensi resonansi dengan persamaan :

$$f_n = \frac{nv}{4\left(L + \frac{14D}{23\pi}\right)} \quad (2.2)$$

Selain itu, diameter (D) tabung resonator juga turut mempengaruhi faktor kualitas Resonansi (Q) pada tabung resonator. Yaitu rugi energi yang dapat terjadi pada proses resonansi pada tabung resonator. Hal ini akan mempengaruhi laju perpindahan kalor pada sistem. Berikut persamaan hubungan Diameter Resonator (D) dengan Faktor Kualitas Resonansi (Q),[18]:

$$Q = \frac{(c_d D)(c_r / D^2)}{c_d D + c_r / D^2} \quad (2.3)$$

Nilai c_d adalah tetapan yang berkaitan dengan rugi yang terjadi pada dinding resonator (termal dan viskos) dan c_r adalah tetapan nilai pada rugi radiasi bunyi. Dari persamaan diatas, bisa kita dapatkan nilai diameter tabung resonator optimum sehingga sistem mendapatkan nilai faktor kualitas yang maksimum.

Berdasarkan persamaan – persamaan diatas, frekuensi dan dimensi tabung resonator sangat berhubungan. Hal ini menyebabkan berbagai peneliti melakukan pendekatan berbeda dalam mendesain sebuah perangkat termoakustik. Dapat dengan pendekatan penentuan dimensi tabung lalu menyesuaikan nilai frekuensi seperti yang penulis lakukan, atau sebaliknya.

Sedangkan dalam merancang *stack*, batasan utamanya adalah bahwa lebar kanal *stack* haruslah beberapa kali dari besar kedalaman penetrasi termal gas medium dimana nilai empat dalam pengalinya adalah nilai jarak optimumnya [19]. Kedalaman penetrasi termal (*thermal penetration depth*) ($\delta\kappa$) adalah jarak suatu difusi kalor yang melalui fluida kerja atau gas dalam kasus ini pada selang waktu $t = 1/\pi f$ dengan persamaan:

$$\delta_K = \sqrt{\frac{K}{\pi \rho f c_p}} \quad (2.4)$$

Dan [19] :

$$\delta_K = \sqrt{\frac{\eta}{\pi \rho f}} \quad (2.5)$$

Dimana f adalah frekuensi gelombang akustik tegak, k adalah konduktivitas termal gas dan ρ adalah kerapatan gas serta c_p adalah kalor spesifik isobarik per satuan massa gas [19]. η adalah viskositas dinamik gas.

Apabila jarak antara lapisan-lapisan pada *stack* plate atau diameter pada *stack* pipa terlalu besar, maka gas tidak dapat memindahkan kalor secara efektif. Dan apabila terlalu kecil atau berdekatan, maka gerak – gerak partikel gas dapat terhambat.

Selain Frekuensi dan desain tabung resonator dan *stack*, Faktor lain yang juga sangat penting pengaruhnya terhadap unjuk kerja pendingin termoakustik adalah gradien suhu longitudinal kritis [11]:

$$\nabla T_{kritis} = \frac{p}{\xi \rho c_p} \quad (2.6)$$

dengan p dan ξ berturut-turut adalah amplitudo tekanan dan amplitudo pergeseran akustik. Dalam hal ini, transfer kalor tidak akan terjadi bila variasi suhu puncak ke puncak yang disebabkan oleh kompresi adiabatik gas tepat sama atau lebih besar dengan variasi suhu dinding lokal maka transfer kalor tidak akan terjadi dan sistem termoakustik tidak bekerja optimal.

2.6 Keuntungan dan aplikasi

Berikut beberapa keuntungan dalam sistem Termoakustik :

1. Tidak ada bagian yang bergerak, sehingga mengurangi gesekan pada perangkat dan dapat berarti perangkat yang cukup simpel dan relatif lebih murah dan memiliki umur yang lebih panjang.
2. Ramah lingkungan, karena tidak menggunakan bahan atau menghasilkan zat yang merusak lingkungan seperti CFC, CO₂, dll.

Dan beberapa aplikasi termoaustik adalah:

1. Industri Makanan, contohnya salah satu perusahaan es krim di Amerika yang menggunakan sistem termoaustik untuk menghasilkan produknya.
2. Pembangkit energi
3. Produk sehari – hari
4. Produk kesehatan, seperti *vaccine carrier*[20]

BAB 3

PERANCANGAN DAN PERAKITAN

Pada bab ini dikhususkan membahas mengenai perencanaan membangun semua system yang akan kita gunakan dalam termoakustik. Karena tujuan dari pembuatan alat termoakustik sederhana ini untuk Merancang dan membuat alat mesin termoakustik sehingga dapat mengetahui prinsip kerjanya melalui efek gelombang suara terhadap karakteristik alat tersebut. Beberapa hal juga yang harus kita perhatikan dalam pembuatan alat ini antara lain: pembuatan bahan yang dibutuhkan mudah diperoleh, mudah dibuat, serta mudah digunakan saat percobaan sedang dilakukan.

3.1 Parameter design termoakustik

Dalam mendesign atau merancang sebuah termoakustik pada awalnya kita tentukan besar dari nilai perbedaan temperatur pada kedua sisi *stack* ΔT_m . Lalu dilanjutkan dengan pemilihan beberapa parameter yang berkaitan langsung dalam percobaan alat termoakustik yang kita buat

- Tekanan rata-rata (P_m)

Besar tekanan tergantung pada pemilihan material dasar dari tabung yang kita buat. Dalam hal ini kita memakai tekanan rata-rata seperti halnya tekanan atmosfer yakni berkisar pada 1 atm. Karena dalam percobaan nanti kita belum menentukan pengaruh besar nilai tekanan yang kita gunakan pada keadaan vakum
- Frekuensi (f)

Kerapatan daya pada perancangan termoakustik juga dipengaruhi oleh besar frekuensi resonansi. Dalam perancangan ini, kita menggunakan frekuensi sebagai variabel yang akan berpengaruh terhadap pembuatan *stack*. Penentuan besar nilai frekuensi dihasilkan dari sebuah perangkat multimeter yang hasil keluarannya berupa voltage yang dapat menentukan frekuensi resonansi. Anggap performa *amplifier* dan *speaker* sangat efisien.

Sehingga nanti dapat diketahui efek dari pemilihan besar frekuensi terhadap temperatur di kedua sisi *stack* yang dihasilkan.

- Pemilihan gas

Gas yang digunakan dalam perancangan termoakustik ini adalah udara yang ada di sekitar tabung resonator. Alangkah baiknya jika kita menggunakan gas yang memiliki kecepatan suara yang tinggi serta *thermal conductivity* yang tinggi. Akan tetapi hal tersebut akan memakan waktu yang banyak karena perakitan alat yang kompleks.

- Bahan *stack*

Stack material pada alat termoakustik yang akan dibuat terdiri dari material yang harus memiliki sifat nilai K_s rendah (*thermal conductivity*) dan nilai C_p (*heat capacity*) lebih besar dari nilai C_p gas yang dipilih. Dalam hal ini dipilih jenis material *stack* plastik mika.

- Tabung resonator

Bentuk dan panjang resonator dibuat berdasarkan ide sendiri dengan bahan PVC (*Polyvinyl chloride*).

3.2 Desain

Dalam subbab ini kita akan membahas pemilihan parameter dalam mendesign termoakustik sederhana. Parameter-parameter tersebut antara lain adalah operasi parameter, parameter gas dan material *stack*.

- Tekanan rata-rata (P_m)

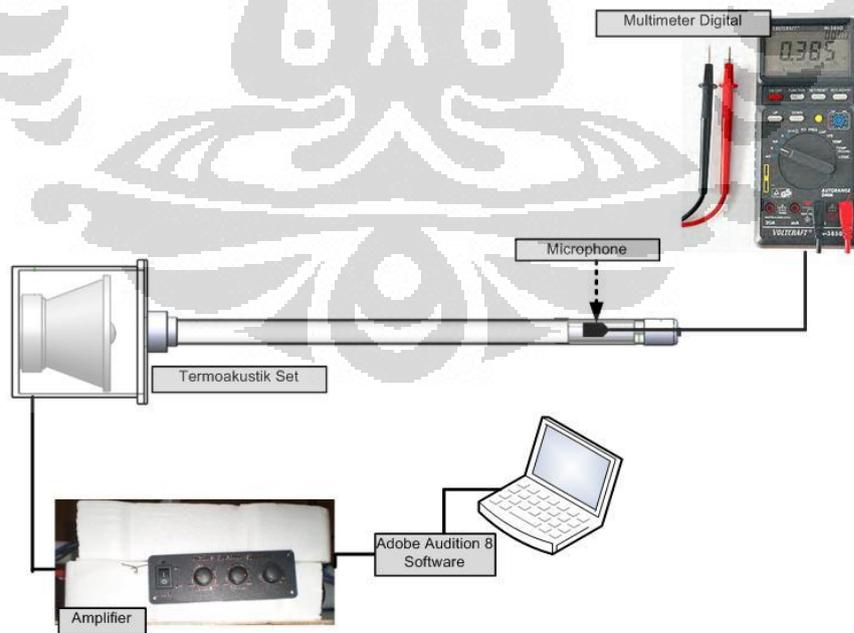
Tekanan rata-rata yang dipilih sebesar 1 atm. Hal ini mempertimbangkan kemudahan dalam proses percobaan nantinya sehingga nantinya tidak memerlukan alat khusus mencapai suatu tekanan.

- Frekuensi (f)

Frekuensi adalah banyaknya getaran yang terjadi dalam kurun waktu satu detik. Rumus frekuensi adalah jumlah getaran dibagi jumlah detik waktu. frekuensi memiliki satuan hertz/ hz . sedangkan getaran adalah gerakan bolak balik yang ada di sekitsar titik keseimbangan dimana kuat lemahnya dipengaruhi besar kecilnya energi yang di berikan. Satu getaran frekuensi

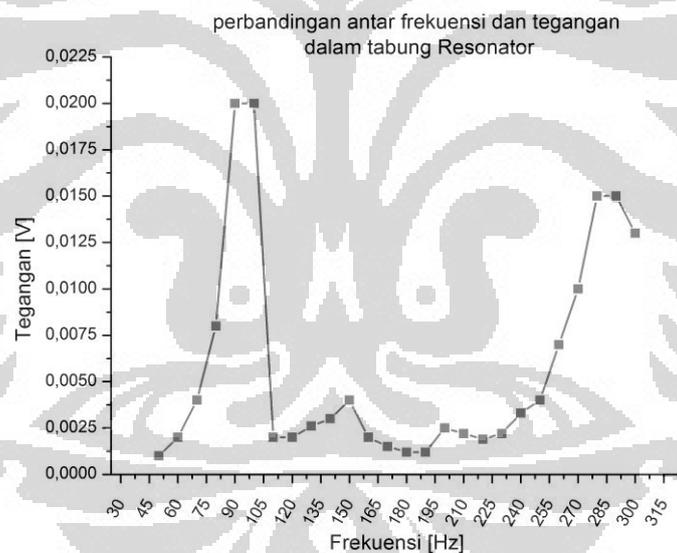
adalah satu kali gerak bolak-balik penuh. Besar frekuensi yang digunakan merupakan frekuensi resonansi. Frekuensi resonansi adalah frekuensi yang saling menguatkan sehingga jika kerja dilakukan pada frekuensi ini maka system akan berjalan secara optimal. Frekuensi resonansi tergantung dari panjang tabung, biasanya bentuk tabung seragam dan diameter dari tabung itu sendiri tidak mempengaruhi frekuensi .

Untuk mendapatkan frekuensi dari resonator, maka diperlukan *microphone* yang disambungkan ke multimeter atau osiloskop tujuannya adalah kita dapat mengetahui output voltage, karena dari speaker yang kita sudah set keluarannya dari perangkat lunak *adobe audition 3.0* maka speaker akan mengeluarkan suara yang sudah kita set sebelumnya dan suara tersebut akan ditangkap oleh *microphone* yang sudah tersambung ke alat multimeter. Pada multimeter tersebut akan menunjukkan besar voltage yang ditangkap oleh *microphone* tersebut. Dari hasil tersebut kita dapat melihat frekuensi yang merupakan frekuensi resonansi, karena semakin besar voltage yang di tangkap maka frekuensi tersebut adalah frekuensi resonansi. Untuk lebih jelasnya mengenai skema pemilihan frekuensi lihatlah gambar dibawah ini



gambar 3. 1 skema pengambilan data frekuensi

Frekuensi dipilih sebagai variable utama dalam menentukan karakteristik termoakustik sederhana. Semakin besar frekuensi yang digunakan maka perolehan nilai *thermal penetration depth* juga semakin kecil. Kerja akustik adalah fungsi linear terhadap frekuensi resonansi akustik driver. Untuk mendapatkan frekuensi resonansi maka kita mengambil frekuensi sample rate dengan memilih frekuensi antara 100hz sampai 400 hz dengan kelipatan 100hz, karena hasilnya kita mendapatkan *voltage* terbesar diantara 100-300hz, maka kita menyempitkan pengambilan frekuensi sample rate dari 100 hz-300hz dengan kelipatan 10 hz, maka akan menghasilkan *voltage* terbesar diantara 100-150 dan juga 250-300 Hz, maka kita akan mengecilkan pengambilan frekuensi sample rate dari 100-150 & 250-300 Hz dengan kelipatan 1 Hz maka di dapat frekuensi 106Hz dan 275 Hz yang merupakan *voltage* terbesar. Lihat grafik dibawah ini



gambar 3. 2 grafik Voltage Vs frekuensi

- **Fluida kerja**

Fluida kerja yang kami pilih adalah udara biasa yang diperoleh dari lingkungan sekitar. Fluida ini kami jadikan sebagai fluida kerja di dalam tabung resonator yang mana akan dibangkitkan oleh kerja akustik yang dihasilkan dari speaker. Pertimbangan dalam pemilihan udara biasa adalah mempunyai kecepatan suara dan thermalconductivity yang cukup baik

untuk alat termoakustik. Selain itu juga fluida kerja dengan udara biasa sangat mudah didapat dan tidak memerlukan perakitan dengan alat khusus.

Berikut adalah properties dari udara:

- a. *Thermal conductivity* : 0.26 mW/cm/K
- b. Kecepatan suara : 344 m/s

- *Material stack*

Bahan *stack* yang digunakan untuk membuat *stack* adalah bahan mika ,fiber, dan ainvex dengan tebal sekitar 0.2 mm dan panjang berdasarkan eksperimen yaitu 10 dan 11 cm . sesuai pertimbangan yang sudah kita bahas di bab sebelumnya bahwa material dari *stack* harus mempunyai nilai *thermal conductivity* yang lebih rendah dari fluida kerja gas dan nilai *heat capacity* yang lebih besar dari fluida gas kerja. Berikut adalah properties dari bahan *stack* yang kita peroleh:

- *Thermal conductivity mika* : 0,71 W/mk
- *Thermal conductivity fiber* : 0,2 W/mk

- *Geometri stack*

Pada perancangan ini kami menggunakan beberapa parameter yang sudah di tentukan antara lain adalah, tekanan rata-rata sebesar 1 atm, menggunakan fluida gas kerja berasal dari udara biasa sehingga dapat kita tentukan nilai *thermal penetration depth* dari *stack* yang kita buat berdasarkan persamaan berikut:

$$\delta_K = \sqrt{\frac{K}{\pi \rho f c_p}} \quad (3.1)$$

3.3 Parameter

3.3.1 Parameter proses

Tekanan rata-rata $P_m = 1 \text{ atm}$

Temperatur rata-rata = $27^0 \text{ C} = 300\text{K}$

Frekuensi (f) pada 106 Hz

$$\text{Panjang gelombang (1) } \lambda = \frac{c}{f} = \frac{344}{106} = 3.24 \text{ m}$$

3.3.2 Parameter gas kerja = udara

Thermal conductivity = $K = 0.026 \text{ W/mK}$

Ratio isobaric dan isohoric $\gamma = 1.4$

Sound velocity $v = 344 \text{ m/s}$

Gas density $\rho = 1.177 \text{ Kg/m}^3$

Heat capacity $C_p = 1006 \text{ J/Kg.K}$

Dynamic Viscosity of gas ; $\mu = 1.78 \times 10^{-5} \text{ Kg/m.s}$

3.3.3 Parameter design stack

a. δ_K dengan frekuensi 106 Hz

$$\pi = 3.142857$$

Thermal conductivity = $K = 0.026 \text{ W/mK}$

Sound velocity $v = 344 \text{ m/s}$

Gas density $\rho = 1.177 \text{ Kg/m}^3$

Heat capacity $C_p = 1006 \text{ J/Kg.K}$

Thermal penetration depth :

$$\delta_K = \sqrt{\frac{K}{\pi \rho f c_p}} \quad (3.2)$$

$$\delta_K = \sqrt{\frac{0.026}{3.142857 \times 1.177 \times 106 \times 1006}}$$

$$\delta_K = \sqrt{0.0659123}$$

$$\delta_K = 0.256734 \text{ mm}$$

Jarak antar layer optimum yaitu 2.5-4 δ_K

Maka jarak antar *plate* yaitu $4\delta_K = 4 \times 0.256734 = 1.02693792 \text{ mm}$

Posisi stack x_s pada tabung resonator berada di :

$$\lambda/20 = 3.24/20 = 16.2 \text{ cm}$$

b. δ_K dengan frekuensi 275 Hz

$$\pi = 3.142857$$

Thermal conductivity = $K = 0.026 \text{ W/mK}$

Sound velocity $v = 344 \text{ m/s}$

Gas density $\rho = 1.177 \text{ Kg/m}^3$

Heat capacity $C_p = 1006 \text{ J/Kg.K}$

Thermal penetration depth :

$$\delta_K = \sqrt{\frac{0.026}{3.142857 \times 1.177 \times 275 \times 1006}}$$

$$\delta_K = \sqrt{2.5 \times 10^{-8}}$$

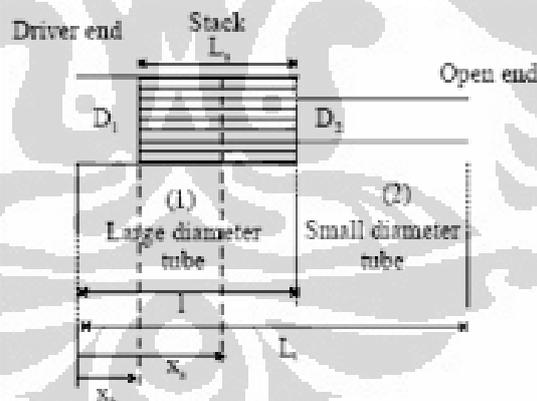
$$\delta_K = 0.15939 \text{ mm}$$

Jarak antar layer optimum yaitu $2.5-4 \delta_K$

Maka jarak antar plate yaitu $4\delta_K = 4 \times 0.15939 = 0.5375 \text{ mm}$

Posisi stack x_s pada tabung resonator berada di $\lambda/20 = 1.25/20 = 0.062 = 6.25 \text{ cm}$

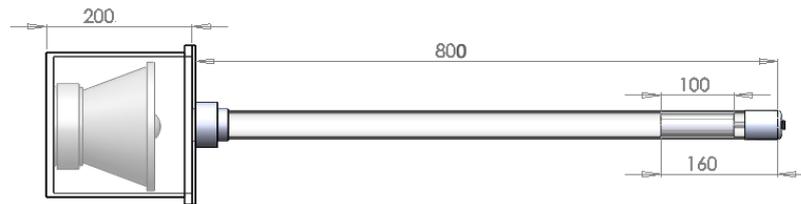
Maka posisi dan panjang mengikuti gambar di bawah ini



gambar 3. 3 skema panjang stack (L_s) dan posisi stack (x_s) [14]

1. Tabung resonator

1. Tabung dengan diameter *uniform*. Tabung resonator dirancang dengan dua sisi ujung tertutup. Tabung tersebut berukuran $1 \frac{1}{4}$ inci atau 35.8 mm dengan ketebalan sebesar 2.8 mm. bahan dasar tabung resonator ini adalah PVC (*Polyvinyl chloride*).



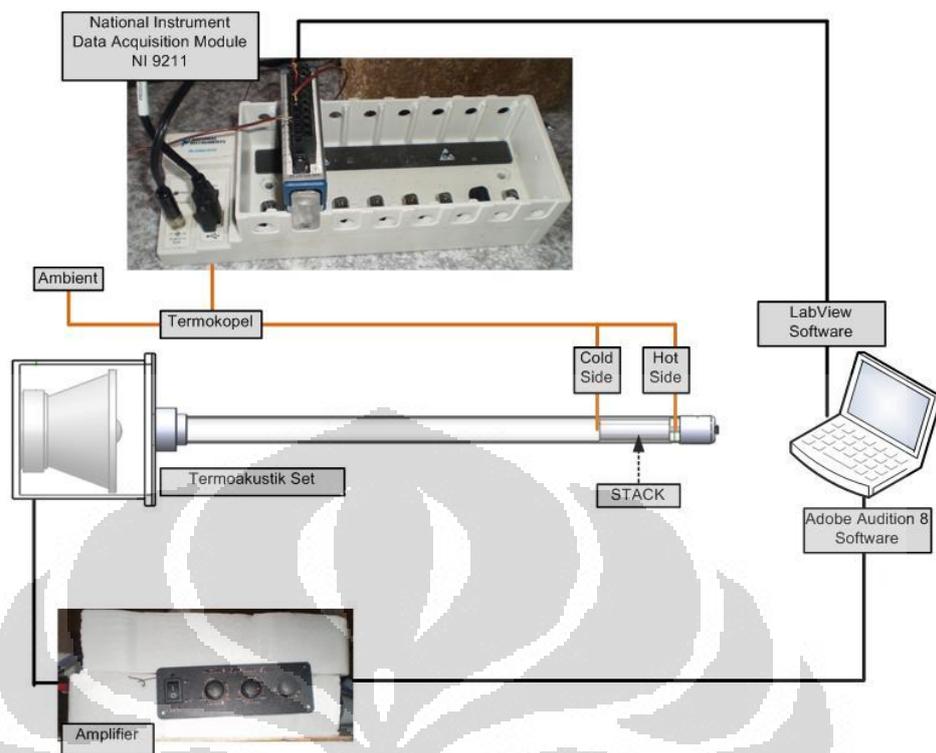
gambar 3. 4 Rancangan tabung resonator beserta box speaker

2. Tabung dengan diameter *uniform*. Tabung resonator dirancang dengan dua sisi ujung tertutup. Tabung tersebut berukuran 1 ¼ inci atau 35.8 mm dengan ketebalan sebesar 2.8 mm. bahan dasar tabung resonator ini adalah PVC (*Polyvinyl chloride*) sepanjang 60cm dan di sambungkan dengan tabung tembaga yang berdiameter sama tujuannya agar *heatpipe* dapat digunakan pada tabung tembaga.

3.4 Konstruksi dan skema pengujian

3.4.1 Skema Pengujian

dengan diameter *uniform*. Tabung resonator dirancang dengan dua sisi ujung tertutup. Tabung tersebut berukuran 1 ¼ inci atau 35.8 mm dengan ketebalan sebesar 2.8 mm. bahan dasar tabung resonator ini adalah PVC (*Polyvinyl chloride*).



(a)

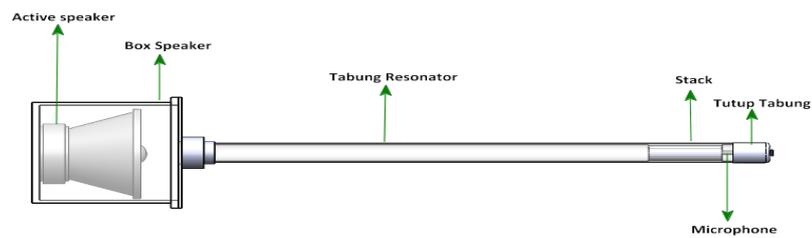


(b)

gambar 3. 5(a) & (b) konstruksi dan skema pengujian alat

3.4.2 Konstruksi

- 1 Tabung resonator
 1. Tabung resonator pertama



gambar 3. 6 Bagian-bagian tabung resonator dan tutup speaker

Tabung resonator terbuat dari bahan *PVC (Polyvinyl chloride)* dengan diameter 1 ¼ inc atau 35.8mm.

2. Tabung resonator kedua

Tabung resonator terbuat dari bahan *PVC (Polyvinyl chloride)* dengan diameter 1 ¼ inch atau 35.8 mm. dan tembaga dengan diameter 1 ¼ inch.

2 *Box speaker*

Box speaker terbuat dari acrylic dengan ketebalan dinding sebesar 10mm alat ini dirangkai dengan bantuan celipper kecil sebagai pengunci anrar penutup speaker. Cara merangkai tutup speaker ini dibutuhkan ketelitian agar tidak ada kebocoran dan spresisi mungkin agar suara yang dibangkitkan dari *amplifier* dengan penyetelan suara dari bantuan komputer.

3 Konstruksi *stack*

Stack terbuat dari plastik mica dan plastik *fiber*, jika pada plastik *fiber* kita menggunakan metode penggulungan, plastik mica diberi garis dan direkatkan benang pancing sepanjang plastik mica tersebut fungsinya bila kita gulung mica, benang pancing itu untuk sebagai pemberi jarak (*thermal penetration depth*) dengan ukuran selama 1 mm, lebih jelasnya lihat gambar dibawah ini



gambar 3. 7 Konstruksi *stack* pertama (Gulungan)

BAB 4

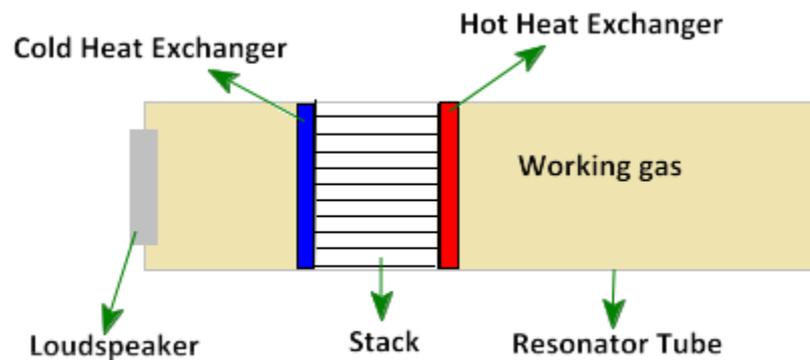
PENGUJIAN

Pada bab ini akan dibahas bagaimana melakukan setup terhadap alat termoakustik sederhana yang sudah dirancang. Selain itu juga kami melakukan beberapa pengaturan ulang terhadap jenis suara yang dipakai agar hasil pengujian maksimal

4.1 Cara kerja termoakustik

Termoakustika (termoakustiks) adalah suatu bidang yang berhubungan dengan fenomena fisis di mana perbedaan suhu dapat membangkitkan gelombang bunyi, dan sebaliknya gelombang bunyi dapat menghasilkan perbedaan suhu. Gelombang bunyi di dalam gas mengandung efek perubahan tekanan dan gerak, dan temperatur. Bila bunyi merambat dalam ruangruang kecil, maka kalor (*heat*) yang bergerak juga akan mengalir ke dan dari dindingdinding ruang. Gabungan semua gerakan ini akan menghasilkan fenomena atau efek termoakustik. Alat yang digunakan untuk menimbulkan efek termoakustik disebut sebagai piranti termoakustik

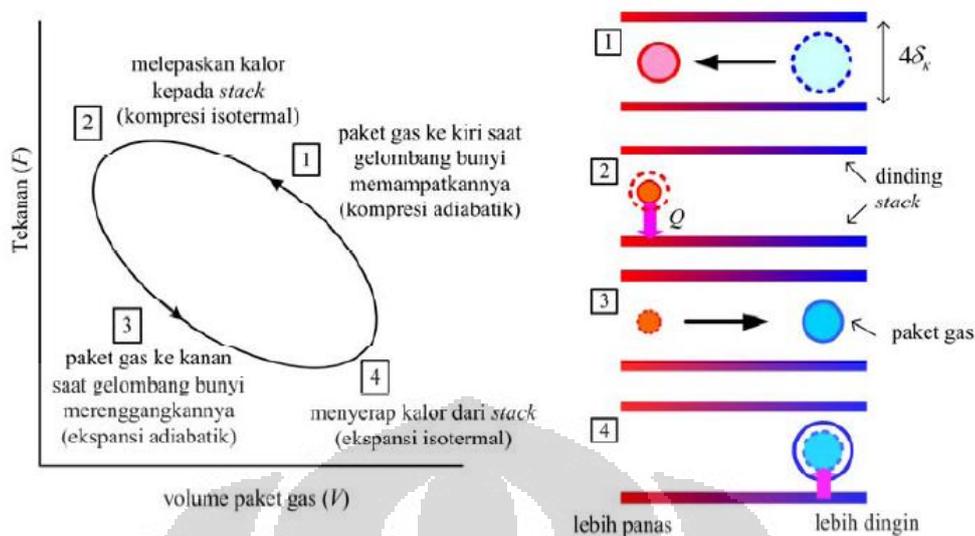
Alat Termoakustik ini dirancang berbentuk tabung resonator yang terdiri dari tiga bagian utama seperti yang terlihat pada gambar 4.1, yaitu *speaker* sebagai sumber suara, tabung resonator tempat udara / gas dimampatkan , dan *stack* yang memisahkan dua ruangan dalam resonator yang mengalami perbedaan temperatur. *Stack* dirancang seperti jalurjalur kecil tempat merambatnya suara dan kalor. Arah aliran *stack* dibuat sejajar dengan arah sumbu panjang resonator *Stack* bertujuan untuk menghasilkan gradien temperatur disepanjang arah pergerakan gas.



gambar 4. 1 Contoh Sederhana Sistem Termoakustik

Di dalam tabung resonator di bagian heatside, tekanannya akan mengalami peningkatan sehingga dari sifat adiabatik gas, temperaturnya pun ikut mengalami kenaikan. Sebaliknya, pada sisi cold side tekanannya berkurang akibat gas yang ada di sisi ini didorong ke sisi heatside, dan suhu di cold side pun akan turun. Teori ini bisa menjelaskan kenapa osilasi suhu bisa terjadi selama pergerakan gelombang suara terjadi di dalam tabung resonator.

Proses pemompaan kalor secara termoakustik bisa dilukiskan oleh Gambar 4.2. Saat gelombang akustik menyebabkan gas di dalam *stack* bergerak ke bagian heatside, gas akan termampatkan dan tekanan meningkat. Gas yang termampatkan ini akan lebih panas dibanding dinding *stack* yang ada di dekatnya sehingga ia melepaskan kalor ke *stack* dan volume gas tersebut menyusut. Saat gelombang suara melanjutkan siklusnya, gas bergerak kembali ke cold side di mana tekanannya lebih rendah, dalam hal ini gas menjadi lebih renggang dan lebih dingin dari pada dinding *stack* di dekatnya, sehingga ia menyerap kalor dari dinding *stack* dan mengembang. Siklus ini terus berulang dan efeknya adalah transfer kalor dari bagian dingin ke bagian panas *stack*.



gambar 4. 2 Proses Kerja sistem Termoakustik dalam Resonator [15]

Gambar 4.2 menjelaskan siklus pendinginan atau pemompaan kalor secara termoakustik. Pada saat sumber suara menghasilkan gelombang, maka gas yang ada dalam *stack* akan bergerak dari sisi panas menuju sisi dingin, sehingga tekanan di heatside akan mengalami peningkatan. Gas yang termampatkan ini akan memiliki temperatur yang lebih tinggi dibandingkan dengan gas di sekitar *stack*, hingga dia akan melepaskan kalor ke *stack* dan volumenya akan menyusut. Ketika suara melanjutkan siklus putaranya, bergerak dari sisi panas ke sisi dingin, maka gas akan bergerak sisi dingin yang tekanannya lebih rendah. Akibat rendahnya tekanan, temperatur gas lebih rendah dibanding *stack*, sehingga gas akan menyerap kalor dari *stack*. Siklus ini terjadi berulang terus menerus dan menghasilkan efek transfer kalor dari bagian dingin ke bagian panas

4.2 Set-up pengujian

Berikut ini adalah proses dan alat-alat yang digunakan pada saat meng set-up sebuah system termoakustik

1. Pemilihan jenis suara

Jenis suara yang dipilih adalah suara *monotone* yang diatur pada frekuensi 106 hz . suara ini dihasilkan oleh *software* yang kita gunakan

2. *Speaker* aktif 80 waat 6 Ohm

Speaker aktif berfungsi sebagai pembangkit suara yang dijadikan sebagai kerja akustik. Alat penguat suara ini merupakan tipe penguat suara *stereo*. Performa speaker sangat mempengaruhi performa termoakustik khususnya perbedaan tekanan dan temperatur.

3. *Software Adobe Audition 3.0*

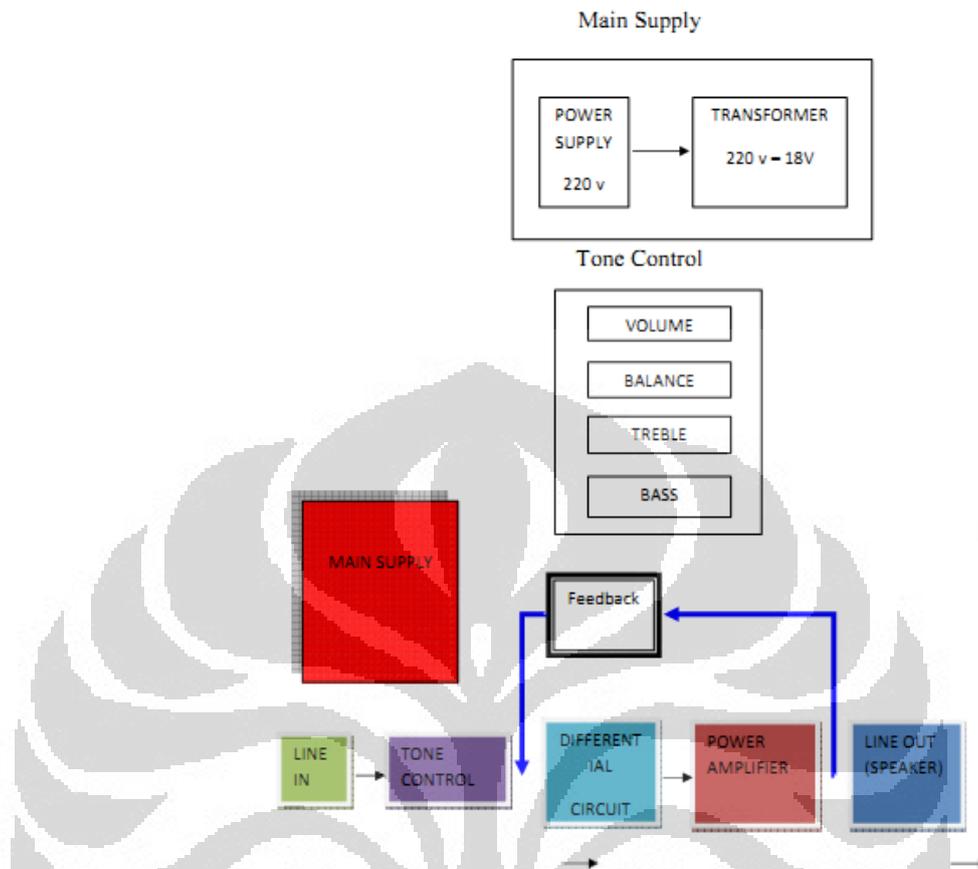
Berfungsi sebagai program lunak pada computer untuk mengatur tingkatan frekuensi yang dibutuhkan pada suara *monotone* yang kita jadikan sebagai kerja akustik. Dengan adanya program ini kita memperoleh banyak kemudahan mulai dari melihat pengaruh besar frekuensi terhadap perbedaan temperatur dan juga dapat dengan mudah memilih serta mengatur suara yang dijadikan sumber kerja akustik.

4. *Amplifier*

Alat ini berfungsi sebagai penguat sinyal dari computer ke output yaitu speaker aktif 80 Watt. *Amplifier* jenis AC ini memiliki daya maksimum yang dapat dibangkitkan oleh *amplifier* rakitan ini adalah sebesar 80 Watt.



gambar 4. 3 *Amplifier*



gambar 4. 4 Skema *amplifier* rakit sederhana

Keterangan skema rangkaian:

- *Main supply*, Source power utama 220 volt . Diberikan *Transformer step down* hingga *source* tegangan menjadi 18 Volt.
- *Line in*, sumber *signal audio* yang kemudian akan di *amplify*
- *Tone Control*, berguna sebagai pengatur ataupun pengolah *signal*, pada rangkaian terdapat *master volume*, pengatur *treble*, *bass* dan *balancing*. Hal terpenting dalam pengaturan ini adalah pengaturan dari frekuensi *signal*.
- *Differential*, Pada rangkaian *differential*, bisa mendapatkan informasi impedansi input, selain itu juga menghitung penguatan *signal*.

- *Feedback*, umpan balik negatif yang pasti terjadi disetiap rangkaian elektronika, dalam rangkaian dimanfaatkan sebagai penguat tegangan.
- *Power Amp*, penghasil daya *amplifier* yang dibutuhkan, sesuai yang diinginkan ,Komponen utama dalam rangkaian adalah power transistor. Pada rangkaian digunakan power transistor NPN jenis TIP 2955 dan 3055.
- *Line Out* , keluaran melalui *speaker* .

5. Termokopel

Termokopel adalah alat berupa kabel yang berfungsi sebagai sensor pengukuran temperatur yang digunakan baik dalam proses pengujian performa termoakustik sederhana yang kita buat. Tipe termokopel yang digunakan adalah termokopel tipe K yang memiliki rentang pengukuran antara 200 sampai dengan 1200 derajat.



gambar 4. 5 Termokopel

6. Modul National Instrument

Modul yang digunakan adalah modul NI tipe 9211 yang memiliki 4 channel untuk termokopel. Modul tipe ini memungkinkan untuk mendapatkan laju pengambilan data yang lebih cepat.



gambar 4. 6 Modul NI 9211

7. *National Instrument data acquisition*

NI DAQ yang digunakan adalah tipe chassis cDAQ-9174 NI compact DAQ dengan 4 slot untuk modul NI



gambar 4. 7 chassis cDAQ-9174 NI

4.3 LANGKAH-LANGKAH PENGATURAN

1. Awal-awal kita hidupkan semua ala-talat yang diperlukan yakni komputer, aturan national Instrument, *amplifier*, dan atur variable frekuensi melalui *software adobe audition 3.0*
2. Memasang kabel yang menghubungkan dari speaker, *amplifier*, alat uji dan ke computer sebagai main device.
3. Hidupkan suara pada program *adobe audition 3.0* dan atur frekuensi pada 106 hz.
4. Hidupkan program *Lab View* sebagai penghubung National Instrument device. Atur segala keperluan yang dibutuhkan untuk proses pengambilan data saat pengujian berlangsung.
5. Posisikan *volome* pada *amplifier* pada kondisi maksimal.

6. Pastikan jika semua sudah siap dilakukan pengujian terlebih dahulu kondisi temperatur dalam keadaan stabil.
7. Lakukan dari langkah 3 setiap kali mengambil data dengan posisi *stack* yang berbeda
8. Lakukan dari langkah 3 dengan frekuensi yang berbeda dan panjang *stack* yang berbeda pula.

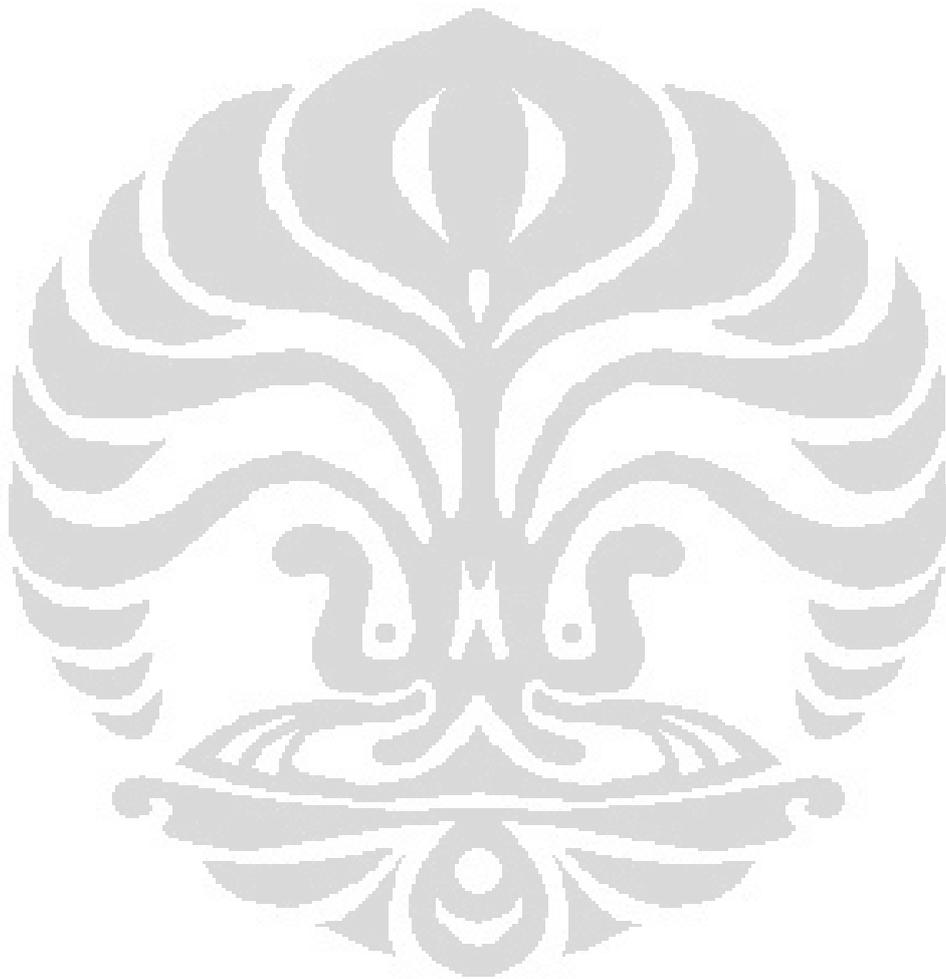
4.4 PENGUJIAN

Pada pengujian ini kita akan melihat hasil dan prestasi dari sebuah alat termoakustik sederhana yang telah kita rancang. Pada pengujian ini akan diperoleh hasil dalam bentuk table dan grafik tentang pengaruh besar frekuensi terhadap perbedaan temperatur di kedua ujung *stack* dalam hitungan waktu tertentu. Waktu yang dibutuhkan dalam tiap peletakan posisi *stack* adalah selama 30 menit.

Langkah-langkah Pengujian

1. Masukkan termokopel pada tabung resonator sebelum termoakustik dinyalakan. Arahkan atau tempatkan termokopel pada kedua ujung *stack*. Satu di ujung *stack* dan satu lagi diujung *stack* lainnya. Satu termokopel kita taruh di luar tabung untuk mengetahui suhu lingkungan saat pengujian sebagai pembanding.
2. Hidupkan semua alat yang dibutuhkan. Atur *amplifier* pada volume maksimum. Tunggu beberapa saat agar suhu mulamula bernilai sama pada kedua sisi ujung *stack*.
3. Perhatikan hasil penampakan temperatur pada kedua ujung *stack* yang telah ditempatkan termokopel melalui program *Lab View*.
4. Atur besar frekuensi yang kita pilih dengan menggunakan program *adobe audition 3.0*
5. Hidupkan suara yang ingin dijadikan sebagai kerja akustik (suara *monotone*).
6. Perubahan temperatur terhadap waktu akan tercatat secara otomatis dengan bantuan program *Lab view*. Simpan data tersebut selama

proses pengujian berjalan sampai waktu yang kita tentukan (30 menit)



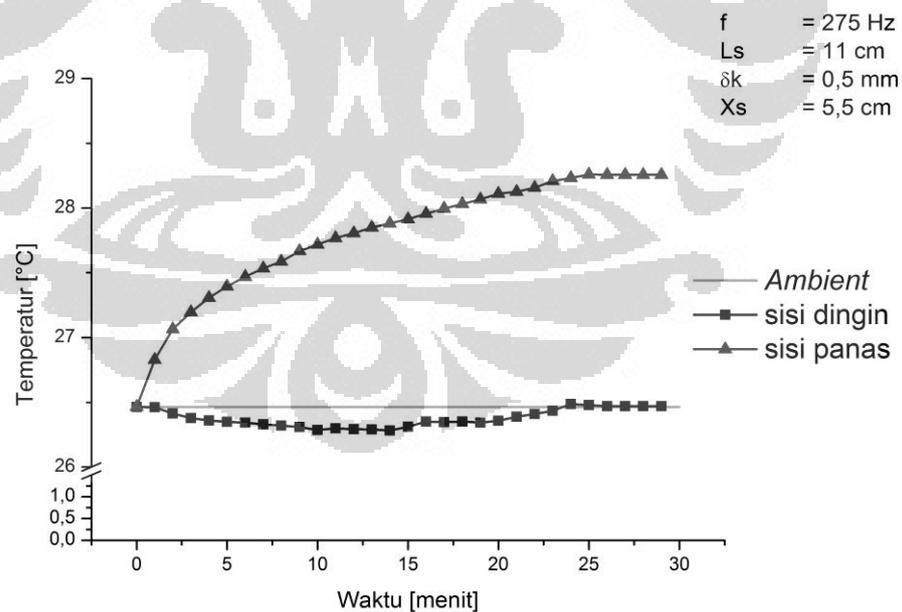
BAB 5

HASIL DAN ANALISA

Pada bab ini akan membahas hasil dari beberapa pengujian termoakustik sederhana yang sudah dibuat. Seperti yang sudah kita ketahui bahwa hasil dari pengujian yang dilakukan adalah dalam bentuk grafik. Grafik tersebut akan menggambarkan hasil perubahan suhu pada kedua ujung sisi *stack* terhadap frekuensi tertentu, dengan panjang tertentu dan juga dengan *Thermal penetration depth* tertentu.

5.1 Grafik dan analisa termoakustik pada panjang *stack* 11 cm dengan frekuensi 275 serta $\delta_K = 0,5$ mm

5.1.1 Posisi *stack* pada x_s 5,5 cm

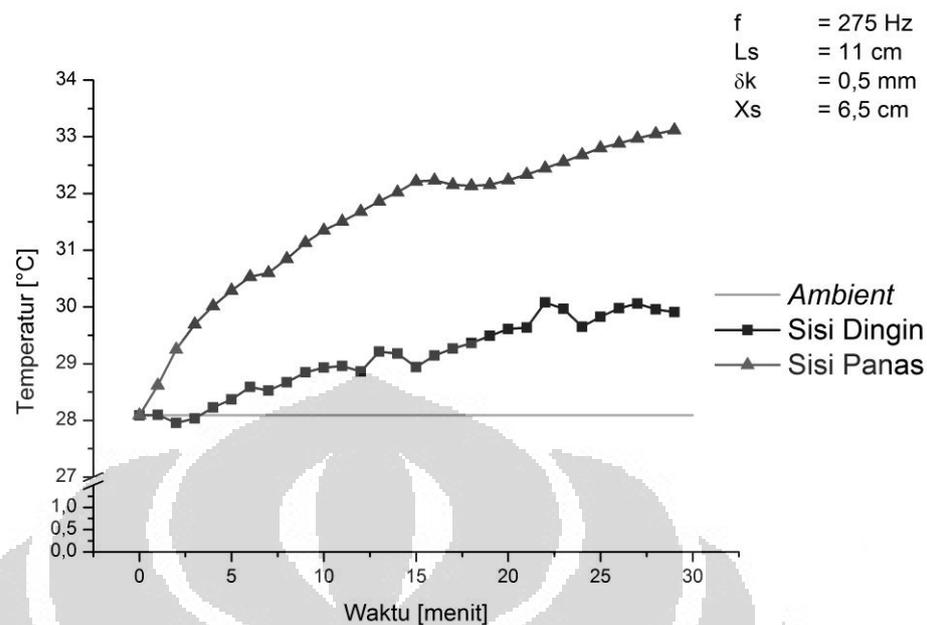


gambar 5. 1 *stack* dengan konfigurasi $L_s = 11$ cm $f=275$ hz $\delta_K = 0,5$ mm x_s 5,5 cm

Grafik diatas adalah hasil pengujian pertama pada termoakustik yang dirancang. Pengujian dilakukan pada temperatur $26,5^{\circ}\text{C}$. pada temperatur tersebut menjadi titik awal temperatur cold dan temperatur hot. Setelah

itu suara dihidupkan dengan volume *amplifier* maksimal. Pengaturan suara *monotone* pada frekuensi sample rate sebesar 275 Hz pada program *adobe audition 3.0* . pada menit ke 10 setelah dihidupkan maka terlihat besar temperatur panas naik hingga mendekati 28°C dan pada temperatur dingin hanya turun $0,3^{\circ}\text{C}$ dari temperatur permulaan. Memasuki menit ke 20, temperatur sisi panas naik melebihi 28°C dengan temperatur sisi dingin ikut naik $0,1^{\circ}\text{C}$ dari temperatur pada menit ke 10. Setelah memasuki rentang waktu yang diinginkan yaitu 30 menit, sisi panas terus naik hingga pada temperatur $28,26^{\circ}\text{C}$ dan temperatur sisi dingin hampir sama dengan temperatur awal $26,11^{\circ}\text{C}$, sehingga perbedaan temperatur sisi panas dan sisi dingin sebesar $1,79^{\circ}\text{C}$. Dari hasil grafik ini dapat kita analisa bahwa temperatur yang lebih besar berada di sisi panas daripada temperatur sisi dingin, dari analisa terlihat bahwa pada system termoakustik ini terjadi kompresi antara gelombang suara dan udara yang berada di dalam kanal-kanal *stack* dan panas dibuang ke sisi panas sehingga temperatur di sisi panas terus naik namun pada system ini tidak terjadi ekspansi walaupun tekanan dan temperatur *stack* lebih rendah di bandingkan sisi panas. Sehingga gas tidak menyerap kalor untuk dibuang.

5.1.2 Posisi *stack* pada x_s 6.5 cm

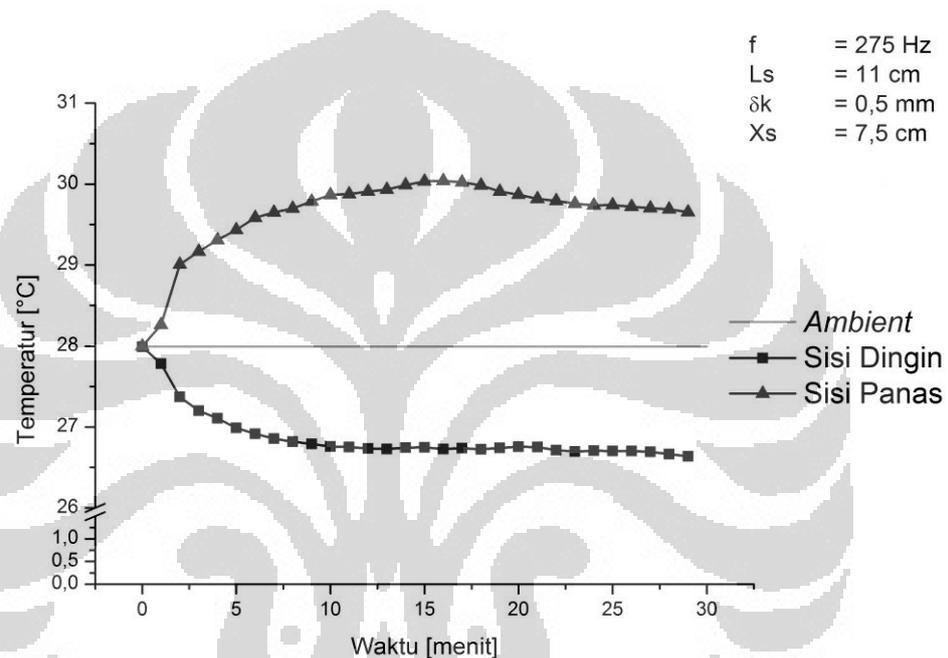


gambar 5. 2 *stack* dengan konfigurasi $L_s = 11\text{ cm}$ $f=275\text{ hz}$ $\delta_K = 0,5\text{ mm}$ $x_s 6,5\text{ cm}$

Grafik diatas adalah hasil pengujian pertama pada termoakustik yang dirancang. Pengujian dilakukan pada temperatur $28,1^{\circ}\text{C}$. pada temperatur tersebut menjadi titik awal temperatur cold dan termperatur hot. Setelah itu suara dihidupkan dengan volume *amplifier* maksimal. Pengaturan suara *monotone* pada frekuensi sample rate sebesar 275 Hz pada program *adobe audition 3.0* . pada menit ke 10 setelah dihidupkan maka terlihat besar temperatur panas naik hingga mendekati 31.35°C dan pada temperatur dingin ternyata ikut naik $0,85^{\circ}\text{C}$ dari temperatur permulaan dan mencapai temperatur 28.93°C . Memasuki menit ke 20, temperatur sisi panas naik melebihi 32.24°C dengan temperatur sisi dingin ikut naik hingga mencapai temperatur 29.61°C . Setelah memasuki rentang waktu yang diinginkan yaitu 30 menit, sisi panas terus naik hingga pada temperatur 33.17°C dan temperatur sisi dingin naik terus hingga 29.91°C , sehingga perbedaan temperatur sisi panas dan sisi dingin sebesar 3.38°C . Dari hasil grafik ini dapat kita analisa bahwa temperatur yang lebih besar berada di sisi panas daripada temperatur sisi dingin, dari analisa terlihat bahwa pada system termoakustik ini terjadi kompresi antara gelombang suara dan udara yang berada di dalam kanal-kanal *stack* dan panas

dibuang ke sisi panas sehingga temperatur di sisi panas terus naik namun pada system ini tidak terjadi ekspansi walaupun tekanan dan temperatur *stack* lebih rendah di bandingkan sisi panas. Sehingga gas tidak menyerap kalor untuk dibuang sehingga temperatur sisi dingin terus naik.

5.1.3 Posisi *stack* pada x_s 7,5 cm

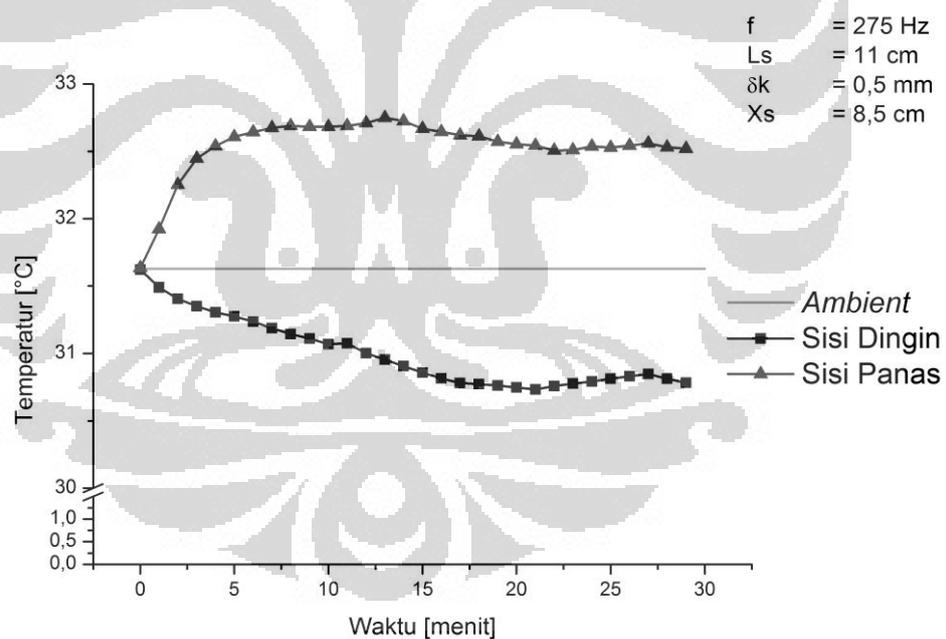


gambar 5. 3 *stack* dengan konfigurasi $L_s = 11\text{ cm}$ $f=275\text{ hz}$ $\delta_k = 0,5\text{ mm}$ x_s 7,5 cm

Grafik diatas adalah hasil pengujian pertama pada termoakustik yang dirancang. Pengujian dilakukan pada temperatur 28°C . pada temperatur tersebut menjadi titik awal temperatur cold dan termperatur hot. Setelah itu suara dihidupkan dengan volume *amplifier* maksimal. Pengaturan suara *monotone* pada frekuensi sample rate sebesar 275 Hz pada program *adobe audition 3.0* . pada menit ke 10 setelah dihidupkan maka terlihat besar temperatur panas naik hingga mendekati 29.87°C dan pada temperatur dingin turun mencapai temperatur 26.76°C . Memasuki menit ke 20, temperatur sisi panas naik melebihi 29.87°C dengan temperatur sisi dingin turun lagi pada temperatur 26.76°C . Setelah memasuki rentang

waktu yang diinginkan yaitu 30 menit, sisi panas terus naik hingga pada temperatur 29.64°C dan temperatur sisi dingin naik terus hingga 26.61°C , sehingga perbedaan temperatur sisi panas dan sisi dingin sebesar 3.31°C . Dari hasil grafik ini dapat kita analisa bahwa temperatur yang lebih besar berada di sisi dingin daripada temperatur sisi panas, dari analisa terlihat bahwa pada system termoakustik ini terjadi kompresi antara gelombang suara dan udara yang berada di dalam kanal-kanal *stack* dan panas dibuang ke sisi panas sehingga temperatur di sisi panas terus naik dan system ini juga melakukan ekspansi ke arah sisi dingin sehingga temperatur di sisi dingin juga ikut menurun sehingga pada percobaan kali ini memenuhi kriteria termoakustik.

5.1.4 Posisi *stack* pada x_s 8,5 cm

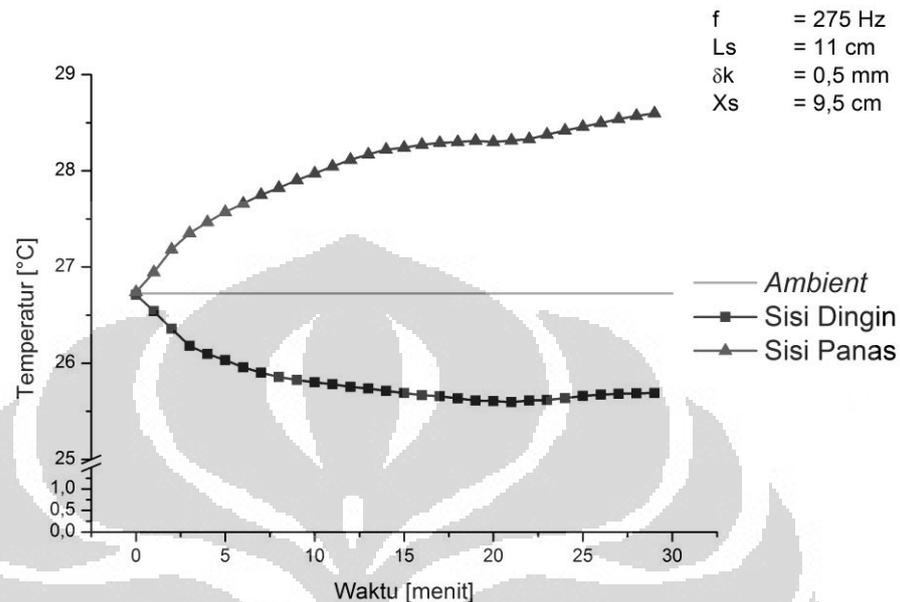


gambar 5. 4 *stack* dengan konfigurasi $L_s = 11\text{cm}$ $f=275 \text{ hz}$ $\delta_K = 0,5 \text{ mm}$ x_s 8,5 cm

Grafik diatas adalah hasil pengujian pertama pada termoakustik yang dirancang. Pengujian dilakukan pada temperatur 31.63°C . pada temperatur tersebut menjadi titik awal temperatur cold dan termperatur hot. Setelah itu suara dihidupkan dengan volume *amplifier* maksimal.

Pengaturan suara *monotone* pada frekuensi sample rate sebesar 275 Hz pada program *adobe audition 3.0* . pada menit ke 10 setelah dihidupkan maka terlihat besar temperatur panas naik hingga mendekati 32.68°C dan pada temperatur dingin turun mencapai temperatur 31.07°C . Memasuki menit ke 20, temperatur sisi panas naik melebihi 32.55°C dengan temperatur sisi dingin turun lagi pada temperatur 30.73°C . Setelah memasuki rentang waktu yang diinginkan yaitu 30 menit, sisi panas terus naik hingga pada temperatur 32.54°C dan temperatur sisi dingin turun terus hingga 30.79°C , sehingga perbedaan temperatur sisi panas dan sisi dingin sebesar $1,84^{\circ}\text{C}$. Dari hasil grafik ini dapat kita analisa bahwa temperatur yang lebih besar berada di sisi panas dan temperatur di sisi dingin temperatur menjadi lebih rendah dari titik permulaan walaupun temperatur pada sisi panas berfluktuasi naik turun begitu juga dengan temperatur pada sisi dingin. Dari analisa terlihat bahwa pada system termoakustik ini terjadi kompresi antara gelombang suara dan udara yang berada di dalam kanal-kanal *stack* dan panas dibuang ke sisi panas sehingga temperatur di sisi panas terus naik dan system ini juga melakukan ekspansi ke arah sisi dingin sehingga temperatur di sisi dingin juga ikut menurun sehingga pada percobaan kali ini memenuhi kriteria termoakustik walaupun perbedaan temperatur lebih kecil daripada percobaan sebelumnya.

5.1.5 Posisi *stack* pada x_s 9,5 cm

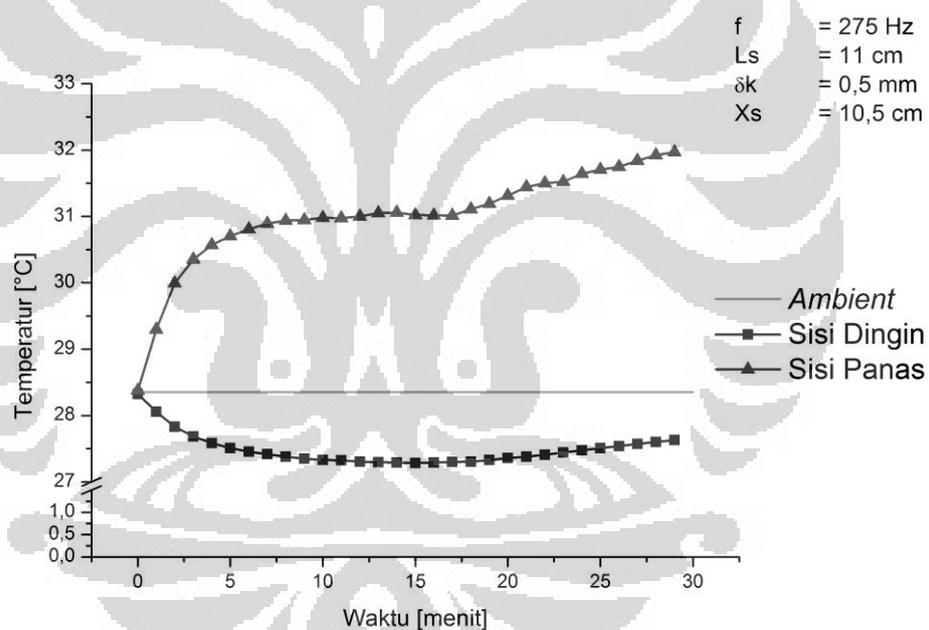


gambar 5. 5 *stack* dengan konfigurasi $L_s = 11\text{ cm}$ $f=275\text{ hz}$ $\delta_K = 0,5\text{ mm}$ x_s 9,5 cm

Grafik diatas adalah hasil pengujian pertama pada termoakustik yang dirancang. Pengujian dilakukan pada temperatur 26.71°C . pada temperatur tersebut menjadi titik awal temperatur cold dan temperatur hot. Setelah itu suara dihidupkan dengan volume *amplifier* maksimal. Pengaturan suara *monotone* pada frekuensi sample rate sebesar 275 Hz pada program *adobe audition 3.0* . pada menit ke 10 setelah dihidupkan maka terlihat besar temperatur panas naik hingga mendekati 27.97°C dan pada temperatur dingin turun mencapai temperatur 25.8°C . Memasuki menit ke 20, temperatur sisi panas naik melebihi 28.3°C dengan temperatur sisi dingin turun lagi pada temperatur 25.61°C . Setelah memasuki rentang waktu yang diinginkan yaitu 30 menit, sisi panas terus naik hingga pada temperatur 28.61°C dan temperatur sisi dingin turun terus hingga 25.7°C , sehingga perbedaan temperatur sisi panas dan sisi dingin sebesar 2.91°C . Dari hasil grafik ini dapat kita analisa bahwa temperatur yang lebih besar berada di sisi panas dan temperatur di sisi dingin temperatur menjadi lebih rendah dari titik permulaan walaupun

temperatur pada sisi panas berfluktuasi naik turun begitu juga dengan temperatur pada sisi dingin. Dari analisa terlihat bahwa pada system termoakustik ini terjadi kompresi antara gelombang suara dan udara yang berada di dalam kanal-kanal *stack* dan panas dibuang ke sisi panas sehingga temperatur di sisi panas terus naik dan system ini juga melakukan ekspansi ke arah sisi dingin sehingga temperatur di sisi dingin juga ikut menurun sehingga pada percobaan kali ini memenuhi kreteria termoakustik.

5.1.6 Posisi *stack* pada x_s 10,5 cm

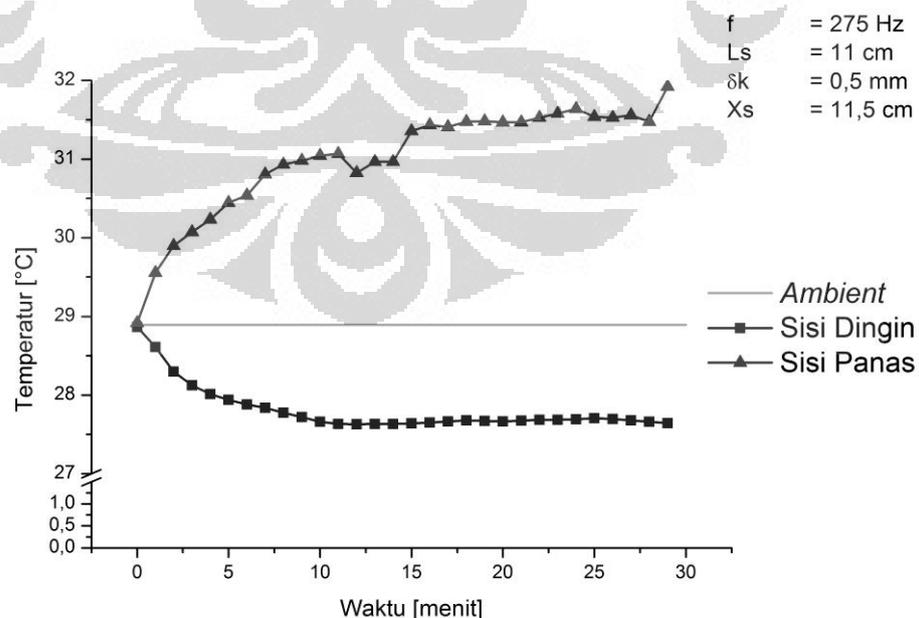


gambar 5. 6 *stack* dengan konfigurasi $L_s = 11\text{cm}$ $f=275\text{ hz}$ $\delta_K = 0,5\text{ mm}$ x_s 10,5 cm

Grafik diatas adalah hasil pengujian pertama pada termoakustik yang dirancang. Pengujian dilakukan pada temperatur 28.32°C . pada temperatur tersebut menjadi titik awal temperatur cold dan temperatur hot. Setelah itu suara dihidupkan dengan volume *amplifier* maksimal. Pengaturan suara *monotone* pada frekuensi sample rate sebesar 275 Hz pada program *adobe audition 3.0* . pada menit ke 10 setelah dihidupkan maka terlihat besar temperatur panas naik hingga mendekati 30.98°C dan

pada temperatur dingin turun mencapai temperatur 27.33°C . Memasuki menit ke 20, temperatur sisi panas naik melebihi 31.31°C dengan temperatur sisi dingin turun lagi pada temperatur 27.36°C . Setelah memasuki rentang waktu yang diinginkan yaitu 30 menit, sisi panas terus naik hingga pada temperatur 32.02°C dan temperatur sisi dingin turun terus hingga 27.66°C , sehingga perbedaan temperatur sisi panas dan sisi dingin sebesar 4.36°C . Dari hasil grafik ini dapat kita analisa bahwa temperatur yang lebih besar berada di sisi panas dan temperatur di sisi dingin temperatur menjadi lebih rendah dari titik permulaan walaupun temperatur pada sisi panas berfluktuasi naik turun begitu juga dengan temperatur pada sisi dingin, dan akhirnya pada menit ke 30 terlihat grafik semua sisi naik. Dari analisa terlihat bahwa pada system termoakustik ini terjadi kompresi antara gelombang suara dan udara yang berada di dalam kanal-kanal *stack* dan panas dibuang ke sisi panas sehingga temperatur di sisi panas terus naik dan system ini juga melakukan ekspansi ke arah sisi dingin sehingga temperatur di sisi dingin juga ikut menurun sehingga pada percobaan kali ini memenuhi kriteria termoakustik.

5.1.1 Posisi *stack* pada x_s 11,5 cm

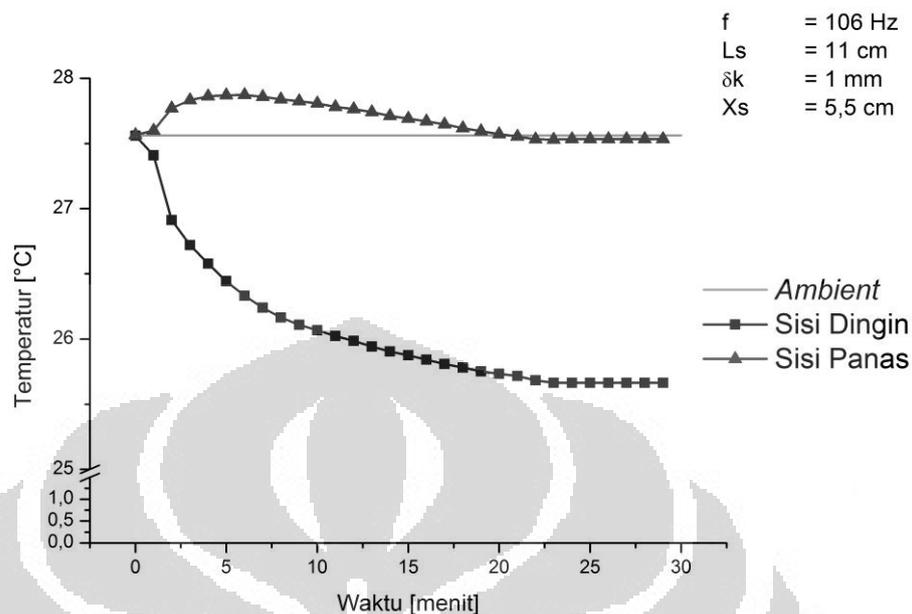


gambar 5. 7 dengan konfigurasi $L_s = 11\text{cm}$ $f=275 \text{ hz}$ $\delta_K = 0,5 \text{ mm}$ $x_s 11,5 \text{ cm}$

Grafik diatas adalah hasil pengujian pertama pada termoakustik yang dirancang. Pengujian dilakukan pada temperatur 28.87 °C. pada temperatur tersebut menjadi titik awal temperatur cold dan temperatur hot. Setelah itu suara dihidupkan dengan volume *amplifier* maksimal. Pengaturan suara *monotone* pada frekuensi sample rate sebesar 275 Hz pada program *adobe audition 3.0* . pada menit ke 10 setelah dihidupkan maka terlihat besar temperatur panas naik hingga mendekati 31.04°C dan pada temperatur dingin turun mencapai temperatur 27.63°C. Memasuki menit ke 20, temperatur sisi panas naik melebihi 31.47°C dengan temperatur sisi dingin turun lagi pada temperatur 27.67°C. Setelah memasuki rentang waktu yang diinginkan yaitu 30 menit, sisi panas terus naik hingga pada temperatur 32.02°C dan temperatur sisi dingin turun terus hingga 27.68°C, sehingga perbedaan temperatur sisi panas dan sisi dingin sebesar 4.36°C. Dari hasil grafik ini dapat kita analisa bahwa temperatur yang lebih besar berada di sisi panas dan temperatur di sisi dingin temperatur menjadi lebih rendah dari titik permulaan walaupun temperatur pada sisi panas berfluktuasi naik turun begitu juga dengan temperatur pada sisi dingin, dan akhirnya pada menit ke 30 terlihat grafik di sisi panas naik tetapi pada sisi dingin sudah mencapai kestabilan. Dari analisa terlihat bahwa pada system termoakustik ini terjadi kompresi antara gelombang suara dan udara yang berada di dalam kanal-kanal *stack* dan panas dibuang ke sisi panas sehingga temperatur di sisi panas terus naik dan system ini juga melakukan ekspansi ke arah sisi dingin sehingga temperatur di sisi dingin juga ikut menurun sehingga pada percobaan kali ini memenuhi kriteria termoakustik.

5.2 Grafik dan analisa termoakustik pada panjang *stack* 11 cm dengan frekuensi 106 serta $\delta_K = 1$ mm

5.2.1 Posisi *stack* pada x_s 5,5 cm

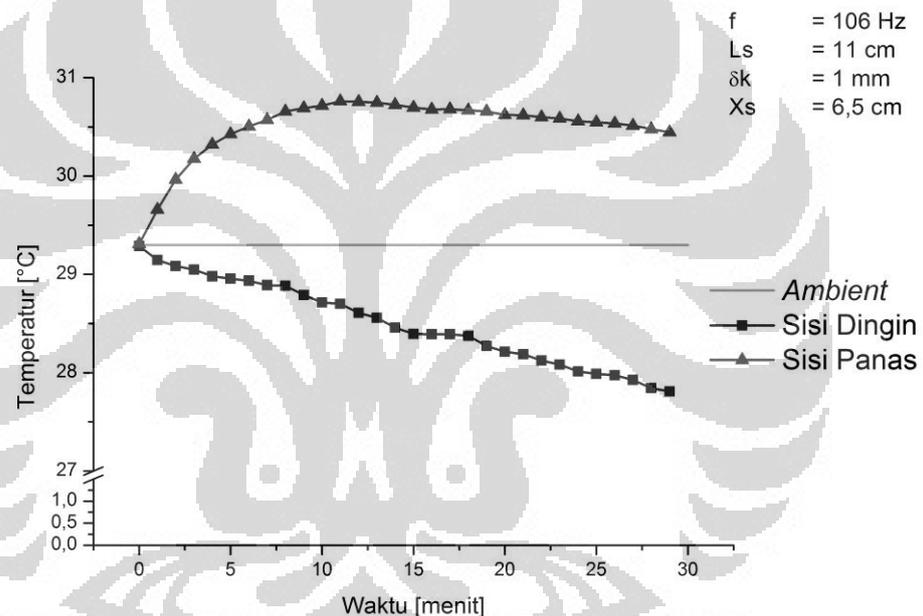


gambar 5. 8 *stack* dengan konfigurasi $L_s = 11\text{cm}$ $f=106 \text{ hz}$ $\delta_k = 1 \text{ mm}$ x_s 5,5 cm

Grafik diatas adalah hasil pengujian kedua pada termoakustik yang dirancang. Pengujian dilakukan pada temperatur 27.56°C . pada temperatur tersebut menjadi titik awal temperatur cold dan temperatur hot. Setelah itu suara dihidupkan dengan volume *amplifier* maksimal. Pengaturan suara *monotone* pada frekuensi sample rate sebesar 106Hz pada program *adobe audition 3.0* . pada menit ke 10 setelah dihidupkan maka terlihat besar temperatur panas naik hingga mendekati 27.81°C dan pada temperatur dingin turun mencapai temperatur 26.07°C . Memasuki menit ke 20, temperatur sisi panas turun ke temperatur 27.57°C dengan temperatur sisi dingin turun lagi pada temperatur 25.73°C . Setelah memasuki rentang waktu yang diinginkan yaitu 30 menit, sisi panas terus menurun hingga pada temperatur 27.54°C dan temperatur sisi dingin turun terus hingga 25.66°C , sehingga perbedaan temperatur sisi panas dan sisi dingin sebesar 1.87°C . Dari hasil grafik ini dapat kita analisa bahwa temperatur pada sisi panas menurun di menit ke 7, grafik menunjukkan penurunan ke arah temperatur awal sedangkan temperatur pada sisi dingin terlihat menurun dengan normal hingga mencapai

kestabilan di menit 24. Dari analisa terlihat bahwa pada system termoakustik ini terjadi kompresi antara gelombang suara dan udara yang berada di dalam kanal-kanal *stack* dan panas dibuang ke sisi panas sehingga temperatur di sisi panas terus naik namun kompresi ini tidak terjadi lagi setelah menit ke 7 dan system ini juga melakukan ekspansi ke arah sisi dingin sehingga temperatur di sisi dingin juga ikut menurun sehingga pada percobaan kali ini memenuhi kreteria termoakustik.

5.2.2 Posisi *stack* pada x_s 6,5 cm

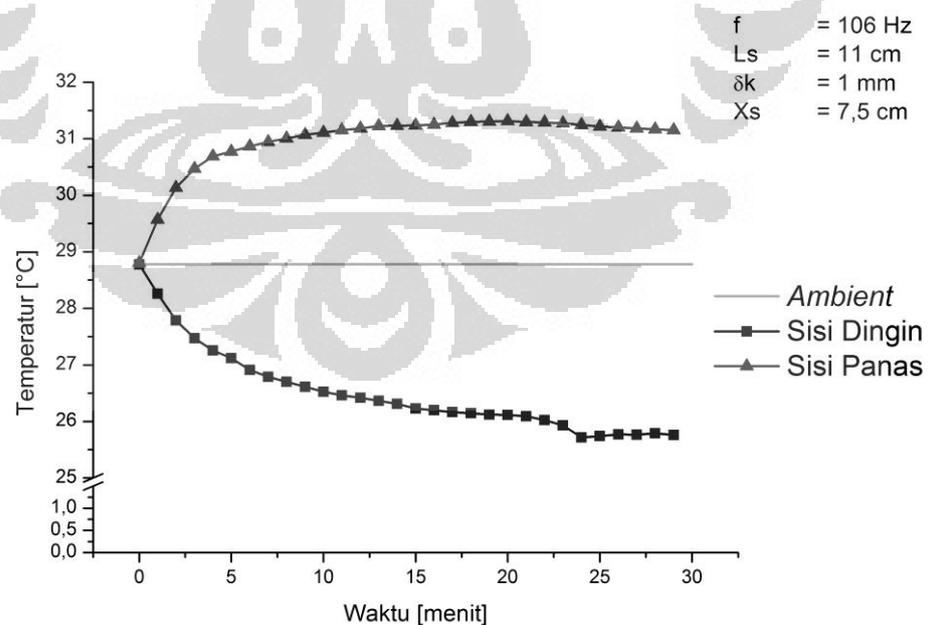


gambar 5. 9 *stack* dengan konfigurasi $L_s = 11 \text{ cm}$ $f = 106 \text{ hz}$ $\delta_k = 1 \text{ mm}$ $x_s = 6,5 \text{ cm}$

Grafik diatas adalah hasil pengujian kedua pada termoakustik yang dirancang. Pengujian dilakukan pada temperatur 29.29°C . pada temperatur tersebut menjadi titik awal temperatur cold dan temperatur hot. Setelah itu suara dihidupkan dengan volume *amplifier* maksimal. Pengaturan suara *monotone* pada frekuensi sample rate sebesar 106 Hz pada program *adobe audition 3.0* . pada menit ke 10 setelah dihidupkan maka terlihat besar temperatur sisi panas naik hingga mendekati 30.72°C dan pada temperatur dingin turun mencapai temperatur 28.72°C . Memasuki menit ke 20, temperatur sisi panas turun pada 30.62°C dengan

temperatur sisi dingin turun lagi pada temperatur 28.22°C . Setelah memasuki rentang waktu yang diinginkan yaitu 30 menit, sisi panas terus turun hingga pada temperatur 30.43°C dan temperatur sisi dingin turun terus hingga 27.79°C , sehingga perbedaan temperatur sisi panas dan sisi dingin sebesar 2.64°C . Dari hasil grafik ini dapat kita analisa bahwa temperatur pada sisi panas menurun di menit ke 13, grafik menunjukkan penurunan ke arah temperatur awal, sedangkan pada sisi dingin temperatur menurun secara linear. Dari analisa terlihat bahwa pada system termoakustik ini terjadi kompresi antara gelombang suara dan udara yang berada di dalam kanal-kanal *stack* dan panas dibuang ke sisi panas sehingga temperatur di sisi panas terus naik namun kompresi ini tidak terjadi lagi setelah menit ke 13 dan system ini juga melakukan ekspansi ke arah sisi dingin sehingga temperatur di sisi dingin juga ikut menurun sehingga pada percobaan kali ini memenuhi kriteria termoakustik.

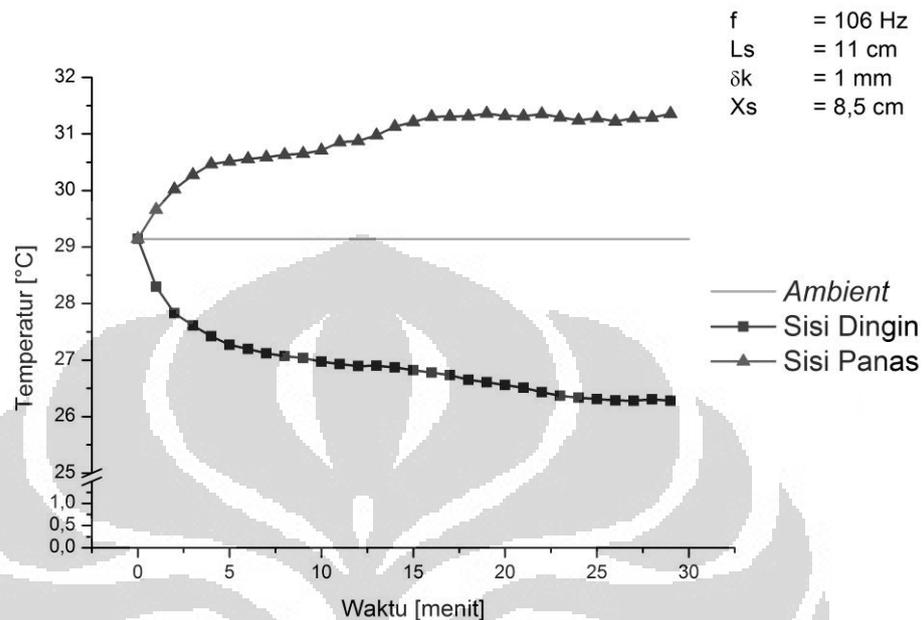
5.2.3 Posisi *stack* pada x_s 7,5 cm



gambar 5. 10 *stack* dengan konfigurasi $L_s = 11\text{cm}$ $f=106 \text{ hz}$ $\delta k = 1 \text{ mm}$ $x_s = 7,5 \text{ cm}$

Grafik diatas adalah hasil pengujian kedua pada termoakustik yang dirancang. Pengujian dilakukan pada temperatur 28.77 °C. pada temperatur tersebut menjadi titik awal temperatur cold dan temperatur hot. Setelah itu suara dihidupkan dengan volume *amplifier* maksimal. Pengaturan suara *monotone* pada frekuensi sample rate sebesar 106 Hz pada program *adobe audition 3.0* . pada menit ke 10 setelah dihidupkan maka terlihat besar temperatur panas naik hingga mendekati 31.11°C dan pada temperatur dingin turun mencapai temperatur 26.52°C. Memasuki menit ke 20, temperatur sisi panas naik melebihi 31.31°C dengan temperatur sisi dingin turun lagi pada temperatur 26.11°C. Setelah memasuki rentang waktu yang diinginkan yaitu 30 menit, sisi panas menurun hingga pada temperatur 31.13°C dan temperatur sisi dingin turun terus hingga 25.70°C, sehingga perbedaan temperatur sisi panas dan sisi dingin sebesar 5.43°C. Dari hasil grafik ini dapat kita analisa bahwa temperatur yang lebih besar berada di sisi panas dan temperatur di sisi dingin temperatur menjadi lebih rendah dari titik permulaan walaupun temperatur pada sisi dingin berfluktuasi naik turun dan akhirnya pada menit ke 30 terlihat grafik di sisi panas dan di sisi dingin sudah mencapai kestabilan. Dari analisa terlihat bahwa pada system termoakustik ini terjadi kompresi antara gelombang suara dan udara yang berada di dalam kanal-kanal *stack* dan panas dibuang ke sisi panas sehingga temperatur di sisi panas terus naik dan system ini juga melakukan ekspansi ke arah sisi dingin sehingga temperatur di sisi dingin juga ikut menurun sehingga pada percobaan kali ini memenuhi kriteria termoakustik.

5.2.4 Posisi *stack* pada x_s 8,5 cm

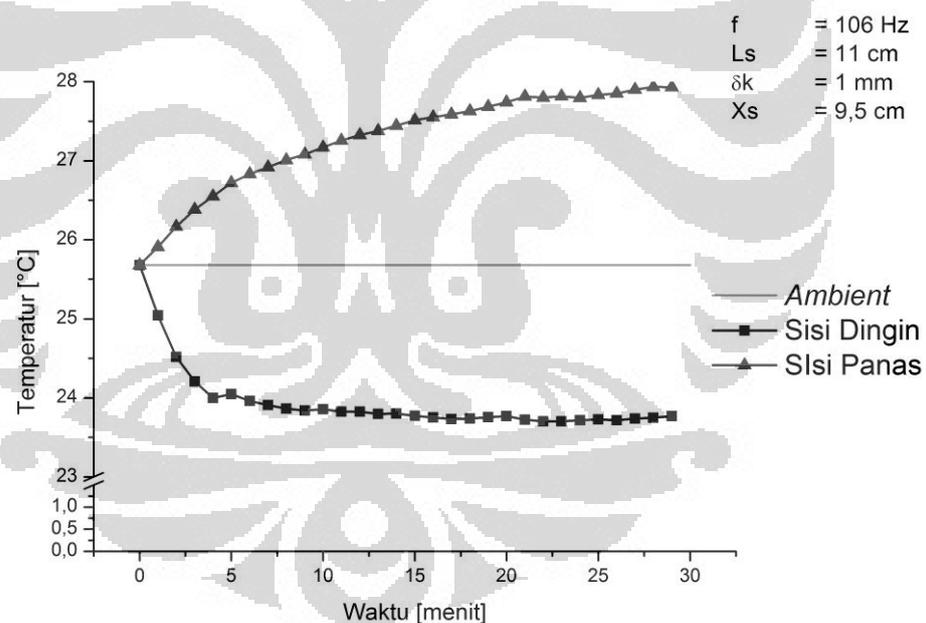


gambar 5. 11 *stack* dengan konfigurasi $L_s = 11\text{cm}$ $f=106 \text{ hz}$ $\delta_K = 1 \text{ mm}$ x_s 8,5 cm

Grafik diatas adalah hasil pengujian kedua pada termoakustik yang dirancang. Pengujian dilakukan pada temperatur 29.15°C . pada temperatur tersebut menjadi titik awal temperatur cold dan temperatur hot. Setelah itu suara dihidupkan dengan volume *amplifier* maksimal. Pengaturan suara *monotone* pada frekuensi sample rate sebesar 106 Hz pada program *adobe audition 3.0*. pada menit ke 10 setelah dihidupkan maka terlihat besar temperatur panas naik hingga mendekati 30.71°C dan pada temperatur dingin turun mencapai temperatur 26.97°C . Memasuki menit ke 20, temperatur sisi panas naik melebihi 31.32°C dengan temperatur sisi dingin turun lagi pada temperatur 26.56°C . Setelah memasuki rentang waktu yang diinginkan yaitu 30 menit, sisi panas terus naik hingga pada temperatur 31.37°C dan temperatur sisi dingin turun terus hingga 26.27°C , sehingga perbedaan temperatur sisi panas dan sisi dingin sebesar 5.11°C . Dari hasil grafik ini dapat kita analisa bahwa temperatur yang lebih besar berada di sisi panas dan temperatur di sisi

dingin temperatur menjadi lebih rendah dari titik permulaan walaupun temperatur pada sisi panas berfluktuasi naik turun begitu juga dengan temperatur pada sisi dingin, dan akhirnya pada menit ke 30 terlihat grafik di sisi panas naik tetapi pada sisi dingin sudah mencapai kestabilan. Dari analisa terlihat bahwa pada system termoakustik ini terjadi kompresi antara gelombang suara dan udara yang berada di dalam kanal-kanal *stack* dan panas dibuang ke sisi panas sehingga temperatur di sisi panas terus naik dan system ini juga melakukan ekspansi ke arah sisi dingin sehingga temperatur di sisi dingin juga ikut menurun sehingga pada percobaan kali ini memenuhi kriteria termoakustik.

5.2.5 Posisi *stack* pada x_s 9,5 cm

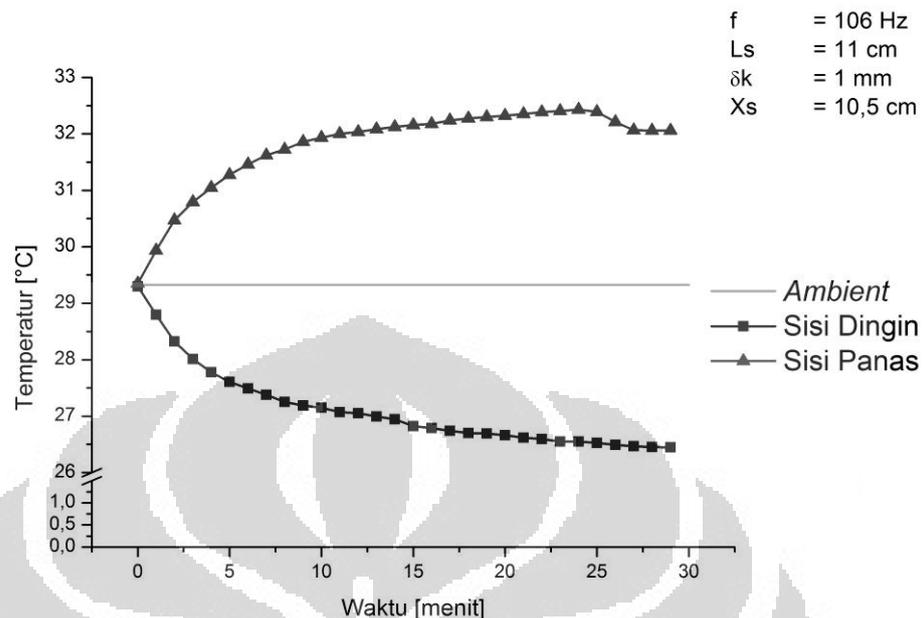


gambar 5. 12 *stack* dengan konfigurasi $L_s = 11\text{cm}$ $f=106\text{ hz}$ $\delta_K = 1\text{ mm}$ x_s 9,5 cm

Grafik diatas adalah hasil pengujian kedua pada termoakustik yang dirancang. Pengujian dilakukan pada temperatur 25.68 °C. pada temperatur tersebut menjadi titik awal temperatur cold dan temperatur hot. Setelah itu suara dihidupkan dengan volume *amplifier* maksimal.

Pengaturan suara *monotone* pada frekuensi sample rate sebesar 106 Hz pada program *adobe audition 3.0* . pada menit ke 10 setelah dihidupkan maka terlihat besar temperatur panas naik hingga mendekati 27.17°C dan pada temperatur dingin turun mencapai temperatur 23.86°C . Memasuki menit ke 20, temperatur sisi panas naik melebihi 27.74°C dengan temperatur sisi dingin turun lagi pada temperatur 23.77°C . Setelah memasuki rentang waktu yang diinginkan yaitu 30 menit, sisi panas terus naik hingga pada temperatur 27.85°C dan temperatur sisi dingin turun terus hingga 23.72°C , sehingga perbedaan temperatur sisi panas dan sisi dingin sebesar 4.13°C . Dari hasil grafik ini dapat kita analisa bahwa temperatur yang lebih besar berada di sisi panas dan temperatur di sisi dingin temperatur menjadi lebih rendah dari titik permulaan walaupun temperatur pada sisi panas berfluktuasi naik turun begitu juga dengan temperatur pada sisi dingin, dan akhirnya pada menit ke 30 terlihat grafik di sisi panas naik tetapi pada sisi dingin sudah mencapai kestabilan. Dari analisa terlihat bahwa pada system termoakustik ini terjadi kompresi antara gelombang suara dan udara yang berada di dalam kanal-kanal *stack* dan panas dibuang ke sisi panas sehingga temperatur di sisi panas terus naik dan system ini juga melakukan ekspansi ke arah sisi dingin sehingga temperatur di sisi dingin juga ikut menurun sehingga pada percobaan kali ini memenuhi kreteria termoakustik

5.2.6 Posisi *stack* pada x_s 10,5 cm

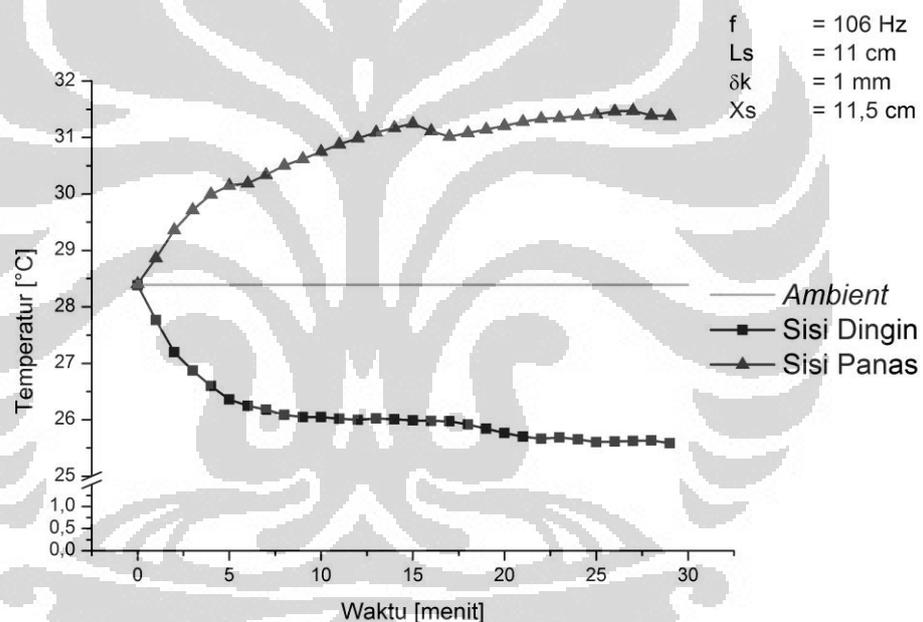


gambar 5. 13 *stack* dengan konfigurasi $L_s = 11\text{cm}$ $f=106 \text{ hz}$ $\delta_K = 1 \text{ mm}$ x_s 10,5 cm

Grafik diatas adalah hasil pengujian pertama pada termoakustik yang dirancang. Pengujian dilakukan pada temperatur 29.3 °C. pada temperatur tersebut menjadi titik awal temperatur cold dan temperatur hot. Setelah itu suara dihidupkan dengan volume *amplifier* maksimal. Pengaturan suara *monotone* pada frekuensi sample rate sebesar 106 Hz pada program *adobe audition 3.0* . pada menit ke 10 setelah dihidupkan maka terlihat besar temperatur panas naik hingga mendekati 31.93°C dan pada temperatur dingin turun mencapai temperatur 27.15°C. Memasuki menit ke 20, temperatur sisi panas naik melebihi 32.32°C dengan temperatur sisi dingin turun lagi pada temperatur 26.67°C. Setelah memasuki rentang waktu yang diinginkan yaitu 30 menit, sisi panas terus naik hingga pada temperatur 32.04 °C dan temperatur sisi dingin turun terus hingga 26.43 °C, sehingga perbedaan temperatur sisi panas dan sisi dingin sebesar 5.88°C. Dari hasil grafik ini dapat kita analisa bahwa temperatur yang lebih besar berada di sisi panas dan temperatur di sisi dingin temperatur menjadi lebih rendah dari titik permulaan walaupun temperatur pada sisi panas berfluktuasi naik turun begitu juga dengan

temperatur pada sisi dingin, dan akhirnya pada menit ke 30 terlihat grafik di sisi panas naik tetapi pada sisi dingin sudah mencapai kestabilan. Dari analisa terlihat bahwa pada system termoakustik ini terjadi kompresi antara gelombang suara dan udara yang berada di dalam kanal-kanal *stack* dan panas dibuang ke sisi panas sehingga temperatur di sisi panas terus naik dan system ini juga melakukan ekspansi ke arah sisi dingin sehingga temperatur di sisi dingin juga ikut menurun sehingga pada percobaan kali ini memenuhi kriteria termoakustik.

5.2.1 Posisi *stack* pada x_s 11,5 cm



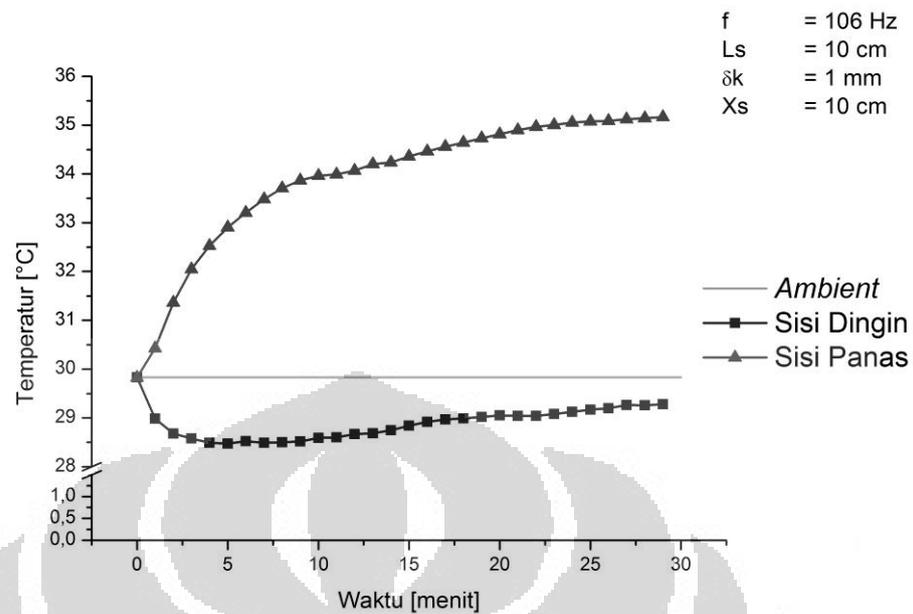
gambar 5. 14 *stack* dengan konfigurasi $L_s = 11\text{cm}$ $f=106\text{ hz}$ $\delta_K = 1\text{ mm}$ x_s 11,5 cm

Grafik diatas adalah hasil pengujian pertama pada termoakustik yang dirancang. Pengujian dilakukan pada temperatur $28.38\text{ }^{\circ}\text{C}$. pada temperatur tersebut menjadi titik awal temperatur cold dan temperatur hot. Setelah itu suara dihidupkan dengan volume *amplifier* maksimal. Pengaturan suara *monotone* pada frekuensi sample rate sebesar 106 Hz pada program *adobe audition 3.0* . pada menit ke 10 setelah dihidupkan maka terlihat besar temperatur panas naik hingga mendekati $30.75\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan

pada temperatur dingin turun mencapai temperatur 26.05°C . Memasuki menit ke 20, temperatur sisi panas naik melebihi 31.21°C dengan temperatur sisi dingin turun lagi pada temperatur 25.76°C . Setelah memasuki rentang waktu yang diinginkan yaitu 30 menit, sisi panas terus naik hingga pada temperatur 31.38°C dan temperatur sisi dingin turun terus hingga 25.59°C , sehingga perbedaan temperatur sisi panas dan sisi dingin sebesar 5.85°C . Dari hasil grafik ini dapat kita analisa bahwa temperatur yang lebih besar berada di sisi panas dan temperatur di sisi dingin temperatur menjadi lebih rendah dari titik permulaan walaupun temperatur pada sisi panas berfluktuasi naik turun begitu juga dengan temperatur pada sisi dingin, dan akhirnya pada menit ke 30 terlihat grafik di sisi panas naik tetapi pada sisi dingin sudah mencapai kestabilan. Dari analisa terlihat bahwa pada system termoakustik ini terjadi kompresi antara gelombang suara dan udara yang berada di dalam kanal-kanal *stack* dan panas dibuang ke sisi panas sehingga temperatur di sisi panas terus naik dan system ini juga melakukan ekspansi ke arah sisi dingin sehingga temperatur di sisi dingin juga ikut menurun sehingga pada percobaan kali ini memenuhi kreteria termoakustik.

5.3 Grafik dan analisa termoakustik pada panjang *stack* 10 cm dengan frekuensi 106 serta $\delta_K = 1 \text{ mm}$

5.3.1 Posisi *stack* pada x_s 10 cm

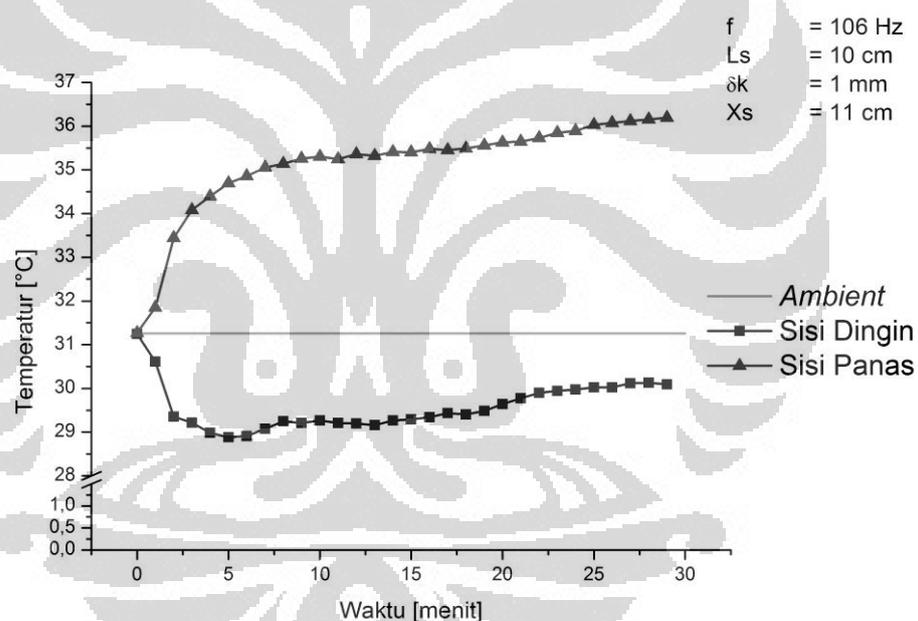


gambar 5. 15 stack dengan konfigurasi $L_s = 10$ cm $f=106$ hz $\delta_K = 1$ mm x_s 10 cm

Grafik diatas adalah hasil pengujian ketiga pada termoakustik yang dirancang. Pengujian dilakukan pada temperatur 29.83°C . pada temperatur tersebut menjadi titik awal temperatur cold dan temperatur hot. Setelah itu suara dihidupkan dengan volume *amplifier* maksimal. Pengaturan suara *monotone* pada frekuensi sample rate sebesar 106Hz pada program *adobe audition 3.0* . pada menit ke 10 setelah dihidupkan maka terlihat besar temperatur panas naik hingga mendekati 33.97°C dan pada temperatur dingin turun mencapai temperatur 28.47°C . Memasuki menit ke 20, temperatur sisi panas tnaik ke temperatur 34.81°C dengan temperatur sisi dingin naik pada temperatur 29.06°C . Setelah memasuki rentang waktu yang diinginkan yaitu 30 menit, sisi panas terus naik hingga pada temperatur 35.16°C dan temperatur sisi dingin turun terus hingga 29.28°C , sehingga perbedaan temperatur sisi panas dan sisi dingin sebesar 5.93°C . Dari hasil grafik ini dapat kita analisa bahwa temperatur pada sisi panas menurun tetapi setelah itu berangsur naik lagi, Sedangkan temperatur pada sisi dingin terlihat menurun dengan normal hingga mencapai menit ke 5 temperatur sisi dingin naik sampai akhirnya di menit ke 30 mencapai kestabilan. Dari analisa terlihat bahwa pada system

termoakustik ini terjadi kompresi antara gelombang suara dan udara yang berada di dalam kanal-kanal *stack* dan panas dibuang ke sisi panas sehingga temperatur di sisi panas terus naik namun kompresi ini sempat tidak terjadi namun berangsur melakukan kompresi lagi setelah itu. system ini juga melakukan ekspansi ke arah sisi dingin sehingga temperatur di sisi dingin juga ikut menurun namun pada menit ke 5 sistem ini berhenti ber-ekspansi hingga sampai waktu yang ditetapkan, tetapi pada percobaan kali ini memenuhi kriteria termoakustik.

5.3.2 Posisi *stack* pada x_s 11 cm

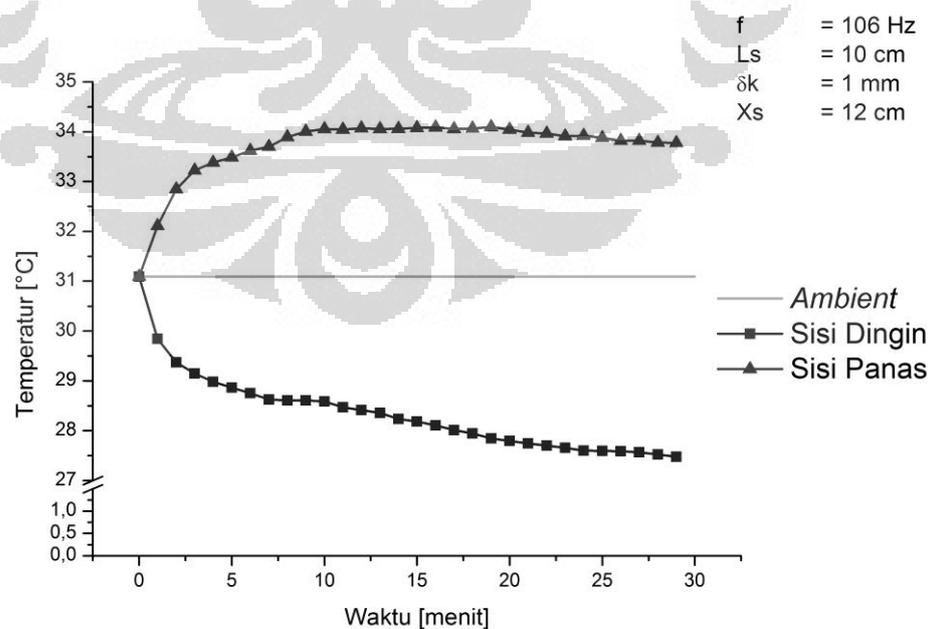


gambar 5. 16 *stack* dengan konfigurasi $L_s = 10\text{cm}$ $f=106 \text{ hz}$ $\delta_K = 1 \text{ mm}$ $x_s = 11 \text{ cm}$

Grafik diatas adalah hasil pengujian kedua pada termoakustik yang dirancang. Pengujian dilakukan pada temperatur 31.25°C . pada temperatur tersebut menjadi titik awal temperatur cold dan temperatur hot. Setelah itu suara dihidupkan dengan volume *amplifier* maksimal. Pengaturan suara *monotone* pada frekuensi sample rate sebesar 106 Hz pada program *adobe audition 3.0* . pada menit ke 10 setelah dihidupkan maka terlihat besar temperatur sisi panas naik hingga mendekati 35.30°C

dan pada temperatur dingin turun mencapai temperatur 29.27°C . Memasuki menit ke 20, temperatur sisi panas turun pada 35.63°C dengan temperatur sisi dingin turun lagi pada temperatur 29.64°C . Setelah memasuki rentang waktu yang diinginkan yaitu 30 menit, sisi panas terus turun hingga pada temperatur 36.25°C dan temperatur sisi dingin turun terus hingga 30.11°C , sehingga perbedaan temperatur sisi panas dan sisi dingin sebesar 6.16°C . Dari hasil grafik ini dapat kita analisa bahwa temperatur pada sisi panas berubah fluktuatif ke arah peningkatan temperatur. Dari analisa terlihat bahwa pada system termoakustik ini terjadi kompresi antara gelombang suara dan udara yang berada di dalam kanal-kanal *stack* dan panas dibuang ke sisi panas sehingga temperatur di sisi panas terus naik dan system ini juga melakukan ekspansi ke arah sisi dingin sehingga temperatur di sisi dingin juga ikut menurun namun ekspansi ini hanya berlangsung hingga menit ke 5 setelah itu pada sisi dingin cenderung naik kearah kenaikan temperatur. Tetapi pada percobaan kali ini memenuhi kreteria termoakustik.

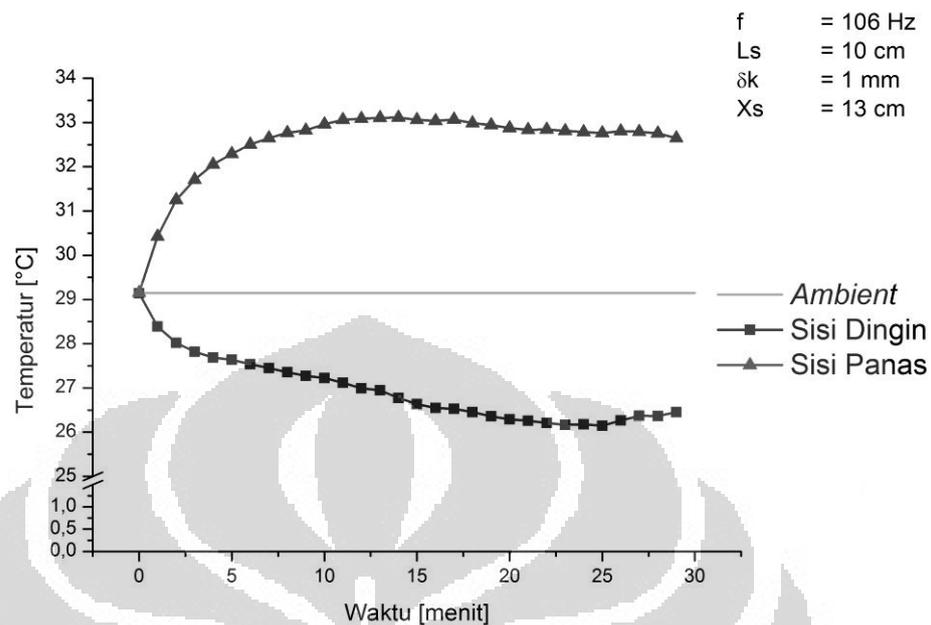
5.3.3 Posisi *stack* pada x_s 12 cm



gambar 5. 17 *stack* dengan konfigurasi $L_s = 10\text{cm}$ $f=106 \text{ hz}$ $\delta_K = 1 \text{ mm}$ $x_s = 12 \text{ cm}$

Grafik diatas adalah hasil pengujian kedua pada termoakustik yang dirancang. Pengujian dilakukan pada temperatur 31.09 °C. pada temperatur tersebut menjadi titik awal temperatur cold dan temperatur hot. Setelah itu suara dihidupkan dengan volume *amplifier* maksimal. Pengaturan suara *monotone* pada frekuensi sample rate sebesar 106 Hz pada program *adobe audition 3.0* . pada menit ke 10 setelah dihidupkan maka terlihat besar temperatur panas naik hingga mendekati 34.05°C dan pada temperatur dingin turun mencapai temperatur 28.59°C. Memasuki menit ke 20, temperatur sisi panas fluktuatif pada kisaran 34.05°C dengan temperatur sisi dingin turun lagi pada temperatur 27.80°C. Setelah memasuki rentang waktu yang diinginkan yaitu 30 menit, sisi panas menurun hingga pada temperatur 33.73°C dan temperatur sisi dingin turun terus hingga 27.43°C, sehingga perbedaan temperatur sisi panas dan sisi dingin sebesar 6.32°C. Dari hasil grafik ini dapat kita analisa bahwa temperatur yang lebih besar berada di sisi panas dan temperatur di sisi dingin temperatur menjadi lebih rendah dari titik permulaan walaupun temperatur pada sisi dingin berfluktuasi naik turun dan akhirnya pada menit ke 30 terlihat grafik di sisi panas dan di sisi dingin sudah mencapai kestabilan. Dari analisa terlihat bahwa pada system termoakustik ini terjadi kompresi antara gelombang suara dan udara yang berada di dalam kanal-kanal *stack* dan panas dibuang ke sisi panas sehingga temperatur di sisi panas terus naik dan system ini juga melakukan ekspansi ke arah sisi dingin sehingga temperatur di sisi dingin juga ikut menurun sehingga pada percobaan kali ini memenuhi kreteria termoakustik.

5.3.4 Posisi *stack* pada x_s 13 cm

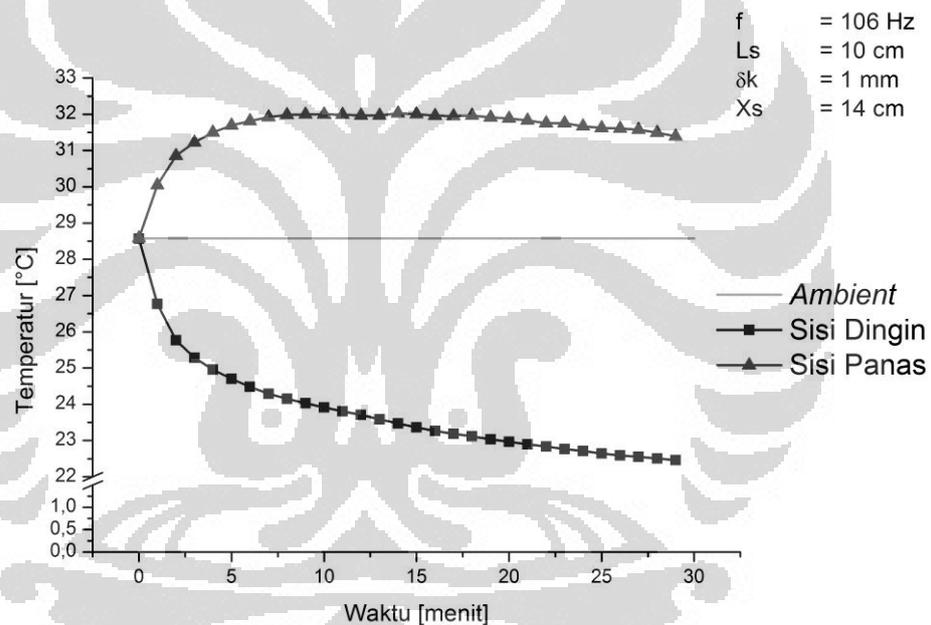


gambar 5. 18 *stack* dengan konfigurasi $L_s = 10\text{cm}$ $f=106\text{ hz}$ $\delta_K = 1\text{ mm}$ x_s 13 cm

Grafik diatas adalah hasil pengujian kedua pada termoakustik yang dirancang. Pengujian dilakukan pada temperatur $29.15\text{ }^{\circ}\text{C}$. pada temperatur tersebut menjadi titik awal temperatur cold dan temperatur hot. Setelah itu suara dihidupkan dengan volume *amplifier* maksimal. Pengaturan suara *monotone* pada frekuensi sample rate sebesar 106 Hz pada program *adobe audition 3.0* . pada menit ke 10 setelah dihidupkan maka terlihat besar temperatur panas naik hingga mendekati $32.96\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan pada temperatur dingin turun mencapai temperatur $27.22\text{ }^{\circ}\text{C}$. Memasuki menit ke 20, temperatur sisi panas naik melebihi $32.87\text{ }^{\circ}\text{C}$ dengan temperatur sisi dingin turun lagi pada temperatur $26.29\text{ }^{\circ}\text{C}$. Setelah memasuki rentang waktu yang diinginkan yaitu 30 menit, sisi panas terus naik hingga pada temperatur $32.65\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan temperatur sisi dingin turun terus hingga $26.43\text{ }^{\circ}\text{C}$, sehingga perbedaan temperatur sisi panas dan sisi dingin sebesar $6.64\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dari hasil grafik ini dapat kita analisa bahwa temperatur pada sisi panas terus naik hingga mencapai menit ke -17 temperatur pada sisi ini mulai menurun sedangkan pada sisi naik

temperatur menurun secara fluktuatif. Dari analisa terlihat bahwa pada system termoakustik ini terjadi kompresi antara gelombang suara dan udara yang berada di dalam kanal-kanal *stack* dan panas dibuang ke sisi panas sehingga temperatur di sisi panas terus naik namun pada menit ke 17 tidak terjadi kompresi lagi sehingga temperatur di didi panas terus menurun dan system ini juga melakukan ekspansi ke arah sisi dingin sehingga temperatur di sisi dingin juga ikut menurun sehingga pada percobaan kali ini memenuhi kreteria termoakustik

5.3.5 Posisi *stack* pada x_s 14 cm

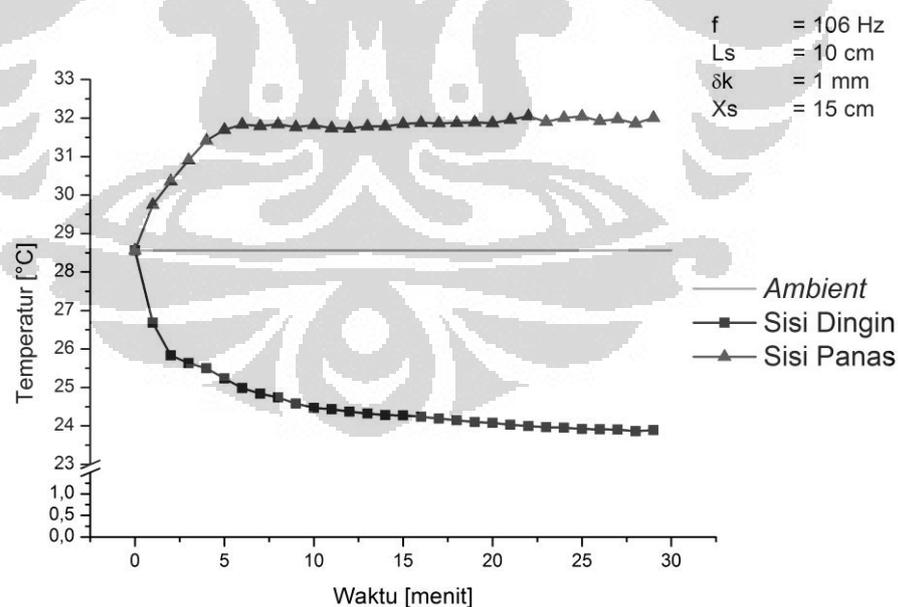


gambar 5. 19 *stack* dengan konfigurasi $L_s = 10\text{cm}$ $f=106\text{ hz}$ $\delta_K = 1\text{ mm}$ x_s 14 cm

Grafik diatas adalah hasil pengujian kedua pada termoakustik yang dirancang. Pengujian dilakukan pada temperatur $28.57\text{ }^{\circ}\text{C}$. pada temperatur tersebut menjadi titik awal temperatur cold dan temperatur hot. Setelah itu suara dihidupkan dengan volume *amplifier* maksimal. Pengaturan suara *monotone* pada frekuensi sample rate sebesar 106 Hz pada program *adobe audition 3.0* . pada menit ke 10 setelah dihidupkan maka terlihat besar temperatur panas naik hingga mendekati 32°C dan

pada temperatur dingin turun mencapai temperatur 23.91°C . Memasuki menit ke 20, temperatur sisi panas naik melebihi 31.89°C dengan temperatur sisi dingin turun lagi pada temperatur 22.97°C . Setelah memasuki rentang waktu yang diinginkan yaitu 30 menit, sisi panas terus naik hingga pada temperatur 31.5°C dan temperatur sisi dingin turun terus hingga 22.41°C , sehingga perbedaan temperatur sisi panas dan sisi dingin sebesar 9.09°C . Dari analisa terlihat bahwa pada system termoakustik ini terjadi kompresi antara gelombang suara dan udara yang berada di dalam kanal-kanal *stack* dan panas dibuang ke sisi panas sehingga temperatur di sisi panas terus naik namun pada menit ke 15 tidak terjadi kompresi lagi sehingga temperatur di sisi panas terus menurun dan system ini juga melakukan ekspansi ke arah sisi dingin sehingga temperatur di sisi dingin juga ikut menurun sehingga pada percobaan kali ini memenuhi kriteria termoakustik.

5.3.1 Posisi *stack* pada x_s 15 cm



gambar 5. 20 *stack* dengan konfigurasi $L_s = 10\text{cm}$ $f=106 \text{ hz}$ $\delta_K = 1 \text{ mm}$ x_s 15 cm

Grafik diatas adalah hasil pengujian pertama pada termoakustik yang dirancang. Pengujian dilakukan pada temperatur 28.56 °C. pada temperatur tersebut menjadi titik awal temperatur cold dan temperatur hot. Setelah itu suara dihidupkan dengan volume *amplifier* maksimal. Pengaturan suara *monotone* pada frekuensi sample rate sebesar 106 Hz pada program *adobe audition 3.0* . pada menit ke 10 setelah dihidupkan maka terlihat besar temperatur panas naik hingga mendekati 31.81°C dan pada temperatur dingin turun mencapai temperatur 24.47°C. Memasuki menit ke 20, temperatur sisi panas naik melebihi 31.87°C dengan temperatur sisi dingin turun lagi pada temperatur 24.08°C. Setelah memasuki rentang waktu yang diinginkan yaitu 30 menit, sisi panas terus naik hingga pada temperatur 31.91 °C dan temperatur sisi dingin turun terus hingga 23.88 °C, sehingga perbedaan temperatur sisi panas dan sisi dingin sebesar 8.13°C. Dari hasil grafik ini dapat kita analisa bahwa temperatur yang lebih besar berada di sisi panas dan temperatur di sisi dingin temperatur menjadi lebih rendah dari titik permulaan walaupun temperatur pada sisi panas berfluktuasi naik turun begitu juga dengan temperatur pada sisi dingin, dan akhirnya pada menit ke 30 terlihat grafik di sisi panas naik tetapi pada sisi dingin sudah mencapai kestabilan. Dari analisa terlihat bahwa pada system termoakustik ini terjadi kompresi antara gelombang suara dan udara yang berada di dalam kanal-kanal *stack* dan panas dibuang ke sisi panas sehingga temperatur di sisi panas terus naik dan system ini juga melakukan ekspansi ke arah sisi dingin sehingga temperatur di sisi dingin juga ikut menurun sehingga pada percobaan kali ini memenuhi kriteria termoakustik.

5.4 Grafik dan table perbandingan posisi dan panjang *stack* serta variasi frekuensi

Dari hasil perancangan dan pengujian termoakustik sederhana ini maka dapat dianalisa secara keseluruhannya sebagai berikut:

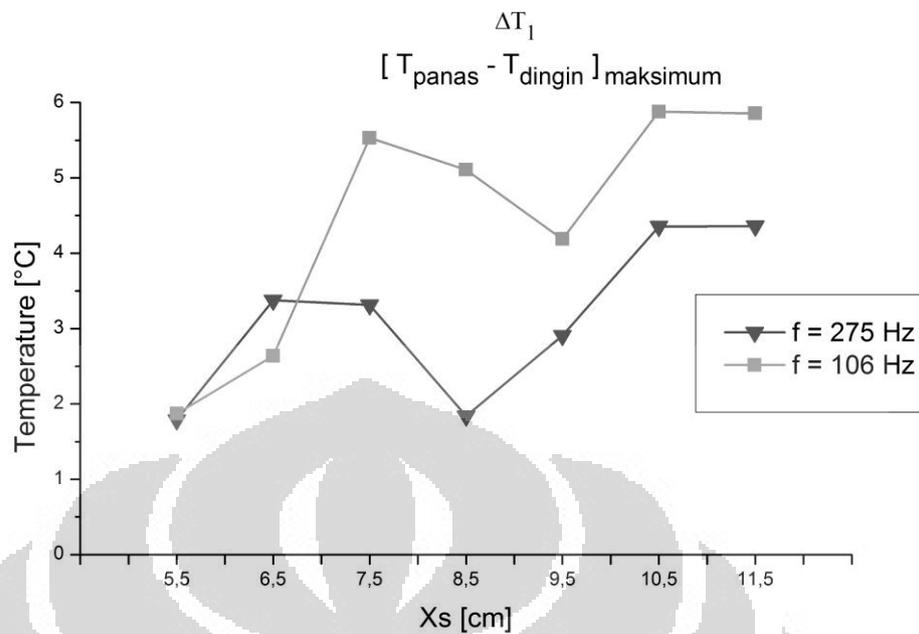
5.4.1 Perbandingan frekuensi $\delta_k=0.5\text{mm}$ pada 275 Hz dengan $\delta_k= 1\text{mm}$ 106 Hz

no	Xs	ΔT_1		ΔT_2	
		frekuensi		frekuensi	
		275	106	275	106
1	5.5	1.79	1.87	0.18	1.90
2	6.5	3.38	2.64	0.13	1.51
3	7.5	3.31	5.53	1.39	3.08
4	8.5	1.84	5.11	0.90	2.88
5	9.5	2.91	4.19	1.13	1.98
6	10.5	4.36	5.88	1.07	2.90
7	11.5	4.36	5.85	1.26	2.81

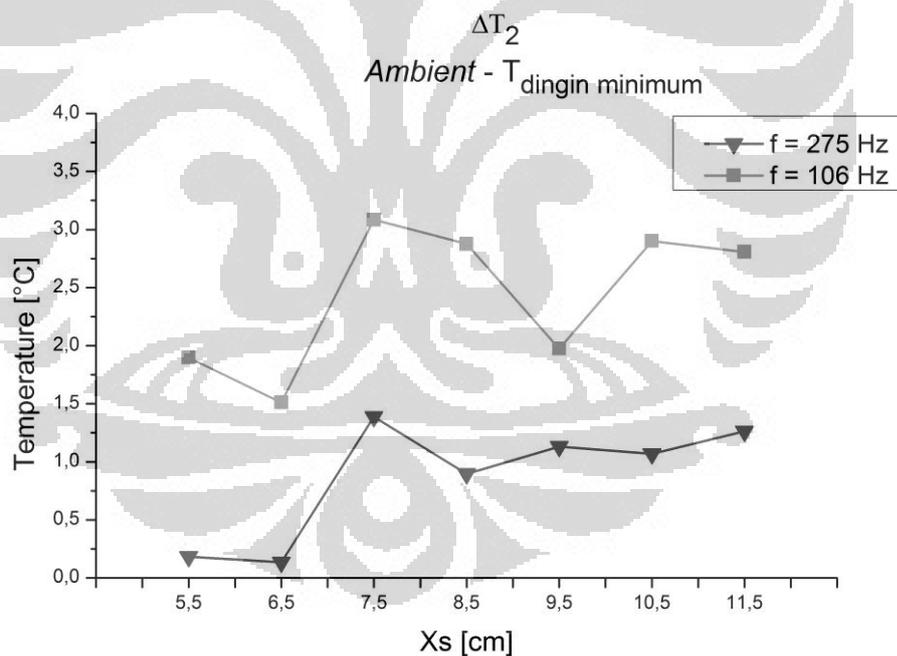
tabel 5. 1 tabel perbandingan frekuensi pada perbedaan temperatur

Keterangan tabel

- $\Delta T_1 = (T_{\text{panas}} - T_{\text{dingin}})_{\text{maksimum}}$
- $\Delta T_2 = T_{\text{ambient}} - T_{\text{dingin minimum}}$



gambar 5. 21 perbandingan ($T_{\text{panas}} - T_{\text{dingin}}$) maksimum



gambar 5. 22 perbandingan $T_{\text{ambient}} - T_{\text{dingin}}$ minimum

Dari percobaan yang kita lakukan maka dapat di lihat di table 6.1 bahwa jarak *stack* maksimum (jarak yang paling baik) berada pada $X_s = 10,5$ dengan mendapatkan hasil $\Delta T_1 (T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}})$ yang paling besar yaitu pada frekuensi 275 hz = 4.36°C dan pada frekuensi 106 hz = 5.88°C , dan

juga pada $\Delta T_2 = T_{\text{ambient}} - T_{\text{cold}}$ minimum mendapatkan hasil yaitu yaitu pada frekuensi 275 Hz = 1.07°C dan pada frekuensi 106 Hz = 2.9°C

Maka dapat kita analisa yaitu :

A. Hal ini diakibatkan pengaruh penempatan *stack* , pada gelombang berdiri (*standing wave*) dan untuk resonator berupa tabung lurus dan diameter homogen harus berada di titik perut atau titik tekanan pada gelombang berdiri yang biasanya adalah $\lambda/20$ (λ = panjang gelombang)[12]. Karena Posisi tengah dari *stack* dan panjang *stack* berhubungan dengan tekanan amplitudo dari gas dan kecepatan amplitudo dari partikel gas yang dekat dengan kedua ujung *stack*. Temperatur gradient sepanjang *stack* akan menjadi proporsional dengan perbedaan dari tekanan amplitudo dari gas . perbedaan tekanan ini akan menjadi besar ketika *stack* lebih panjang selama *stack* diletakan diantara node dan antinode dari tekanan.. walaubagaimanapun bila *stack* terlalu panjang maka akan menyebabkan kehilangan viscous dari gas di dalam *stack*. Oleh karena itu maka kita dapat mengetahui panjang dari *stack* dari termoakustik. Di lain sisi, *stack* harus diletakan dekat dengan *pressure antinode* dari gelombang berdiri agar mengecilkan nilai *viscous dissipation* dari tenaga suara. Tetapi system gelombang berdiri menghasilkan tenaga suara yang belum sempurna di dalam *velocity amplitude*. Artinya bahwa *stack* harus diletakan dekar titik tekan dari gelombang berdiri. Oleh karena itu kita dapat mengetahui posisi *stack* yang maksimum di dalam system termoakustik.

B. Hal ini pula diakibatkan perbedaan frekuensi yang menyebabkan desain *stack* ikut berubah terutama dengan perbedaan δ_K , karena dengan frekuensi 275Hz mendapatkan $\delta_K = 0,5 \text{ mm}$ dan frekuensi 106Hz mendapatkan $\delta_K = 1 \text{ mm}$ walaupun kedua frekuensi itu didapatkan dari mencari frekuensi resonansi tetapi dari pengaruh

panjang tabung yaitu 80 cm maka secara perhitungan maka frekuensi resonansi maksimum adalah 106 hz.

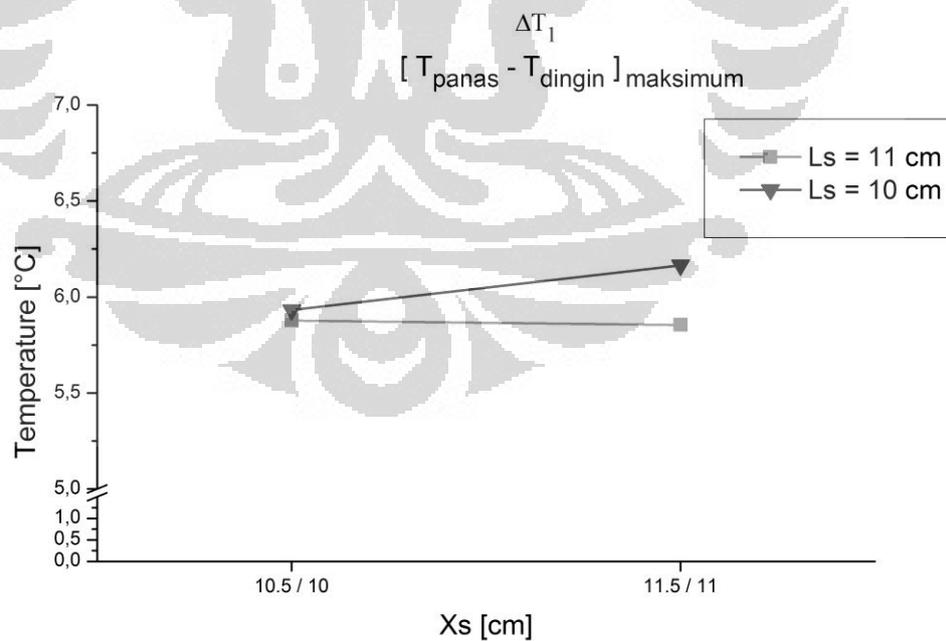
5.4.2 Perbandingan panjang *stack* 10cm dan 11 cm dengan $\delta_k=1\text{mm}$ 106 Hz

Xs	ΔT_1		ΔT_2	
	11	10	11	10
10.5 / 10	5.88	5.93	2.90	1.36
11.5 / 11	5.85	6.16	2.81	2.37

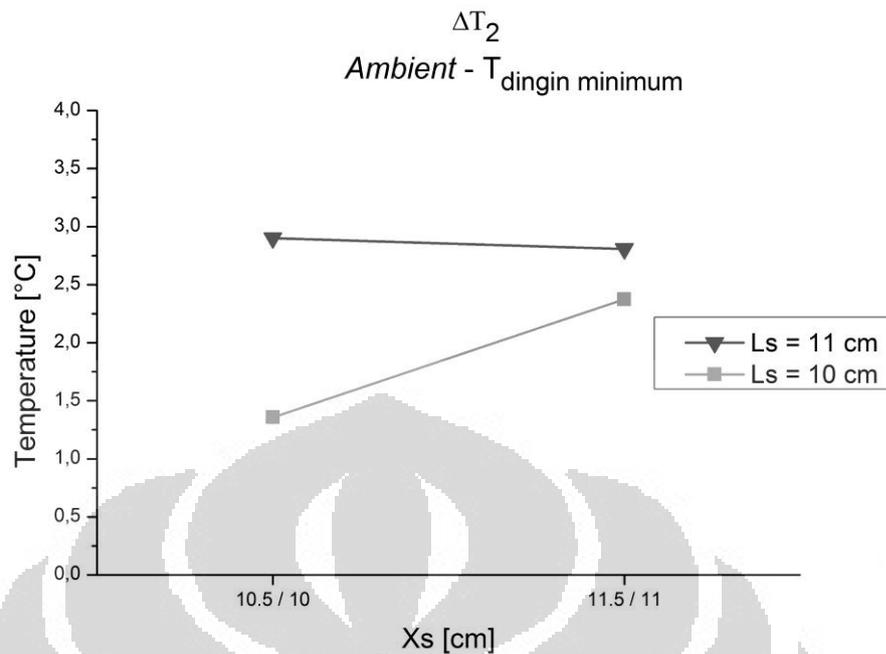
tabel 5. 2 Perbandingan panjang *stack* 10cm dan 11 cm dengan $\delta_k=1\text{mm}$ 106 Hz pada posisi yang sama

Keterangan tabel

- $\Delta T_1 = (T_{\text{panas}} - T_{\text{dingin}})_{\text{maksimum}}$
- $\Delta T_2 = T_{\text{ambient}} - T_{\text{dingin minimum}}$



gambar 5. 23 perbandingan $(T_{\text{panas}} - T_{\text{dingin}})_{\text{maksimum}}$



gambar 5. 24 perbandingan $T_{\text{ambient}} - T_{\text{dingin minimum}}$

Dari percobaan yang kita lakukan maka dapat di lihat di table 6.2 bahwa panjang *stack* maksimum berada pada $L_s=10$ cm dengan mendapatkan hasil $\Delta T_1(T_{\text{hot}}-T_{\text{cold}})$ yang paling besar yaitu pada $X_s = 11$ cm sebesar 6.16°C dan pada $\Delta T_2= T_{\text{ambient}} - T_{\text{cold minimum}}$ mendapatkan hasil yaitu sebesar 2.37°C

Analisa dari perbedaan panjang *stack* adalah pengaruh panjang *stack* dapat mengakibatkan penurunan performance dari *stack* tersebut karena dalam proses siklus termoakustik terdapat kompresi dan ekspansi sehingga bila *stack* tidak dibuat maksimum dapat mengurangi performa siklus tersebut. Ketika panjang *stack* lebih pendek daripada panjang *stack* optimum. *Stack* yang lebih panjang memberikan perbedaan *pressure amplitudes* yang lebih besar dekat dengan kedua ujung *stack* dimana memberikan temperatur gradient yang lebih besar dan oleh karena itu menghasilkan perbedaan temperatur antara panas dan dingin yang lebih besar. Pada *stack* yang lebih panjang dapat menyebabkan viscous loss yang besar karena kontak yang lebih besar dari permukaan partikel gas dan kanal *stack*. Efek ini membuat perpindahan panas dari sisi dingin dan panas tidak efektif maka perubahan temperatur menjadi kecil.

5.4.3 Perbandingan posisi *Stack* dengan $\delta_k = 1\text{mm}$ pada 106 Hz dan $L_s = 10\text{cm}$

X_s	ΔT_1	ΔT_2
10	5.93	1.36
11	6.16	2.37
12	6.32	3.66
13	6.64	3.00
14	9.09	6.16

tabel 5. 3 hasil *stack* dengan $\delta_k = 1\text{mm}$ pada 106 Hz dan $L_s = 10\text{cm}$

Dari table 6.3 di dapatkan bahwa pada *stack* dengan $\delta_k = 1\text{mm}$ pada 106 Hz dan $L_s = 10\text{cm}$, mempunyai X_s maksimum 14 cm dengan hasil $\Delta T_1 (T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}})$ sebesar 9.09°C dan $\Delta T_2 = T_{\text{ambient}} - T_{\text{cold}}$ minimum sebesar 6.16°C . hasil tersebut merupakan temperatur yang terbesar di dapat di percobaan ini. Karena system *stack* ini merupakan system yang maksimum.

BAB 6

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Dari hasil perancangan dan pengujian termoakustik sederhana ini maka dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut

1. Perbandingan frekuensi $\delta_k=0.5\text{mm}$ pada 275 Hz dengan $\delta_k= 1\text{mm}$ 106 Hz yaitu :

A. Hal ini diakibatkan pengaruh penempatan *stack* , pada gelombang berdiri (*standing wave*) dan untuk resonator berupa tabung lurus dan diameter homogeny harus berada di titik perut atau titik tekanan pada gelombang berdiri yang biasanya adalah $\lambda/20$ ($\lambda=$ panjang gelombang).

B. Hal ini pula diakibatkan perbedaan frekuensi yang menyebabkan desain *stack* ikut berubah terutama dengan perbedaan δ_k , karena dengan frekuensi 275Hz mendapatkan $\delta_k = 0,5 \text{ mm}$ dan frekuensi 106Hz mendapatkan $\delta_k = 1 \text{ mm}$ walaupun kedua frekuensi itu didapatkan dari mencari frekuensi resonansi tetapi dari pengaruh panjang tabung yaitu 80 cm maka secara perhitungan maka frekuensi resonansi maksimum adalah 106 hz.

2. Perbandingan panjang *stack* 10cm dan 11 cm dengan $\delta_k= 1\text{mm}$
Kesimpulan dari perbedaan panjang *stack* adalah pengaruh panjang *stack* dapat mengakibatkan penurunan performance dari *stack* tersebut karena dalam proses siklus termoakustik terdapat kompresi dan ekspansi sehingga bila kontak permukaan gas dan anal-kanal dari *stack* terlalu panjang dapat mengakibatkan penurunan perbedaan temperatur.

3. *Stack* dengan $\delta_k = 1\text{ mm}$ pada 106 Hz dan $L_s = 10\text{ cm}$ didapatkan bahwa pada *stack* dengan $\delta_k = 1\text{ mm}$ pada 106 Hz dan $L_s = 10\text{ cm}$, mempunyai X_s maksimum 14 cm dengan hasil $\Delta T_1 (T_{\text{panas}} - T_{\text{dingin}})_{\text{Maksimum}}$ sebesar 9.09°C dan $\Delta T_2 = T_{\text{ambient}} - T_{\text{dingin minimum}}$ sebesar 6.16°C . hasil tersebut merupakan temperatur yang terbesar di dapat di percobaan ini.

6.2 Saran

Dari hasil percobaan terhadap alat termoakustik yang dirancang, sudah membuahkan hasil yang cukup bagus dengan karakteristik dari termoakustik itu sendiri tercapai. Namun alat termoakustik ini masih banyak yang harus dikembangkan untuk mendapatkan hasil yang lebih maksimal . karena percobaan kali ini penulis sadar belum maksimalnya pembuatan *stack* ddari mulai parameter panjang hingga kerapian pengerjaan. Untuk itu pengujian mendatang diharapkan harus lebih mengembangkan system *stack* tersebut.

Saran yang berikutnya untuk percobaan selanjutnya yaitu penggunaan gas kerja helium serta pengembangan termoakustik double speaker agar mendapatkan hal maksimal serta penggunaan heatpipe yang lebih efektif untuk menurunkan temperatur di sisi panas.

Semoga penelitian mengenai termoakustik tetap berlanjut karena bidang ini masih sangat minim dikembangkan dilingkungan kampus kita serta manfaat alat ini dikedepannya sangat bermanfaat untuk mencegah kerusakan lingkungan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Bo Nordell, 2003, Thermal pollution causes global warming
- [2] Ichiro Kurane, Md, 2010 , The Effect of global warming on Infectious diseases
- [3] Ikhsan Setiawan, The influence of the length and position of the stack on the performances of a thermoacoustic refrigerator, Universitas Gadjah mada, 2009
- [4] Mostafa A. Nouh, Nadim M. Arafa and Ehab Abdel Rahman, 2009 Stack Parameters Effect On The Performance Of An Anharmonic Resonator Thermoacoustic Heat Engine
- [5] Daniel George Chinn, 2010 Piezoelectrically-Driven Thermoacoustic Refrigerator
- [6] Andreia dkk. Experimental and Numerical Simulation Study on a Thermoacoustic
- [7] William C. Moss. San Mateo. Calif 1997, Thermoacoustic Refrigerator
- [8] Scout Backhaus , 2009 Thermoacoustic Refrigerator and Engines Comprising Cascading Strling Thermodynamic Units
- [9] Swift, G.W., 1995, Thermoacoustic engines and refrigerators, Phys. Today 48.
- [10] Backhaus, S., 2002, Few Varieties of Thermoacoustic Engines, Thermal Physics group
- [11] Wheatley, J., Hofler, T., Swift, G.W., and Migliori, A. (1985), Understanding some simple phenomena in thermoacoustics with applications to acoustical heat engines, Am. J. Phys 53, 147_162
- [12] Swift, G., 2002, Thermoacoustics: A Unifying Perspective for Some Engines and Refrigerators, Los Alamos National Laboratory, Acoustical Society of America Publications.
- [13] Tijani, M.E.H., Zeegers, J.C.H., and de Waele, A.T.A.M., 2002b, Construction and Performance of a Thermoacoustic Refrigerator, Cryogenics 42, (Dept of applied physics, Eindhoven University of Technology)

- [14]Tijani, M.E.H., 2001, *Loudspeaker.driven* termoakustik refrigeration, PhD Thesis, Unpublished, Eindhoven University of Technology.
- [15] Russell, D. A. and Weibull, P. 2002. "Tabletop Thermoacoustic Refrigerator for Demonstration." *Am. J. Phys*, 70: 1231–1233.
- [16]Ghazali, N.M., Aziz, A.A., Rajoo, S., 2006, Environmentally friendly refrigeration with Termoakustik, Research Vote No:74166, Fakulti Kejuruteraan Mekanikal,Universiti Teknologi Malaysia.
- [17]Kinsler, L.E., Frey, A.R. Coppins, A.B. dan Sanders, J.V., 1999, *Fundamentals of Acoustics*, Wiley, Ney York, Edisi ke-4, Bab 8.
- [18]Moloney, M.J. dan Hatten, D.L., 2001, Acoustic Quality Factor and Energy Losses in Cylindrical Pipes, *Am. J. Phys*. 69(3), 311–314.
- [19]Wetzel, M. dan Herman, C., 1997, Design optimization of thermoacoustics refrigerators, *Int. J. Refrig*. 20, 3–21.
- [20]Pengembangan sistem pendinginan thermaccoustic pada vaccine carrier portabel, riset unggulan universitas indonesia tahun 2007,Nandy putra
- [21] [http://www.engr.sjsu.edu/ndejong/ME%20146%20files/FundamentalsofHeatPipe sII.ppt](http://www.engr.sjsu.edu/ndejong/ME%20146%20files/FundamentalsofHeatPipe%20sII.ppt)

LAMPIRAN

1. Data pengujian modul termoakustik pada model *stack* gulungan dengan panjang stack 11 cm dengan frekuensi 275 hz serta $\delta_K = 0.5$ mm dan posisi stack xs 5.5 cm.

Waktu	Sisi Dingin	Sisi Panas
menit	°C	°C
0	26.46	26.47
1	26.46	26.83
2	26.41	27.07
3	26.38	27.20
4	26.36	27.31
5	26.35	27.39
6	26.34	27.47
7	26.33	27.53
8	26.32	27.59
9	26.31	27.67
10	26.29	27.72
11	26.30	27.77
12	26.29	27.81
13	26.29	27.85
14	26.28	27.88
15	26.31	27.91
16	26.35	27.96
17	26.35	28.00
18	26.35	28.03
19	26.34	28.07
20	26.36	28.11
21	26.39	28.13

22	26.41	28.16
23	26.43	28.21
24	26.49	28.23
25	26.48	28.26
26	26.47	28.26
27	26.47	28.26
28	26.47	28.26
29	26.47	28.26
30	26.47	28.26

2. Data pengujian modul termoakustik pada model *stack* gulungan dengan panjang stack 11 cm dengan frekuensi 275 hz serta $\delta_K = 0.5$ mm dan posisi stack xs 6.5 cm.

Waktu	Sisi Dingin	Sisi Panas
menit	°C	°C
0	28.1	28.1
1	28.10	28.62
2	27.96	29.25
3	28.04	29.70
4	28.23	30.02
5	28.37	30.29
6	28.59	30.53
7	28.52	30.60
8	28.67	30.85
9	28.85	31.13
10	28.93	31.35
11	28.96	31.51
12	28.86	31.68

13	29.21	31.86
14	29.18	32.02
15	28.94	32.21
16	29.14	32.23
17	29.27	32.15
18	29.36	32.13
19	29.49	32.16
20	29.61	32.24
21	29.64	32.34
22	30.08	32.45
23	29.97	32.56
24	29.65	32.68
25	29.83	32.80
26	29.98	32.89
27	30.06	32.97
28	29.96	33.05
29	29.91	33.12
30	29.80	33.17

3. Data pengujian modul termoakustik pada model *stack* gulungan dengan panjang *stack* 11 cm dengan frekuensi 275 hz serta $\delta_K = 0.5$ mm dan posisi *stack* xs 7.5 cm.

Waktu	Sisi Dingin	Sisi Panas
menit	°C	°C
0	27.99	28.00
1	27.78	28.26
2	27.37	29.01
3	27.20	29.17
4	27.11	29.31

5	26.99	29.43
6	26.92	29.58
7	26.86	29.65
8	26.82	29.70
9	26.79	29.78
10	26.76	29.87
11	26.75	29.88
12	26.74	29.91
13	26.73	29.93
14	26.74	29.99
15	26.75	30.03
16	26.73	30.04
17	26.74	30.02
18	26.72	29.99
19	26.74	29.91
20	26.76	29.87
21	26.75	29.82
22	26.71	29.79
23	26.70	29.76
24	26.71	29.74
25	26.70	29.74
26	26.70	29.72
27	26.69	29.70
28	26.66	29.69
29	26.64	29.66
30	26.61	29.64

- 4. Data pengujian modul termoakustik pada model *stack* gulungan dengan panjang stack 11 cm dengan frekuensi 275 hz serta $\delta_K = 0.5$ mm dan posisi stack xs 8.5 cm.**

Waktu	Sisi Dingin	Sisi Panas
menit	°C	°C
0	31.62	31.63
1	31.49	31.92
2	31.41	32.25
3	31.35	32.45
4	31.31	32.54
5	31.28	32.61
6	31.24	32.64
7	31.19	32.67
8	31.14	32.69
9	31.11	32.68
10	31.07	32.68
11	31.08	32.69
12	31.00	32.71
13	30.95	32.75
14	30.91	32.72
15	30.86	32.67
16	30.81	32.64
17	30.78	32.62
18	30.77	32.61
19	30.76	32.57
20	30.75	32.55
21	30.73	32.54
22	30.76	32.51
23	30.78	32.51
24	30.79	32.54
25	30.81	32.53
26	30.83	32.54
27	30.85	32.56

28	30.81	32.53
29	30.78	32.52
30	30.79	32.54

5. Data pengujian modul termoakustik pada model *stack* gulungan dengan panjang stack 11 cm dengan frekuensi 275 hz serta $\delta_K = 0.5$ mm dan posisi stack xs 9.5 cm.

Waktu	Sisi Dingin	Sisi Panas
menit	°C	°C
0	26.71	26.74
1	26.54	26.95
2	26.36	27.18
3	26.18	27.35
4	26.10	27.46
5	26.03	27.57
6	25.96	27.66
7	25.90	27.75
8	25.86	27.82
9	25.83	27.90
10	25.80	27.97
11	25.78	28.04
12	25.75	28.12
13	25.74	28.17
14	25.71	28.22
15	25.69	28.24
16	25.67	28.27
17	25.66	28.29
18	25.63	28.30
19	25.61	28.31

20	25.61	28.30
21	25.60	28.31
22	25.61	28.33
23	25.62	28.38
24	25.64	28.42
25	25.66	28.46
26	25.67	28.50
27	25.68	28.54
28	25.69	28.57
29	25.69	28.60
30	25.72	28.61

6. Data pengujian modul termoakustik pada model *stack* gulungan dengan panjang stack 11 cm dengan frekuensi 275 hz serta $\delta_K = 0.5$ mm dan posisi stack xs 10.5 cm.

Waktu	Sisi Dingin	Sisi Panas
menit	°C	°C
0	28.32	28.38
1	28.06	29.30
2	27.83	29.99
3	27.68	30.35
4	27.58	30.57
5	27.51	30.70
6	27.46	30.81
7	27.42	30.89
8	27.38	30.94
9	27.35	30.95
10	27.33	30.98
11	27.33	30.97

12	27.31	31.00
13	27.30	31.05
14	27.29	31.06
15	27.28	31.02
16	27.29	31.01
17	27.30	31.01
18	27.31	31.11
19	27.33	31.19
20	27.36	31.31
21	27.38	31.44
22	27.41	31.50
23	27.44	31.52
24	27.48	31.64
25	27.51	31.70
26	27.54	31.75
27	27.57	31.84
28	27.60	31.92
29	27.63	31.97
30	27.66	32.02

7. Data pengujian modul termoakustik pada model *stack* gulungan dengan panjang *stack* 11 cm dengan frekuensi 275 hz serta $\delta_K = 0.5$ mm dan posisi *stack* xs 11.5 cm.

Waktu	Sisi Dingin	Sisi Panas
menit	°C	°C
0	28.87	28.92
1	28.61	29.55
2	28.30	29.90

3	28.12	30.07
4	28.01	30.23
5	27.94	30.45
6	27.88	30.54
7	27.84	30.81
8	27.77	30.93
9	27.72	30.98
10	27.66	31.04
11	27.63	31.07
12	27.63	30.83
13	27.63	30.97
14	27.63	30.97
15	27.64	31.36
16	27.65	31.43
17	27.66	31.41
18	27.68	31.47
19	27.67	31.48
20	27.67	31.47
21	27.68	31.47
22	27.68	31.53
23	27.69	31.58
24	27.69	31.64
25	27.71	31.54
26	27.70	31.53
27	27.68	31.56
28	27.66	31.48
29	27.64	31.92
30	27.68	32.03

8. DATA PENGUJIAN MODUL TERMOAKUSTIK PADA MODEL STACK GULUNGAN DENGAN PANJANG STACK 11 CM DENGAN FREKUENSI 106 HZ SERTA $\delta_k = 1$ MM DAN POSISI STACK XS 5.5 CM.

Waktu	Sisi Dingin	Sisi Panas
menit	°C	°C
0	27.56	27.57
1	27.41	27.60
2	26.91	27.77
3	26.72	27.83
4	26.58	27.86
5	26.44	27.87
6	26.33	27.87
7	26.24	27.86
8	26.17	27.84
9	26.11	27.82
10	26.07	27.81
11	26.02	27.78
12	25.99	27.76
13	25.94	27.74
14	25.91	27.71
15	25.87	27.69
16	25.84	27.67
17	25.81	27.65
18	25.78	27.62
19	25.75	27.59
20	25.73	27.57
21	25.72	27.55
22	25.68	27.53

23	25.67	27.53
24	25.66	27.54
25	25.66	27.54
26	25.66	27.54
27	25.66	27.54
28	25.66	27.54
29	25.66	27.54
30	25.66	27.54

9. Data pengujian modul termoakustik pada model *stack* gulungan dengan panjang stack 11 cm dengan frekuensi 106 hz serta $\delta_K = 1$ mm dan posisi stack xs 6.5 cm.

Waktu	Sisi Dingin	Sisi Panas
menit	°C	°C
0	29.29	29.31
1	29.15	29.66
2	29.08	29.97
3	29.05	30.18
4	28.98	30.32
5	28.96	30.43
6	28.94	30.51
7	28.89	30.57
8	28.88	30.66
9	28.79	30.69
10	28.72	30.72
11	28.70	30.76
12	28.61	30.76
13	28.56	30.75
14	28.46	30.73

15	28.39	30.70
16	28.39	30.68
17	28.39	30.68
18	28.37	30.67
19	28.27	30.66
20	28.22	30.62
21	28.19	30.62
22	28.12	30.60
23	28.08	30.58
24	28.01	30.56
25	27.99	30.55
26	27.97	30.53
27	27.93	30.51
28	27.85	30.48
29	27.81	30.45
30	27.79	30.43

10. Data pengujian modul termoakustik pada model *stack* gulungan dengan panjang *stack* 11 cm dengan frekuensi 106 hz serta $\delta_K = 1$ mm dan posisi *stack* xs 7.5 cm.

Waktu	Sisi Dingin	Sisi Panas
menit	°C	°C
0	28.77	28.80
1	28.26	29.57
2	27.79	30.13
3	27.47	30.47
4	27.26	30.69
5	27.12	30.77
6	26.91	30.87

7	26.79	30.95
8	26.70	31.01
9	26.61	31.07
10	26.52	31.11
11	26.46	31.15
12	26.42	31.18
13	26.37	31.23
14	26.31	31.23
15	26.23	31.24
16	26.20	31.25
17	26.16	31.28
18	26.14	31.30
19	26.12	31.30
20	26.11	31.31
21	26.09	31.30
22	26.03	31.29
23	25.93	31.28
24	25.72	31.25
25	25.74	31.22
26	25.77	31.20
27	25.76	31.18
28	25.79	31.17
29	25.76	31.15
30	25.70	31.13

11. Data pengujian modul termoakustik pada model *stack* gulungan dengan panjang *stack* 11 cm dengan frekuensi 106 hz serta $\delta_K = 1$ mm dan posisi *stack* xs 8.5 cm.

Waktu	Sisi Dingin	Sisi Panas
menit	°C	°C
0	29.15	29.14
1	28.30	29.66
2	27.83	30.02
3	27.61	30.28
4	27.42	30.47
5	27.27	30.51
6	27.20	30.56
7	27.12	30.59
8	27.07	30.63
9	27.04	30.65
10	26.97	30.71
11	26.93	30.85
12	26.90	30.87
13	26.90	30.98
14	26.87	31.13
15	26.82	31.21
16	26.78	31.30
17	26.73	31.31
18	26.65	31.31
19	26.61	31.36
20	26.56	31.32
21	26.51	31.31
22	26.43	31.35
23	26.37	31.30
24	26.34	31.24
25	26.31	31.28
26	26.28	31.22
27	26.28	31.28

28	26.31	31.29
29	26.28	31.36
30	26.27	31.37

12. Data pengujian modul termoakustik pada model *stack* gulungan dengan panjang stack 11 cm dengan frekuensi 106 hz serta $\delta_K = 1$ mm dan posisi stack xs 9.5 cm.

Waktu	Sisi Dingin	Sisi Panas
menit	°C	°C
0	25.68	25.68
1	25.04	25.91
2	24.52	26.17
3	24.21	26.38
4	24.00	26.55
5	24.05	26.72
6	23.96	26.83
7	23.91	26.92
8	23.86	27.01
9	23.84	27.08
10	23.86	27.17
11	23.83	27.26
12	23.82	27.32
13	23.80	27.38
14	23.80	27.44
15	23.77	27.51
16	23.75	27.55
17	23.73	27.59
18	23.74	27.63
19	23.75	27.68

20	23.77	27.74
21	23.72	27.81
22	23.70	27.80
23	23.70	27.81
24	23.72	27.80
25	23.73	27.83
26	23.72	27.85
27	23.74	27.90
28	23.75	27.94
29	23.77	27.93
30	23.72	27.85

13. Data pengujian modul termoakustik pada model *stack* gulungan dengan panjang *stack* 11 cm dengan frekuensi 106 hz serta $\delta_K = 1$ mm dan posisi *stack* xs 10.5 cm.

Waktu	Sisi Dingin	Sisi Panas
menit	°C	°C
0	29.30	29.35
1	28.80	29.94
2	28.32	30.47
3	28.02	30.79
4	27.78	31.04
5	27.61	31.28
6	27.49	31.46
7	27.38	31.62
8	27.25	31.72
9	27.19	31.86
10	27.15	31.93
11	27.07	32.00

12	27.05	32.04
13	27.00	32.08
14	26.94	32.12
15	26.82	32.16
16	26.79	32.18
17	26.74	32.24
18	26.70	32.28
19	26.69	32.30
20	26.67	32.32
21	26.62	32.35
22	26.60	32.38
23	26.55	32.41
24	26.55	32.43
25	26.53	32.39
26	26.49	32.21
27	26.47	32.07
28	26.45	32.06
29	26.45	32.06
30	26.43	32.04

14. Data pengujian modul termoakustik pada model *stack* gulungan dengan panjang *stack* 11 cm dengan frekuensi 106 hz serta $\delta_K = 1$ mm dan posisi *stack* xs 11.5 cm.

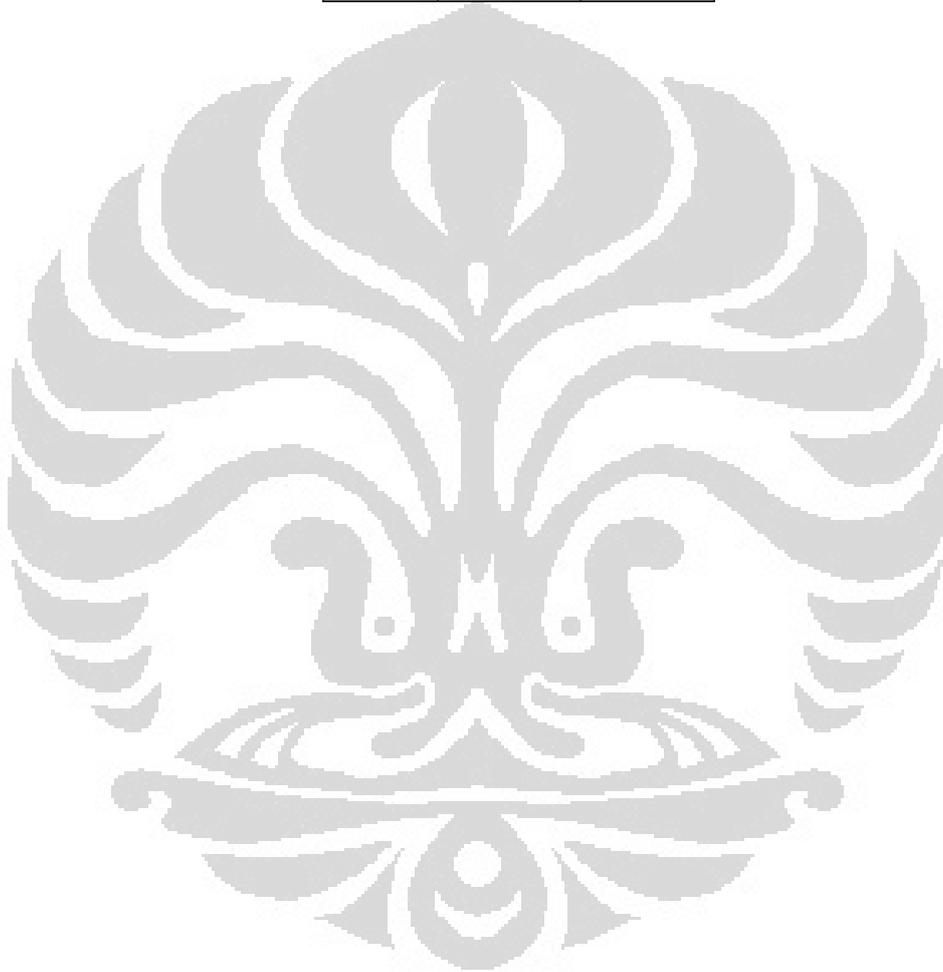
Waktu	Sisi Dingin	Sisi Panas
menit	°C	°C
0	28.72	28.72
1	28.52	28.64
2	28.27	28.53
3	27.50	29.10

4	27.05	29.52
5	26.75	29.83
6	26.51	30.07
7	26.31	30.19
8	26.22	30.21
9	26.13	30.41
10	26.08	30.55
11	26.04	30.68
12	26.03	30.81
13	26.01	30.92
14	26.01	31.03
15	26.03	31.13
16	25.98	31.20
17	26.00	31.27
18	25.98	31.00
19	25.96	31.04
20	25.88	31.11
21	25.80	31.17
22	25.75	31.24
23	25.67	31.31
24	25.68	31.34
25	25.66	31.37
26	25.64	31.39
27	25.59	31.44
28	25.62	31.48
29	25.62	31.45
30	25.62	31.38

15. Data pengujian modul termoakustik pada model *stack* gulungan dengan panjang stack 10 cm dengan frekuensi 106 hz serta $\delta_K = 1$ mm dan posisi stack xs 10 cm.

Waktu	Sisi Dingin	Sisi Panas
menit	°C	°C
0	29.83	29.83
1	28.98	30.43
2	28.68	31.37
3	28.58	32.04
4	28.49	32.52
5	28.47	32.90
6	28.52	33.20
7	28.49	33.49
8	28.50	33.71
9	28.52	33.87
10	28.59	33.97
11	28.60	33.99
12	28.67	34.07
13	28.68	34.20
14	28.75	34.24
15	28.84	34.36
16	28.92	34.46
17	28.97	34.56
18	28.99	34.64
19	29.02	34.73
20	29.06	34.81
21	29.04	34.90
22	29.04	34.97
23	29.08	35.01

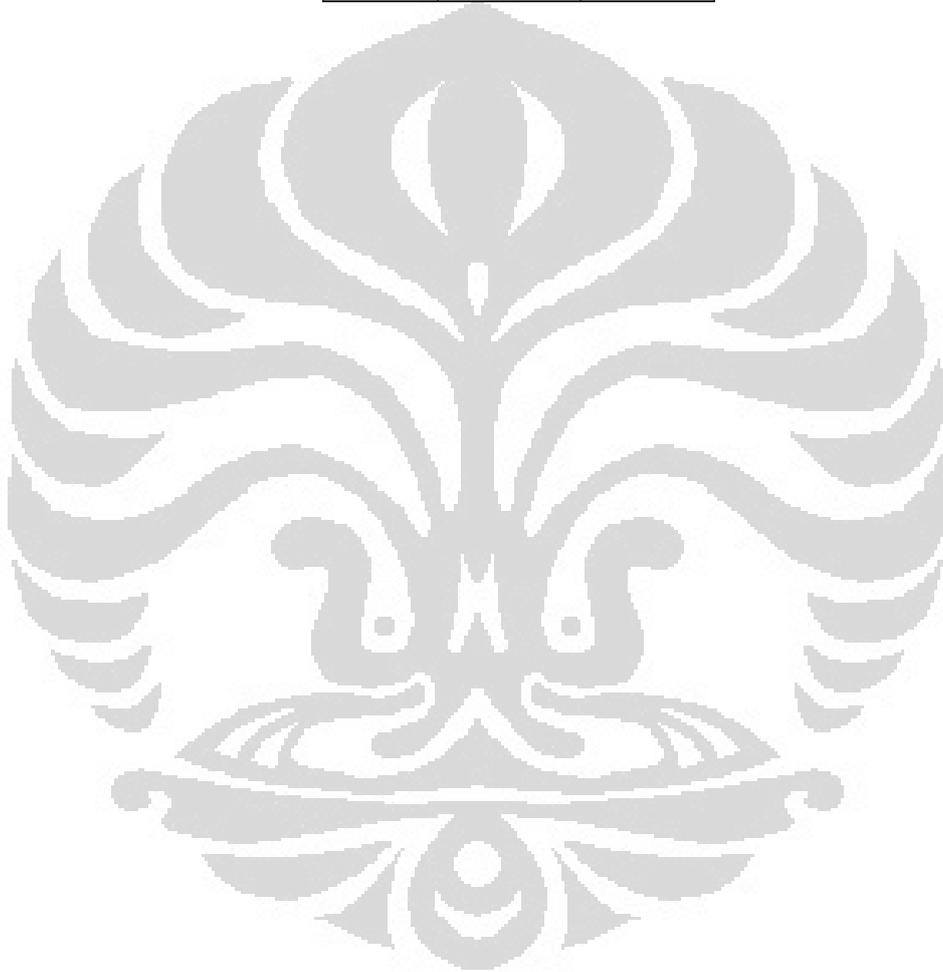
24	29.12	35.06
25	29.17	35.08
26	29.20	35.09
27	29.27	35.12
28	29.26	35.14
29	29.28	35.16
30	29.28	35.16



16. Data pengujian modul termoakustik pada model *stack* gulungan dengan panjang stack 10 cm dengan frekuensi 106 hz serta $\delta_K = 1$ mm dan posisi stack xs 11 cm.

Waktu	Sisi Dingin	Sisi Panas
menit	°C	°C
0	31.25	31.27
1	30.61	31.85
2	29.36	33.44
3	29.21	34.08
4	28.99	34.39
5	28.88	34.69
6	28.91	34.86
7	29.08	35.05
8	29.25	35.14
9	29.21	35.26
10	29.27	35.30
11	29.21	35.25
12	29.20	35.36
13	29.16	35.32
14	29.27	35.41
15	29.29	35.40
16	29.34	35.48
17	29.44	35.46
18	29.41	35.49
19	29.48	35.56
20	29.64	35.63
21	29.77	35.65
22	29.90	35.73
23	29.94	35.85

24	29.97	35.89
25	30.03	36.03
26	30.02	36.07
27	30.12	36.12
28	30.13	36.15
29	30.09	36.20
30	30.11	36.25



17. Data pengujian modul termoakustik pada model *stack* gulungan dengan panjang stack 10 cm dengan frekuensi 106 hz serta $\delta_K = 1$ mm dan posisi stack xs 12 cm.

Waktu	Sisi Dingin	Sisi Panas
menit	°C	°C
0	31.09	31.09
1	29.85	32.11
2	29.37	32.85
3	29.15	33.22
4	28.98	33.38
5	28.86	33.48
6	28.76	33.62
7	28.63	33.70
8	28.61	33.89
9	28.61	34.01
10	28.59	34.05
11	28.47	34.04
12	28.41	34.07
13	28.36	34.05
14	28.24	34.06
15	28.19	34.07
16	28.11	34.09
17	28.02	34.05
18	27.94	34.06
19	27.85	34.09
20	27.80	34.05
21	27.75	33.98
22	27.70	33.97
23	27.66	33.91

24	27.60	33.92
25	27.59	33.88
26	27.59	33.82
27	27.57	33.82
28	27.52	33.78
29	27.48	33.78
30	27.43	33.73

18. Data pengujian modul termoakustik pada model *stack* gulungan dengan panjang stack 10 cm dengan frekuensi 106 hz serta $\delta_K = 1$ mm dan posisi stack xs 13 cm.

Waktu	Sisi Dingin	Sisi Panas
menit	°C	°C
0	29.14	29.15
1	28.39	30.42
2	28.02	31.25
3	27.82	31.71
4	27.69	32.05
5	27.64	32.29
6	27.54	32.50
7	27.45	32.65
8	27.36	32.77
9	27.28	32.82
10	27.22	32.96
11	27.12	33.06
12	26.99	33.08
13	26.95	33.10
14	26.77	33.11
15	26.64	33.06

16	26.55	33.04
17	26.53	33.06
18	26.45	32.99
19	26.36	32.95
20	26.29	32.87
21	26.26	32.84
22	26.21	32.84
23	26.17	32.81
24	26.18	32.79
25	26.15	32.76
26	26.27	32.80
27	26.37	32.79
28	26.37	32.76
29	26.45	32.65
30	26.43	32.65

19. Data pengujian modul termoakustik pada model *stack* gulungan dengan panjang stack 10 cm dengan frekuensi 106 hz serta $\delta_K = 1$ mm dan posisi stack xs 14 cm.

Waktu	Sisi Dingin	Sisi Panas
menit	°C	°C
0	28.57	28.58
1	26.77	30.05
2	25.77	30.86
3	25.28	31.22
4	24.96	31.50
5	24.70	31.69
6	24.48	31.81
7	24.29	31.92
8	24.15	31.99
9	24.03	32.00
10	23.91	32.00
11	23.81	31.99
12	23.71	31.97
13	23.58	31.96
14	23.47	32.03
15	23.36	32.01
16	23.27	31.96
17	23.19	31.95
18	23.12	31.97
19	23.03	31.92
20	22.97	31.89
21	22.90	31.83
22	22.84	31.76
23	22.77	31.75

24	22.71	31.67
25	22.65	31.62
26	22.59	31.61
27	22.55	31.57
28	22.50	31.50
29	22.46	31.40
30	22.41	31.50

20. Data pengujian modul termoakustik pada model *stack* gulungan dengan panjang stack 10 cm dengan frekuensi 106 hz serta $\delta_K = 1$ mm dan posisi stack xs 15 cm.

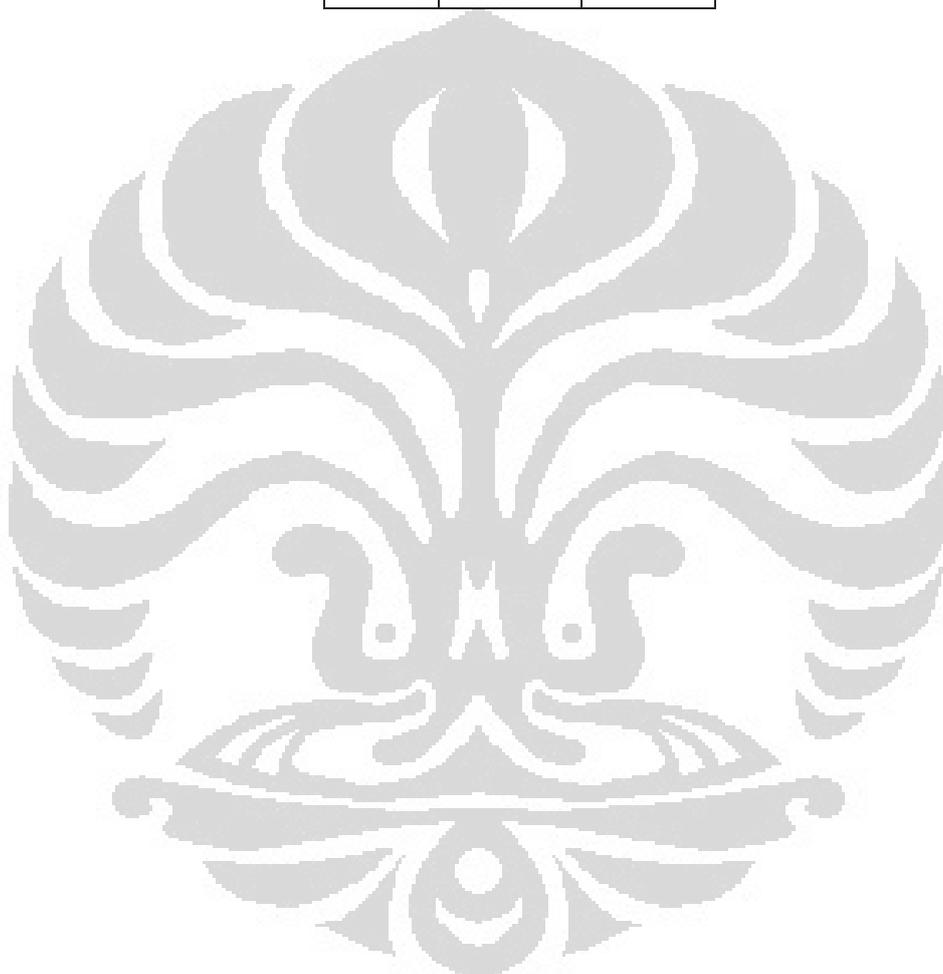
Waktu	Sisi Dingin	Sisi Panas
menit	°C	°C
0	28.56	28.56
1	26.68	29.74
2	25.83	30.35
3	25.64	30.91
4	25.50	31.42
5	25.23	31.69
6	24.98	31.83
7	24.84	31.79
8	24.74	31.84
9	24.58	31.77
10	24.47	31.81
11	24.43	31.73
12	24.37	31.73
13	24.32	31.78
14	24.28	31.78
15	24.27	31.85

16	24.24	31.88
17	24.19	31.86
18	24.15	31.88
19	24.10	31.89
20	24.08	31.87
21	24.03	31.96
22	23.99	32.05
23	23.97	31.90
24	23.95	32.01
25	23.92	32.04
26	23.91	31.92
27	23.90	31.97
28	23.86	31.86
29	23.89	32.00
30	23.88	31.91

21. Data pengujian modul termoakustik pada model *stack plate* dengan panjang stack 10 cm dengan frekuensi 106 hz serta $\delta_K = 1$ mm dan posisi stack xs 10 cm.

Waktu	Sisi Dingin	Sisi Panas
menit	°C	°C
0	27.47	27.48
1	27.17	27.80
2	26.70	28.03
3	26.42	28.10
4	26.11	28.12
5	25.94	28.11
6	25.74	28.08
7	25.54	28.05
8	25.49	28.01
9	25.40	27.97
10	25.30	27.93
11	25.21	27.89
12	25.12	27.84
13	25.03	27.80
14	24.97	27.77
15	24.93	27.72
16	24.84	27.67
17	24.80	27.62
18	24.76	27.57
19	24.74	27.54
20	24.72	27.51
21	24.69	27.47
22	24.65	27.44
23	24.61	27.39

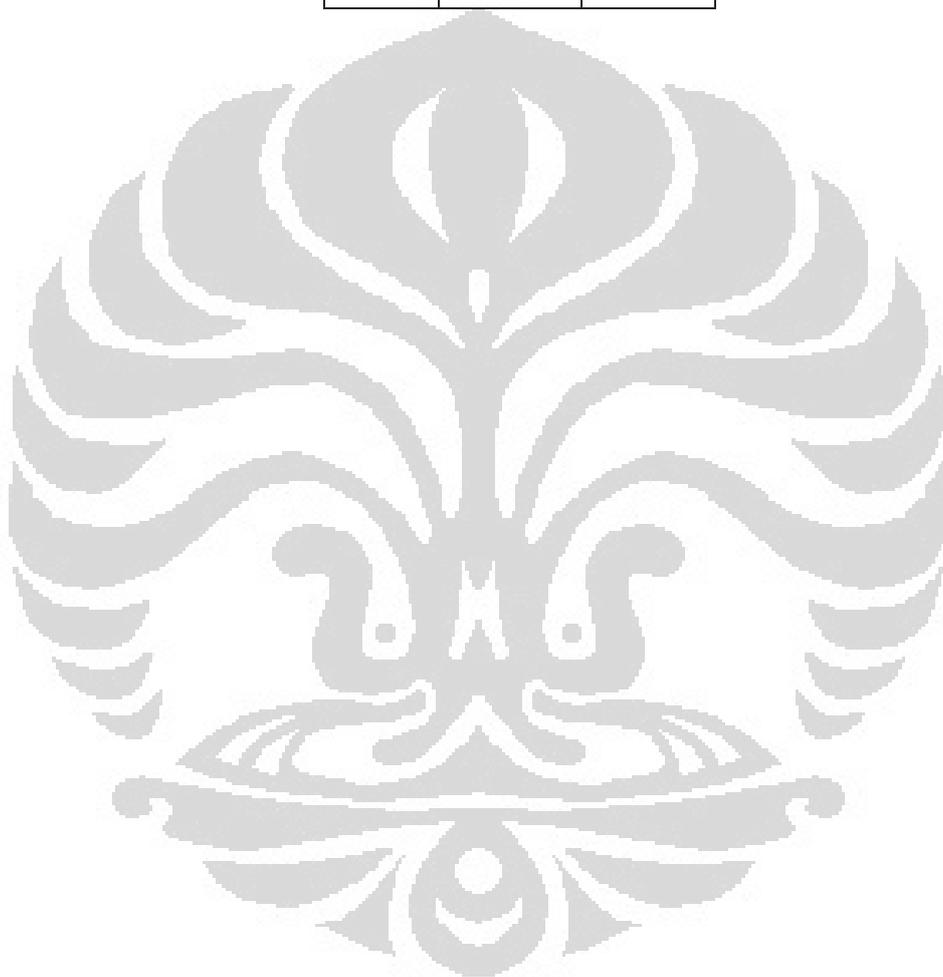
24	24.56	27.36
25	24.56	27.35
26	24.56	27.35
27	24.56	27.35
28	24.56	27.35
29	24.56	27.35
30	24.56	27.35



22. Data pengujian modul termoakustik pada model *stack plate* dengan panjang stack 10 cm dengan frekuensi 106 hz serta $\delta_K = 1$ mm dan posisi stack xs 11 cm.

Waktu	Sisi Dingin	Sisi Panas
menit	°C	°C
0	27.58	27.64
1	27.22	27.99
2	26.84	28.28
3	26.53	28.40
4	26.15	28.47
5	25.93	28.51
6	25.81	28.52
7	25.65	28.50
8	25.55	28.49
9	25.47	28.47
10	25.32	28.45
11	25.21	28.41
12	25.12	28.40
13	25.00	28.39
14	24.92	28.36
15	24.83	28.36
16	24.74	28.36
17	24.68	28.33
18	24.60	28.25
19	24.47	28.18
20	24.40	28.10
21	24.44	28.05
22	24.52	28.06
23	24.61	28.11

24	24.76	28.17
25	24.92	28.25
26	25.07	28.30
27	25.21	28.07
28	25.21	28.05
29	25.21	28.05
30	25.21	28.05



23. Data pengujian modul termoakustik pada model *stack plate* dengan panjang stack 10 cm dengan frekuensi 106 hz serta $\delta_K = 1$ mm dan posisi stack xs 12 cm.

Waktu	Sisi Dingin	Sisi Panas
menit	°C	°C
0	29.99	30.02
1	28.81	30.30
2	28.37	30.38
3	28.17	30.46
4	28.03	30.63
5	27.93	30.72
6	27.83	30.79
7	27.70	30.80
8	27.64	30.87
9	27.57	30.81
10	27.52	30.80
11	27.48	30.75
12	27.40	30.75
13	27.36	30.81
14	27.26	30.81
15	27.22	30.87
16	27.21	30.83
17	27.19	30.80
18	27.11	30.76
19	27.05	30.73
20	26.99	30.69
21	26.96	30.67
22	26.91	30.65
23	26.89	30.61

24	26.85	30.58
25	26.81	30.56
26	26.76	30.54
27	26.75	30.53
28	26.72	30.51
29	26.75	30.51
30	26.74	30.48

24. Data pengujian modul termoakustik pada model *stack plate* dengan panjang stack 10 cm dengan frekuensi 106 hz serta $\delta_K = 1$ mm dan posisi stack xs 13 cm.

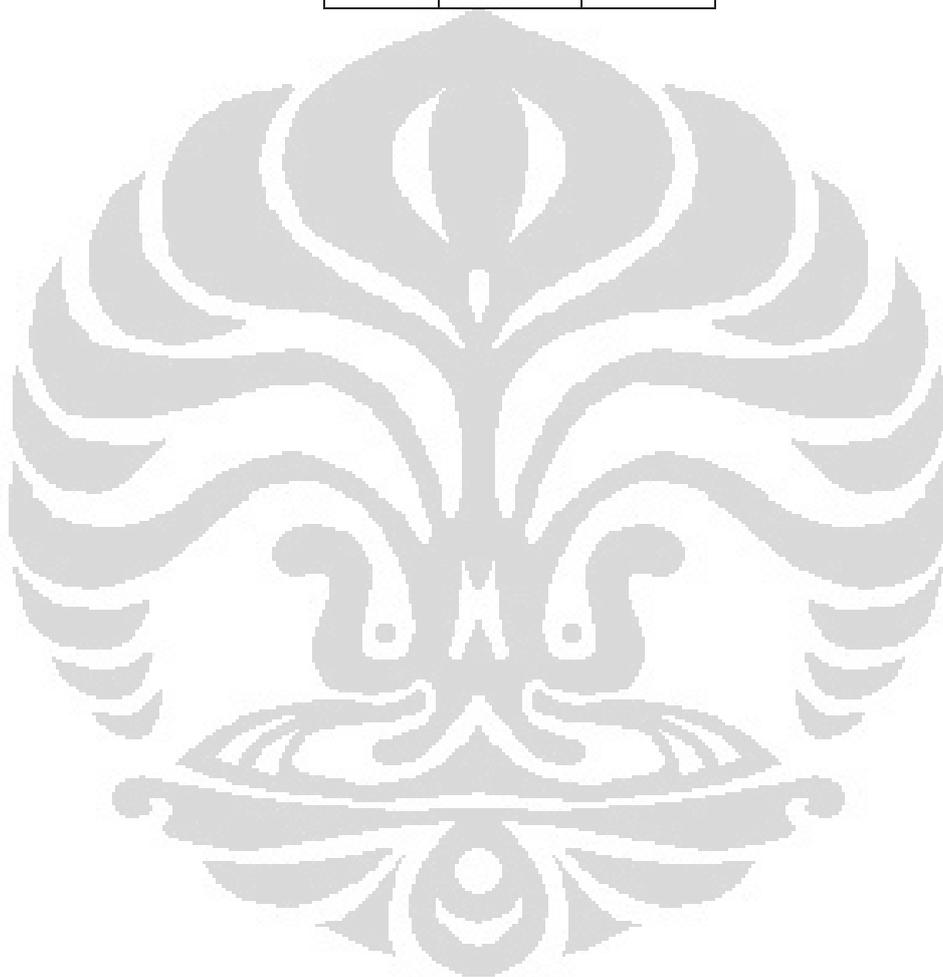
Waktu	Sisi Dingin	Sisi Panas
menit	°C	°C
0	30.04	30.04
1	29.36	30.61
2	28.95	30.87
3	28.73	31.10
4	28.59	31.23
5	28.50	31.36
6	28.44	31.44
7	28.36	31.53
8	28.30	31.56
9	28.24	31.57
10	28.21	31.50
11	28.13	31.43
12	28.11	31.40
13	28.08	31.38
14	28.04	31.40
15	28.00	31.42

16	27.98	31.42
17	27.97	31.38
18	27.93	31.34
19	27.90	31.35
20	27.88	31.29
21	27.86	31.23
22	27.83	31.24
23	27.70	31.19
24	27.56	31.14
25	27.42	31.10
26	27.38	31.04
27	27.34	30.97
28	27.33	30.91
29	27.29	30.84
30	27.26	30.82

25. Data pengujian modul termoakustik pada model *stack plate* dengan panjang stack 10 cm dengan frekuensi 106 hz serta $\delta_K = 1$ mm dan posisi stack xs 14 cm.

Waktu	Sisi Dingin	Sisi Panas
menit	°C	°C
0	24.47	24.51
1	24.57	25.37
2	24.52	25.92
3	24.53	26.47
4	24.56	26.77
5	24.61	27.04
6	24.67	27.25
7	24.71	27.40
8	24.73	27.59
9	24.73	27.82
10	24.71	28.23
11	24.70	28.39
12	24.69	28.42
13	24.68	28.60
14	24.67	28.66
15	24.64	28.65
16	24.58	28.75
17	24.53	28.78
18	24.46	28.77
19	24.39	28.76
20	24.32	28.72
21	24.28	28.68
22	24.22	28.62
23	24.16	28.55

24	24.10	28.49
25	24.01	28.42
26	23.90	28.34
27	23.83	28.27
28	23.77	28.19
29	23.70	28.13
30	23.62	28.04



26. Gambar kerja thermoakustik

